

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



**Análisis de las propiedades mecánicas y durabilidad del
concreto permeable con porcelana usado como agregado fino**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Maria Eugenia Chachaque Jimenez
Kely Jessica Huisa Labra

Asesor:

Mg. Edwin Parillo Escarsena

Juliaca, abril de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. 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: **“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DEL CONCRETO PERMEABLE CON PORCELANA USADO COMO AGREGADO FINO”** de los autores **Maria Eugenia Chachaque Jimenez** y **Kely Jessica Huisa Labra**, tiene un índice de similitud de 16% 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 10 días del mes de mayo del año 2024.



Mg. Edwin Parillo Escarsena

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 22 día(s) del mes de abril del año 2020 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):

Msc. Eder Mamani Chambi, el (la) secretario(a): Mg. Ezerardo Williams

Pari Quipe y los demás miembros: Dr. Nestor Alejandro

Cruz Galopuja y el (la) asesor(a) Mg. Edwin Parillo

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

Análisis de las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto permeable con perlona usado como agregado fino

del(los) bachiller/es: a) Maria Eugenia Ghachague Jimenez

b) Kely Jessica Huisa Labra

c)

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil
(Delimitación 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): Maria Eugenia Ghachague Jimenez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Kely Jessica Huisa Labra

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

[Firma]
Asesor/a

[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (c)

Índice de contenido

I. INTRODUCCIÓN.....	8
II. MATERIALES Y MÉTODOS	11
A. Materiales	11
B. Diseño de mezcla.....	13
C. Ensayos de laboratorio.....	14
1. <i>Densidad y porosidad</i>	14
2. <i>Permeabilidad</i>	15
3. <i>Propiedades mecánicas</i>	15
4. <i>Resistencia a la abrasión</i>	16
5. <i>Ciclos de congelación-descongelación</i>	16
6. <i>Microestructura</i>	17
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
A. Porosidad, densidad y permeabilidad.....	18
B. Resistencia a la compresión y flexión	20
C. Resistencia a la abrasión.....	23
D. Durabilidad a ciclos de congelación-descongelación.....	24
E. Microestructura.....	25
IV. CONCLUSIONES.....	28
V. EXPRESIONES DE GRATITUD	29
VI. REFERENCIAS	30

Análisis de las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto permeable con porcelana usado como agregado fino

RESUMEN

Los residuos cerámicos son materiales no biodegradables que afectan negativamente al medio ambiente, sin embargo, pueden ser reutilizados como agregados en la producción del concreto. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar mezclas de concreto con residuos de porcelana triturada variando la gradación y el porcentaje de sustitución, y analizar las propiedades mediante ensayos experimentales tales como porosidad, permeabilidad, densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la abrasión y a ciclos de congelación y descongelación (FT). Y se examinó la microestructura del concreto permeable mediante un microscopio electrónico de barrido. La sustitución del 5% de porcelana (CPF1) en gradación 2.36-4.75mm presento resultados mejores y cercanos a la mezcla control (CP), con una resistencia a la compresión 9.21% mayor que CP, 19.16% y 18.34% menos de pérdida de masa por desgaste a abrasión y 60 ciclos de FT respectivamente. Sin embargo, el efecto puzolánico de la porcelana y la densificación de la matriz cementante por la presencia de agregado fino redujo la porosidad 6.83% en función a CP, disminuyendo la permeabilidad de 0.93 cm/s a 0.61 cm/s. Por lo tanto, es factible considerar los residuos de porcelana como material alternativo para la elaboración del concreto permeable, por ser un material viable a ser reutilizado que contiene propiedades puzolánicas y así disminuir el impacto ambiental producido durante su eliminación.

Palabras clave: Concreto permeable, Porcelana reciclada, Permeabilidad, Resistencia, Durabilidad.

Analysis of the mechanical properties and durability of permeable concrete with porcelain used as fine aggregate

ABSTRACT

Ceramic waste is non-biodegradable materials that negatively affect the environment; however, it can be reused as aggregates in concrete production. This study aimed to develop concrete mixtures with crushed porcelain waste, varying the gradation and percentage of substitution, and analyze the properties through experimental tests such as porosity, permeability, density, compressive strength, flexural strength, resistance to abrasion and freeze-thaw (FT) cycles. Additionally, the microstructure of the permeable concrete was examined using a scanning electron microscope. The replacement of 10% porcelain (CPF2) in gradation 2.36-4.75mm presented the best results, with a compression resistance 37.68% greater than the control mixture (CP), 50.71% and 42.58% less mass loss per Cantabro and 60 FT cycles, respectively. However, the porcelain's pozzolanic effect and the cementitious matrix's densification reduced the porosity by 23.01% based on CP, decreasing the permeability from 0.99 cm/s to 0.33 cm/s. It is feasible to consider porcelain waste as an alternative material for producing permeable concrete, as it is a viable material to be reused with pozzolanic properties and thus reduces the environmental impact produced during its disposal.

Keywords: Permeable concrete, recycled porcelain, permeability, resistance, and durability.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se busca disminuir el gran impacto ambiental producido por la industria de la construcción, debido a la alta emisión de dióxido de carbono (CO₂) antes, durante y después del proceso de urbanización [1] a través de diferentes actividades como el uso desmedido de recursos no renovables con la extracción de arena y grava de ríos y formaciones rocosas, provocando la alteración del paisaje y problemas de estabilidad del suelo [2]; la fabricación del cemento responsable de emitir 7% de CO₂ del total a nivel mundial [3]; la tala de vegetación y la destrucción de hábitats en el área de construcción; la eliminación de residuos de construcción y demolición que son desechados de manera inadecuada agravando los problemas ambientales [2], [4] y otros. Razones por la cual se está viviendo un cambio climático que afecta a todo el mundo, generando pérdidas en la sociedad humana, ecosistemas y en la economía [5], [6]. Un efecto importante del cambio climático es el aumento de fuertes precipitaciones, produciendo el riesgo de inundaciones urbanas [7].

Debido al gran crecimiento poblacional y la rápida urbanización, se ha ido construyendo grandes áreas urbanas con superficies de suelo impermeables [8], evitando la infiltración del agua al subsuelo y provocando inundaciones en zonas bajas de ciudades. Es importante mencionar que, los sistemas de drenaje urbano no tienen la capacidad de manejar el aumento de escorrentía, no solo por la falta de mantenimiento, también por las fuertes precipitaciones y la reducción de zonas de infiltración en el área urbano [9]. Por lo que, es necesario construir ciudades con superficies permeables, que ayudan a controlar las inundaciones causadas por el aumento de lluvias [10]. La sustitución del concreto convencional por uno permeable ofrece beneficios ambientales, entre ellos la disminución de la escorrentía superficial, permitiendo el paso del agua, purificándola y recargando las aguas subterráneas [11], [12], [13], [14], sin intervenir en el ciclo natural del agua. También reduce el efecto de isla calor urbano [15] causado por el cambio climático y la falta de áreas verdes, disminuye el ruido del tráfico [16] y las salpicaduras de agua, e incrementa la resistencia al deslizamiento [17], [18], dando seguridad a peatones y vehículos. Este tipo de material respetuoso con el medio ambiente es aplicado principalmente en pavimentos de baja carga [19], baja densidad de tráfico, baja velocidad de desplazamiento [15], con flujo de vehículos ligeros y para desplazamiento peatonal, como estacionamientos, aceras, parques, callejones, ciclovías, senderos peatonales, áreas de lavado de automóviles, etc [18], [20].

El concreto permeable es un material poroso, elaborado con cemento, agregado grueso, con poco o sin agregado fino, agua y aditivos [21], que permite mediante sus espacios vacíos la infiltración del agua hacia el subsuelo. El contenido de vacíos del concreto permeable oscila entre el 15% y 35%, con tamaños de poros que varían de 2 a 8 mm [22], resaltando que su porosidad afecta significativamente en su resistencia. Según el ACI 522R-10 [23], la resistencia a compresión se encuentra entre 2.8 y 28 MPa, su rango de permeabilidad de 81 a 730 L/min/m² (0.135–1.21 cm/s), la relación agua-cemento (a/c) está entre 0.26 a 0.45. Generalmente el uso de agregado fino entre el 5-10% de la masa del agregado grueso, proporciona una mejor resistencia y durabilidad del concreto permeable [24]. Sin embargo, el uso mayor al 10% de arena puede disminuir la permeabilidad del concreto [14]. La durabilidad del concreto permeable, se evalúa mediante su capacidad para resistir los diversos daños que le causan los factores ambientales como ciclos de congelación-descongelación (FT), abrasión, ataques químicos y obstrucciones, que influyen negativamente en sus propiedades mecánicas y disminuyen su vida útil [18].

Así mismo, se ha buscado disminuir el consumo de agregados naturales como la grava y arena, con el fin de reemplazarlo por otro tipo de material. Por ello, muchos investigadores se han enfocado en el uso de residuos industriales como agregado para la elaboración del concreto, mediante el reciclaje y la reutilización de este material, y así contribuir a un desarrollo sostenible [25]. Por lo tanto, en esta investigación se hace uso de desechos cerámicos de porcelana provenientes de tazas y platos reciclados (residuos de porcelana); que por ser un material no biodegradable afecta al medio ambiente [26]. Los principales productores en la industria de artículos de cocina cerámica están en Asia, en países como India y china, y en Europa se tiene a Alemania, Reino Unido y Francia [27]; mientras que América Latina actualmente importa artículos de cocina de porcelana china, no obstante Brasil es uno de los productores de baldosas de cerámica que ha ido creciendo muy rápidamente [28]. En la India se genera aprox. 15 – 20% de residuos del total de producción de vajillas de cerámica [29]. En la producción y exportación de cerámicos se genera una gran cantidad de residuos, como productos rotos o deformes que son rechazados y desechados incorrectamente en vertederos y así mismo, son difíciles de reciclar [30], [31].

Para la elaboración de productos cerámicos, se hace uso de dos tipos de arcilla: roja y blanca. La arcilla roja es usada para hacer ladrillos, tejas y bloques, y la arcilla blanca se usa en

baldosas, azulejos, artículos para cocina de porcelana, artículos sanitarios y aisladores cerámicos [32]. Los cerámicos con arcilla roja son los más utilizados en la construcción, sin embargo, se caracteriza por ser frágil a comparación de los cerámicos cocidos con arcilla blanca [33]. Ya que, al sustituir agregados naturales por cerámica roja, la resistencia a la compresión del concreto disminuye en función al porcentaje de sustitución [34]. Mientras que los desechos de cerámicos blancos, como la cerámica sanitaria [34] y los cerámicos para artículos de cocina, mejoran la resistencia del concreto a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución [29] generando una mayor durabilidad frente a condiciones adversas [35], [36]. Al unirse la pasta de cemento con residuos de porcelana, hay una mejor distribución de gel de silicato de calcio hidratado (CSH) en la zona de transición interfacial (ITZ), debido al comportamiento puzolánico de la porcelana; lo que aumenta la fuerza de unión de los agregados y la pasta de cemento, y mejora las características en estado endurecido del concreto [3], [32], [37].

Las investigaciones realizadas con residuos de porcelana triturada (PW), se limitan en la sustitución de agregados para un concreto convencional. Razón por la cual, en esta investigación se hará uso de los residuos de platos y tazas de porcelana para la sustitución de los agregados naturales en el concreto permeable. El concreto permeable debe tener dos características principales aparte de su permeabilidad; las cuales son resistencia y durabilidad acorde a su uso y zona de aplicación. Siendo los residuos de porcelana triturada (PW) un material alternativo en la elaboración del concreto permeable y la mejora de sus propiedades. El objetivo de esta investigación es hacer uso de PW como agregado con dos tipos de gradaciones (F:0.075-4.75mm y G:2.36-4.75mm) para la elaboración de concreto permeable; la gradación G reemplaza en 50% y 100% al agregado grueso de la misma gradación, y la gradación F en 5% y 10% en función al total del agregado grueso. Para analizar las propiedades mecánicas como resistencia a compresión y resistencia a la flexión; pruebas de durabilidad como resistencia a la degradación por impacto y abrasión, y resistencia a 20, 40 y 60 ciclos FT. Así mismo, se realizó los ensayos de permeabilidad, densidad y contenido de vacíos en el concreto endurecido. También se realizó un análisis de microscopio electrónico de barrido (SEM), para analizar la microestructura del concreto permeable antes y después de exponerlo a ciclos de congelación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

En esta investigación se utilizó cemento más comercial en la zona Portland puzolánico tipo IP, como agregado grueso se utilizó piedra natural triturada con tamaño de partículas de 19.00 mm a 4.00 mm (Huso N° 67) según la norma ASTM C33 [38]. Para obtener la gradación requerida, se combinó agregado de dos tamaños diferentes (A:2.36-4.75mm y B:4.75-19.0mm) en proporciones de 70:30 respectivamente. Los residuos de porcelana se recolectaron de tiendas proveedoras al por mayor y menor de artículos de cocina y cerámicos de porcelana, que desechan el producto cuando se les rompe durante el traslado o manejo del producto, para después triturarlo y tamizarlo del tamaño del agregado fino, como se muestra en la Figura 1. El tamaño de las partículas estuvo en un rango de 0.075-4.75mm. En la Figura 2 y Figura 3, se muestra la gradación del agregado grueso y PW (agregado fino) respectivamente.



Fig. 1. PW triturada y tamizada en el rango de agregado fino (0.075-4.75mm).

En la Tabla 1 se muestra las propiedades físicas del agregado grueso y la porcelana, siendo mayor el porcentaje de absorción y menor su peso específico de PW a comparación del agregado natural. Y la Tabla 2, presenta la composición química de los residuos de porcelana. Se utilizó agua potable para la mezcla del concreto permeable, y aditivo superplastificante para reducir la cantidad de agua con el objetivo de mejorar la resistencia a compresión, y obtener la trabajabilidad deseada.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO NATURAL Y LA PORCELANA.

Propiedades	Módulo de finura	Absorción de agua (%)	Gravedad específica	Valor de abrasión Los Ángeles (%)
Agregado natural	6.70	1.67	2.56	18.91
Porcelana (PW)	2.91	2.60	2.25	32.08

TABLA II
COMPOSICIÓN QUÍMICA PW.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO	Otros
PW	70.80	23.90	2.20	1.39	0.84	0.24	0.17	0.49

La presencia de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en PW como se observa en la Tabla 2, proporciona un ambiente puzolánico a la matriz del concreto [39], generando mejores productos de hidratación observados a través del estudio de microestructura ocasionando el incremento en la resistencia [40].

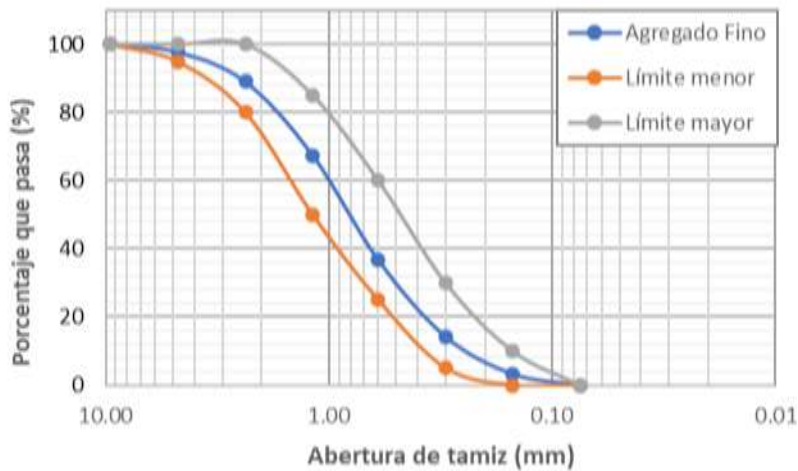


Fig. 2. Gradación de los residuos de PW (agregado fino).

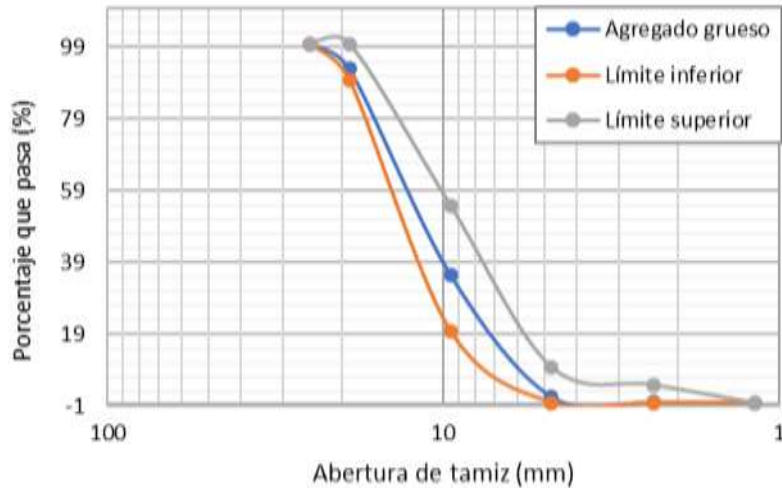


Fig. 3. Gradación del agregado grueso – Huso 67.

B. Diseño de mezcla

Se realizó 5 diseños de mezcla de concreto permeable según el ACI 522R-10 [23]. La mezcla control y 4 mezclas en donde se reemplazó el agregado grueso por agregado fino en dos gradaciones (F:0.075-4.75mm y G:2.36-4.75mm) diferentes de PW; la gradación F en 5% y 10% del total del agregado grueso, y la gradación G reemplaza en 50% y 100% del agregado grueso de la gradación A (las dos últimas mezclas presentan la misma gradación que la mezcla control). La sustitución se realizó en base al volumen del agregado grueso, debido al valor bajo de peso específico de PW. Hubo una variación de relación agua cemento (a/c), debido a que se elaboró todas las mezclas con Slump 0 (cero), y por el alto porcentaje de absorción de PW se hizo uso del aditivo superplastificante, para evitar un aumento excesivo de agua en la mezcla, lo que conllevaría a la disminución de resistencia a la compresión. En la Tabla 3, se muestra las proporciones finales de la mezcla de concreto permeable.

TABLA III
PROPORCIONES FINALES DEL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO PERMEABLE (KG/M3).

Tipo de mezcla	Cemento Portland IP	Agua	Agregado grueso		Porcentaje de reemplazo con PW	Porcelana (PW)		Aditivo (Lt/m3)
			2.36-4.75 mm	4.75-19.0 mm		0.075 - 4.75 mm	2.36 - 4.75 mm	

			A	B		F	G	
CP	347.7	116.6	473.3	1104.4	-	-	-	2.05
CPG1			236.8	1104.2	50%A		207.3	2.05
CPG2			-	1104.2	100%A		414.6	2.05
CPF1			449.7	1049.2	5%A-B	69.1	-	2.05
CPF2			426.0	994.0	10%A-B	138.1		2.05

Nota: CP es la mezcla control (contiene agregado grueso natural de gradación A y B), CPF1 y CPF2 es la mezcla con reemplazo del total del agregado grueso por 5% y 10% de PW como agregado fino respectivamente, CPG1 y CPG2 mezclas con reemplazo de la gradación A del agregado grueso por 50% y 100% de PW de la misma gradación.

La elaboración del concreto se basó en la norma ASTM C192 [41], usando mezcladora de concreto tipo trompo con capacidad de 140 litros. La mezcla se moldeó en probetas y vigas, en donde se usó el método del varillado. Se vació en dos y tres capas las probetas cilíndricas de $d10\text{cm} \times h20\text{cm}$ y $d15\text{cm} \times h30\text{cm}$ respectivamente, golpeando 20 a 30 veces por capa las probetas. De igual manera, se vació en dos capas los moldes para vigas de $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 50\text{cm}$; en donde se golpeó 75 veces por capa, con una varilla de metal con el extremo redondo. Después, se cubrió con plástico todos los especímenes para evitar la pérdida de agua, y se mantuvo a temperatura ambiente. Todas las muestras se desmoldaron después de 24 horas e inmediatamente son curados sumergiéndolos en agua.

C. Ensayos de laboratorio

1. Densidad y porosidad

El ensayo de densidad y porosidad se desarrolló según la norma ASTM C1754 [42], basado en el principio de Arquímedes. Para el contenido de vacíos, se tomaron tres muestras cilíndricas de $10\text{cm} \times 15\text{cm}$ por diseño y se utilizó el método de secado B en un horno, para después sumergir la muestra en agua y registrar los cambios de masa; con los datos obtenidos se realizan los cálculos respectivos. La densidad del concreto permeable se obtiene con datos de las mismas muestras mencionadas, mediante la relación de la masa constante de la muestra seca y el volumen total de la muestra.

2. Permeabilidad

En la Figura 4a, se muestra un equipo para medir la permeabilidad del concreto permeable, elaborado mediante las recomendaciones de la norma ACI 522R-10 [23], en donde se mide el tiempo en el que una cantidad de agua atraviesa la muestra de concreto de manera vertical, para así conocer el coeficiente de permeabilidad. Para esta prueba se tiene tres muestras cilíndricas de $d10\text{cm} \times h15\text{cm}$ para cada mezcla, que son envueltas por los costados con plástico y cinta adhesiva, como se muestra en la Figura 4b. De igual forma, al colocar la muestra en el equipo, se sella las uniones con cinta adhesiva impermeable para evitar fugas de agua durante la prueba. En el interior de la tubería superior a la muestra de concreto, se encuentra una medida para conocer la cantidad de agua que ingresa al permeámetro.

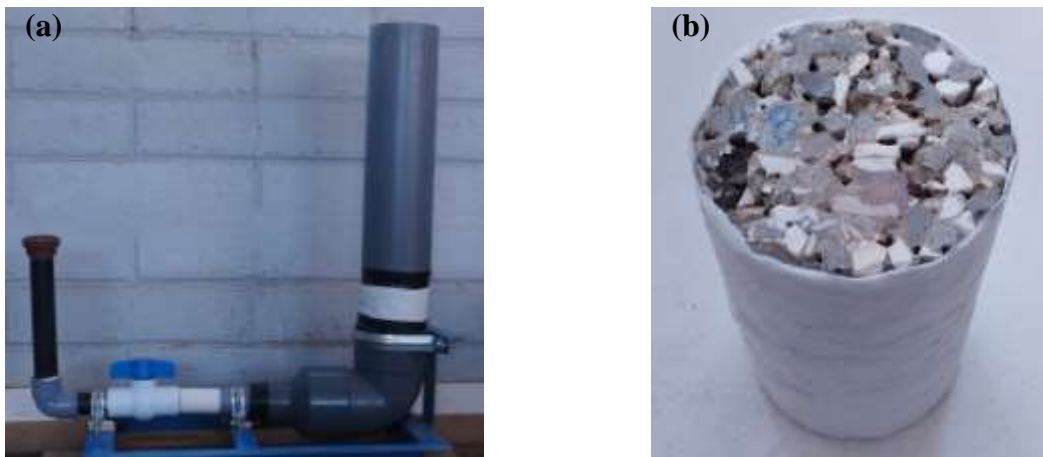


Fig. 4. (a) Permeámetro de cabeza descendente, (b) Probeta de concreto permeable envuelta en plástico y cinta adhesiva.

3. Propiedades mecánicas

Se realizó los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión de acuerdo a la norma ASTM C39 [43] y ASTM C78 [44] respectivamente. La resistencia a flexión se ensayó en muestras prismáticas de $15 \times 15 \times 50\text{cm}$ a la edad de 14 y 28 días de curado. Para la resistencia a compresión se ensayaron muestras cilíndricas $15 \times 30\text{cm}$, a edades de curado de 7, 14, 28, 56 y 90 días.

4. Resistencia a la abrasión

La resistencia a abrasión del concreto permeable se determinó mediante el ensayo Cántabro según la norma ASTM C1747 [45]. Se cortaron muestras cilíndricas de 10cmx10cm, consecuentemente se seleccionó y se tomó la masa de tres muestras por tipo de mezcla para colocarlas dentro de la máquina de abrasión los ángeles, retirando las bolas de acero. La máquina rotó durante 500 revoluciones a una velocidad de 30 a 33 r/min, después se extrajo la muestra y se pasó por un tamiz de 1 pulgada, anotando la masa del material retenido. Por último, se determinó la pérdida de masa mediante el porcentaje de reducción de masa inicial. En la Figura 5, se observa muestras de concreto permeable antes y después de someterlas al ensayo de abrasión.

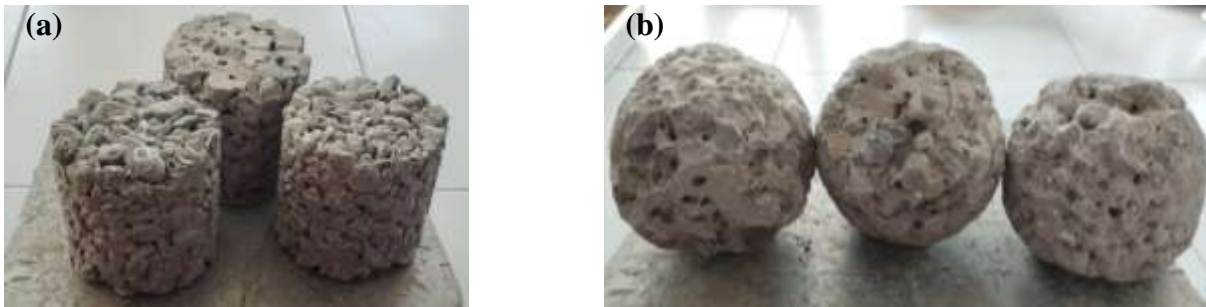


Fig. 5. Concreto permeable (a) antes y (b) después de someterlas al ensayo de abrasión.

5. Ciclos de congelación-descongelación

Para evaluar la durabilidad a ciclos de congelación y descongelación rápida del concreto, se hace uso de la norma ASTM C666 [46]; sin embargo, esta norma no abarca su aplicación en concreto permeable. Taheri et al [17] y Revilla et al [47], estimaron evaluar un ciclo de FT en 24 horas, mismo tiempo que se aplicó en esta investigación. Las muestras fueron extraídas del agua después de 28 días de curado, luego se sometieron a congelación a $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas, y las otras 12 horas se descongelaron

en agua a una temperatura de 10 a 30°C . Cada 10 ciclos se registró la pérdida de masa (la muestra se sacó del agua y se secó superficialmente, e inmediatamente se toma su masa). En la Figura 6, se observa los especímenes dentro de la congeladora.



Fig. 6. Muestras de concreto permeable dentro de la congeladora para ser sometidas a ciclos FT.

6. Microestructura

Para el análisis de la microestructura del concreto permeable, se utilizó el aparato de Microscopio Electrónico de Barrido Scios 2 LoVac (Figura 7a). Las muestras fueron extraídas de los especímenes de concreto que fueron sometidos a compresión, de donde se tomaron pequeñas muestras cúbicas de concreto con un tamaño de 10 mm por lado. Después, se recubrieron en oro (Figura 7b) para hacerlas conductoras de electricidad y mediante un haz de electrones apuntado sobre la muestra, se tomó la imagen por el fenómeno de electrones reflejados.

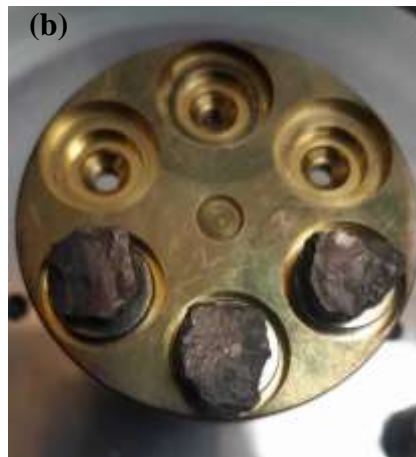


Fig. 7. (a) Microscopio electrónico de barrido - FIB – SEM Scios 2 LoVa, (b) muestras recubiertas en oro.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Porosidad, densidad y permeabilidad

La característica principal del concreto permeable es la presencia de poros interconectados en un rango de 15% a 35 % que permite el paso del agua a través de su estructura. Los resultados de porosidad se muestran en la Tabla 4. con valores del 21% al 29%, encontrándose dentro del rango estimado que fueron evaluadas después de los 28 días de curado. La mezcla CPF1 y CPF2 presentan una menor porosidad a comparación de la mezcla control, debido a la presencia de agregado fino (PW) que ocupa los espacios vacíos dentro de la matriz del concreto, creando una mezcla parcialmente densa y más compacta [48], disminuyendo el tamaño de los poros. Así mismo, en las mezclas CPG1 y CPG2 existe una disminución de porosidad de 3.89% y 4.04% respecto al CP; teniendo en cuenta que estas mezclas presentan las mismas gradaciones de agregado, con la única diferencia que las dos últimas contienen PW, la diferencia de porosidad debería de ser mínima. Y como menciona Ximenes et al [5] existe la tendencia de disminuir la porosidad de concreto permeable al aumentar el tiempo de vibración. En este caso, la variación de resultados se puede atribuir a la diferencia de fuerza aplicada durante la compactación del concreto en el moldeo de probetas; incrementándose la cantidad de material cementante y agregado, y reduciendo su porosidad. Como también al incremento de geles de CSH que se generan entre la pasta cementante y PW que posee propiedades puzolánicas.

Según diseño, por el bajo peso específico de PW y manteniendo todas las mezclas el mismo porcentaje de porosidad; la densidad del concreto debería ir descendiendo en el siguiente orden: CP, CPG1, con la menor densidad CPG2. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 4. CPG1 y CPG2 muestran una mayor densidad que el CP; contrastando un mayor empaquetamiento de concreto que disminuye su porosidad y aumenta su densidad. CPF1 y CPF2 presentan los mayores valores de densidad con 1850.7 kg/m³ y 1935.5 kg/m³ respectivamente, que es un 3.3% y 7.8% superior a CP. Nazeer et al [20] describe que a medida que aumenta la cantidad de agregado fino en el concreto permeable, la porosidad disminuye y por ende aumenta la densidad.

TABLA IV
POROSIDAD, DENSIDAD Y PERMEABILIDAD DE TODAS LAS MEZCLAS DE CONCRETO
PERMEABLE.

Tipo de mezcla	Porcelana (%)		Porosidad (%)	Densidad (kg/m ³)	Coeficiente de permeabilidad (cm/s)
	F	G			
CP	-	-	29.34 (±0.98)	1791.44	0.93 (±0.091)
CPG1	-	50%	28.20 (±0.31)	1797.60	0.73 (±0.012)
CPG2	-	100%	27.06 (±0.58)	1815.07	0.72 (±0.006)
CPF1	5%	-	25.21 (±1.17)	1850.67	0.61 (±0.007)
CPF2	10%	-	22.59 (±2.18)	1931.33	0.33 (±0.001)

Los resultados de densidad en el concreto permeable endurecido variaron entre 1790 y 1940 kg/m³, siendo menor a la densidad endurecida de un concreto convencional, que generalmente tiene un valor de 2400 kg/m³ [14]. Generalmente la densidad presenta una relación inversa con la porosidad; cuando mayor es la densidad, la porosidad del concreto se reduce [18], relacionándose directamente con la permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad a los 28 días de curado de las diferentes mezclas varia de 0.33 cm/s a 0.93 cm/s, como se muestra en la Tabla 4. Estos valores se encuentran dentro del parámetro recomendado por el ACI 522 R10 (0.135–1.21 cm/s). Por lo tanto, todas las mezclas son consideradas como concreto permeable y adecuadas para su uso como capa de drenaje para pavimentos permeables [49], [50].

Un estudio realizado por Yap et al [49], donde sustituyó el agregado grueso por agregados de concreto reciclado, encontró porcentajes de porosidad de 18% a 22% y una permeabilidad de 1.42 cm/s a 2.64 cm/s. En cambio, Cominato et al [10] en sus resultados de porosidad que oscilan entre 18% y 22%, obtuvo bajos valores de permeabilidad entre 0.49 cm/s y 0.27cm/s, debido a los poros no interconectados. De igual forma, en esta investigación se obtuvo altos valores de porosidad que se muestran en la Tabla 4, y coeficientes de permeabilidad muy bajos.

a mezcla control posee una máxima permeabilidad de 0.93 cm/s, en donde no se sustituyó ninguna gradación ni porcentaje de PW. Y como se puede observar en la Figura 8a, hay poros que se encuentran interconectados entre sí y con tamaños mayores a comparación de las demás muestras, como también una cantidad de poros muy pequeños que no generan conexión con otros poros. La Figura 8b y c, muestran una disminución gradual del tamaño de los poros y una menor

interconexión entre ellos a comparación del CP. En la Figura 8d, se observa poros de menor tamaño, generado por el 5% de agregado fino (PW) que sustituyó al agregado grueso y ocupó los espacios vacíos. En la muestra de la Figura 8e que contiene 10% de PW como agregado fino, se observa una gran disminución del tamaño y la cantidad de poros, ocasionado por la mayor densidad que se crea al unir PW y la pasta de cemento, creando una mejor unión entre los agregados que disminuye el tamaño de los poros y afecta a la permeabilidad. CPF2 presentó una permeabilidad de 0.33 cm/s, siendo el valor más bajo de todos. En todas las mezclas, por la presencia de poros pequeños o medianos que no se encuentran interconectados, hubo una gran reducción de permeabilidad a pesar del alto contenido de poros.

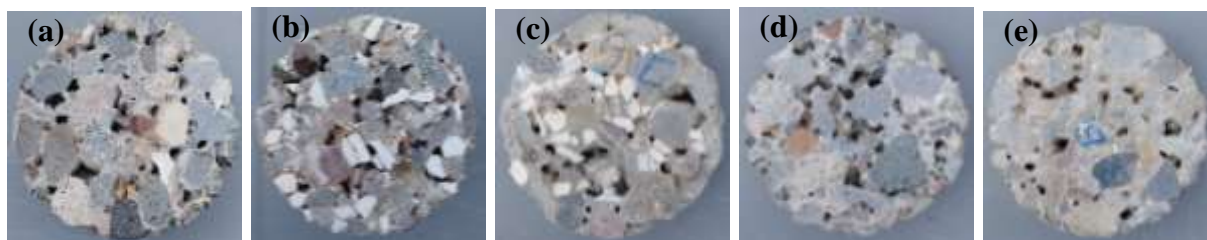


Fig. 8. Corte transversal de muestras de concreto permeable, a) CP, b) CPG1, c) CPG2, d) CPF1 y e) CPF2.

B. Resistencia a la compresión y flexión

Se muestra los resultados de resistencia a compresión de todas las mezclas en la Figura 9. En donde el concreto permeable con diferentes sustituciones de PW y a diferentes edades de curado, presentó una mayor resistencia que la mezcla control. A los 28 días de edad CP llega a 15.64 MPa de resistencia, mientras que CPG1, CPG2, CPF1 y CPF2 acrecenta su resistencia en 0.49%, 3.52%, 9.21% y 37.68% respectivamente en base a CP. De las dos sustituciones de PW en gradación G, CPG2 presenta los mayores resultados de resistencia, con un incremento de 24.9%, 12.4%, 3.5%, 7.1% y 1.7% a las edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días respectivamente, en relación a CP. De igual manera, la mezcla CPF2 que contiene 10% de PW con gradación F, presentó los resultados más altos de resistencia a compresión, llegando a una resistencia máxima de 25.81 MPa a la edad de 90 días de curado. Su diferencia de resistencia con respecto a CP fue de 61.3%, 49.7%, 37.7%, 35.9% y 32.8% a los 7, 14, 28, 56 y 90 días de curado. Esta amplia diferencia con la mezcla control se da por el uso de PW como agregado fino que aumenta los puntos de contacto entre los agregados [51], ya que la resistencia del concreto permeable depende de la cantidad y el tamaño

de los poros, que son reducidos al usar agregados más finos [14]. De tal manera que, la reducción de porosidad genera una mayor resistencia en el concreto permeable y viceversa, como se puede observar en la Figura 10.

En CPG1, CPG2, CPF1 y CPF2, se puede observar una mayor resistencia a compresión inicial, y un aumento significativo de resistencia con el aumento de PW a diferentes edades de curado. Atribuyendo esto a la reactividad puzolánica de la PW que ayuda en la producción de mayor cantidad de geles de CSH en el concreto y fortalece la ITZ, mejorando las propiedades mecánicas que conlleva al aumento de resistencia. Y la prolongación del tiempo de curado hasta los 90 días, favorece al desarrollo de resistencia a la compresión a causa de la hidratación continua del cemento, mejorando la unión entre la pasta y los agregados [19].

Según el Reglamento nacional de edificaciones CE 010 [52], el concreto en las veredas o aceras, pasajes peatonales y ciclovías deben cumplir con el requisito de tener una resistencia mayor o igual a 17.5 MPa. Esta condición se cumple en todas las mezclas, pero a diferentes edades de curado. CPF2 que presenta la mayor resistencia a compresión que todas las demás mezclas, a los 7 días de edad llega a 17.11 MPa y a los 14 días sobrepasa la resistencia mínima requerida con 19.90 MPa. CPF1 a los 28 días es el que más se acerca al valor mínimo de resistencia con 17.15 MPa. CPG1, CPG2 Y CPF1 a los 56 días de edad llegan a 17.80, 18.59 y 19.34 MPa respectivamente. Y recién a los 90 días de edad la mezcla control con agregado natural, sobrepasa los 17.5 MPa con 19.43 MPa. Así mismo, todas las mezclas están dentro de los parámetros de resistencia a la compresión del concreto permeable que recomienda el ACI 522 R10 (2.8-28 MPa) [23].

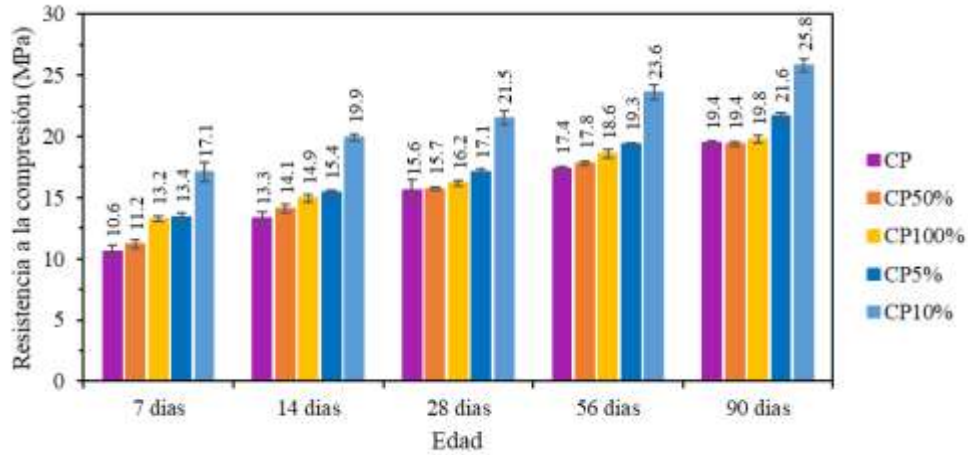


Fig. 9. Resistencia a la compresión a edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días de curado.

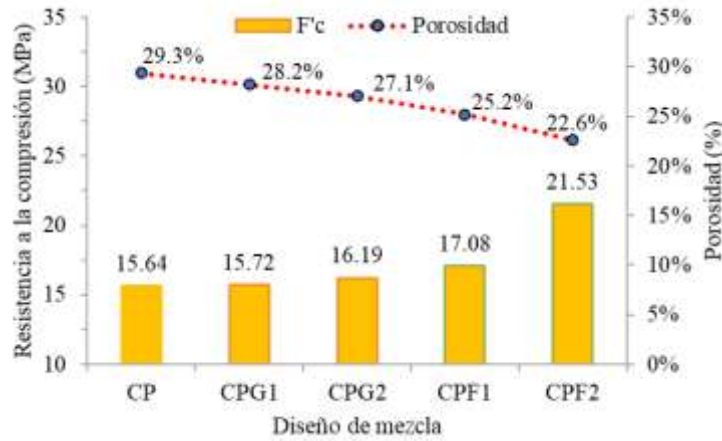


Fig. 10. Relación $f'c$ – porosidad a los 28 días de curado.

La Figura 11. muestra los resultados de resistencia a la flexión de todas las mezclas de concreto permeable ensayadas a la edad de 14 y 28 días de curado. con valores que oscilan entre 2.32 y 2.94 Mpa para el concreto con PW, y 2.04 MPa para la mezcla con agregado natural a los 28 días de edad. La mayor resistencia a la flexión se obtuvo en la mezcla CPF2 con 2.94MPa, seguida por CPG2 con 2.71 MPa. Ambas mezclas con diferentes gradaciones y porcentajes de PW lograron la mejor resistencia a flexión debido a la fuerte unión de ITZ, en CPG2 por la gran cantidad de PW que contiene puzolana y aporta en el aumento de gel CSH, y en CPF2 por la PW en gradación F que aumenta la densidad de la matriz de cemento y mejora la unión entre los agregados. Así mismo, se observa el aumento de resistencia a la flexión con el aumento de PW y a mayores edades.

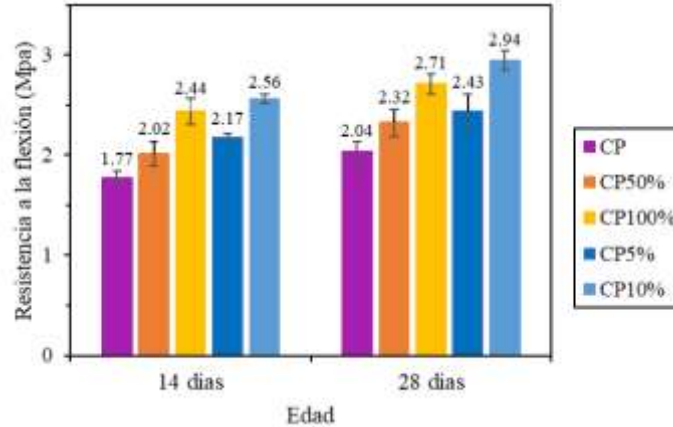


Fig. 11. Resistencia a la flexión a edades de 14 y 28 días.

C. Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión Cántabro del concreto permeable se evaluó mediante la pérdida de masa, como se puede observar en la Figura 12. Las mezclas CPF1 y CPF2 presentan baja pérdida de masa a comparación de la mezcla control, presentando una mejor resistencia a la abrasión. Esto se da por la presencia de agregado fino (PW), que aumenta el volumen de pasta de cemento, reduce los poros en la mezcla del concreto permeable y mejora la unión entre los agregados con la pasta de cemento. Y como señalan Kant Sahdeo et al [53] y Adamu et al [50], La resistencia a compresión del concreto permeable es directamente proporcional a su resistencia a la abrasión, e inversamente proporcional a su pérdida de masa.

Sin embargo, las mezclas CPG1 y CPG2 presentan un comportamiento distinto a las anteriores, mientras que la resistencia a compresión de CPG1 es de 15.58 MPa y CPG2 es de 16.19 MPa a los 28 días de curado, la pérdida de masa es de 45.34% y 48.05% respectivamente. Observándose una menor pérdida de masa en la mezcla que tiene menor resistencia a la compresión. Y aunque el CPG2 presenta una mayor resistencia a compresión que el CP, su pérdida de masa también es mayor. Esto podría darse por la característica físicas de PW, ya que no posee una buena resistencia al desgaste a comparación del agregado natural. De la misma forma, Sandoval & Perialisi [54] mencionan que en el ensayo Cántabro es evidente el pronunciado desgaste en materiales con diferentes características. Y es importante destacar que PW en tamaños de 2.36-4.75mm, presenta superficies rugosas y lisas. La pasta tiene una mejor adherencia a una

superficie rugosa, por el contrario, existe una unión más débil entre la pasta y una superficie lisa o redondeada del agregado [55].

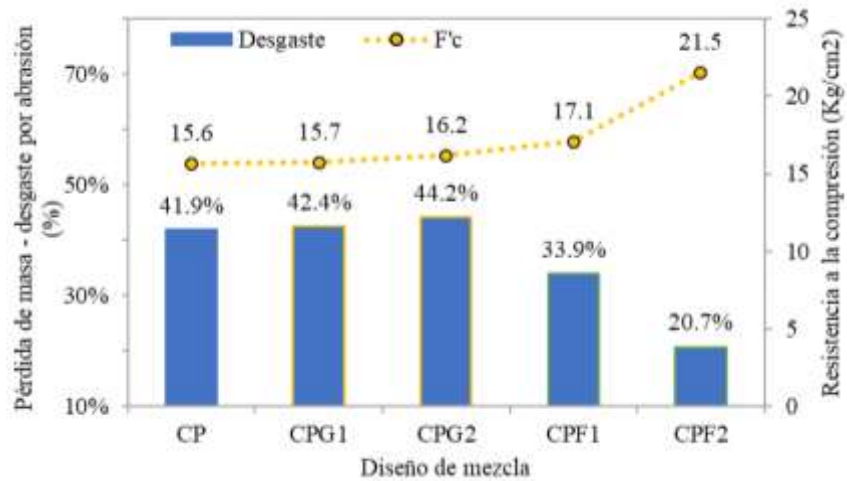


Fig. 12. Desgaste por abrasión e impacto del concreto permeable o pérdida de masa por Cántabro.

D. Durabilidad a ciclos de congelación-descongelación

La durabilidad del concreto permeable a ciclos de FT, se mide mediante la pérdida de masa con el aumento de ciclos, como se muestra en la Figura 13. Después de los 60 ciclos de FT no se observó algún daño aparente en la superficie de las muestras de concreto, lo que indica que los 60 ciclos FT no son significativos. La pérdida de masa fue aumentando a medida que las muestras se exponen a más ciclos de FT, y las muestras de concreto permeable con PW presentaron pérdidas de masa menores que CP. Después de los 60 ciclos de congelación-descongelación; CP, CPG1, CPG2, CPF1 Y CPF2 presentaron pérdidas de masa de 1.33%, 1.26%, 1.20%, 1.09% y 0.77% respectivamente. El uso de partículas finas en el concreto permeable mejoraron significativamente la resistencia al congelamiento-descongelamiento [22], tanto en la gradación F como en la G. El daño de FT es causado por la presión del agua dentro de los poros, que al congelarse aumenta su volumen aproximadamente un 9% creando una tensión de interna que provoca fisuras en las paredes internas del poro, que causa daños acumulativamente en la matriz del cemento [15], [56] y degrada sus propiedades mecánicas. Debido a la característica porosa de PW, esta se satura más fácilmente y es más débil que un agregado natural, por otro lado, su mayor permeabilidad ayuda a disipar la presión generada en los poros de la matriz cementante [57]. Así mismo, Siddique et al.

[58] menciona que en investigaciones anteriores de concreto realizado con artículos sanitarios de porcelana como agregado grueso, presento mejor resistencia ante los ciclos de FT, afirmando que el concreto con cerámico presenta bajo deterioro superficial y grietas más estrechas.

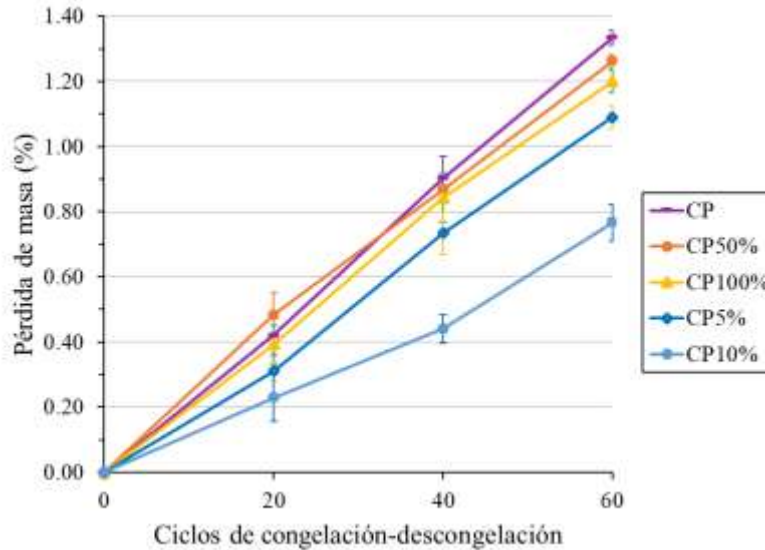


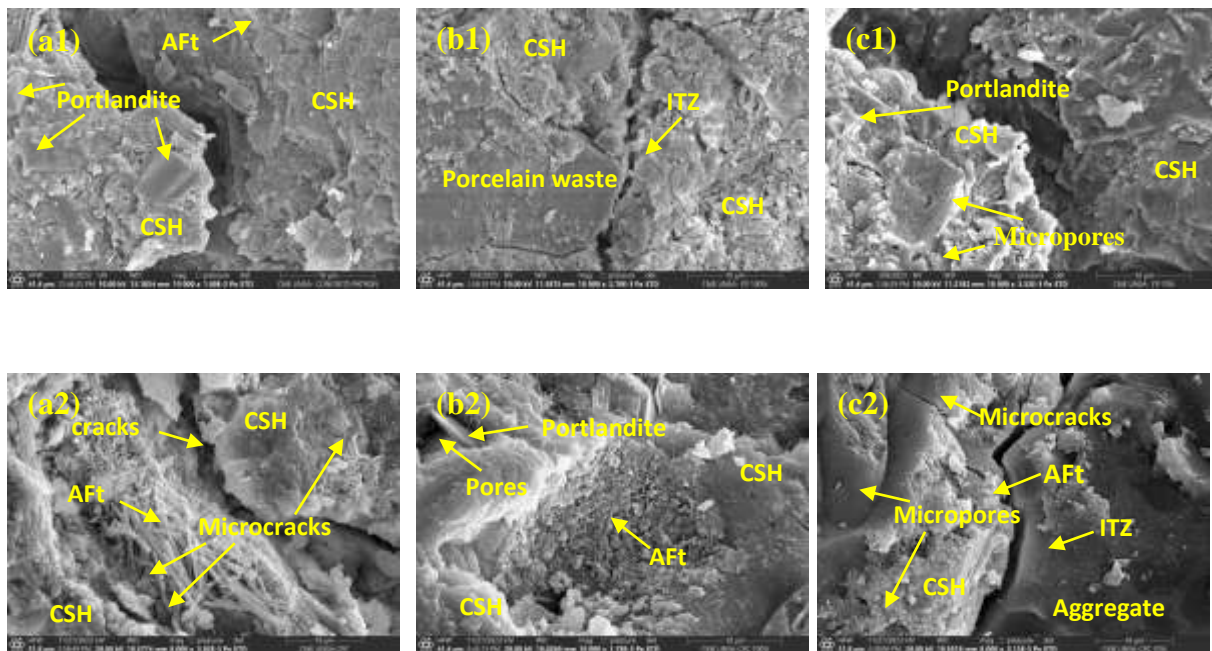
Fig. 13. Pérdida de masa del concreto permeable expuesto a ciclos de FT.

E. Microestructura

En Figura14, se observa figuras que reflejan la microestructura del hormigón permeable con porcelana que se exploró utilizando SEM posterior a los 28 días de curado (0 ciclos FT) y 60 ciclos de FT, las muestras seleccionadas cuentan con una superficie parcialmente plana y contienen una interfaz compuesta por cemento, PW y agregado.

En la mezcla CP de la Figura 14a1, se evidenciaron grietas, vacíos y una ZTI débil, con presencia de etringita (AFt) en forma de agujas que después del periodo de 28 días de hidratación del concreto este aún persiste en la microestructura [59], y se observa placas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ también conocido como portlandita y gel CSH. La mezcla CP después de someterla a ciclos FT (Figura 14a2), muestra una mayor cantidad de AFt expansiva en su fase II, que dentro de los diminutos poros del CSH generan presión y posteriormente induce a tensiones expansivas en la matriz, provocando la formación de grietas y deterioro en la estructura, lo que resulta en una disminución significativa de la resistencia mecánica [14][35], todo esto trae consigo a una ZTI de menor resistencia y bajo rendimiento mecánico.

En la Figura 14b1 del CPG2 se observa la existencia de microporos, y una microestructura parcialmente compacta que indica que en la superficie del agregado no hubo una cantidad adecuada de agua o pasta para completar la hidratación durante los primeros 28 días de curado [14]. Sin embargo, se detectó una mejora en la ITZ debido a la reacción de la portlandita con la puzolana contenida en PW, produciendo mayor gel CSH y una mejor densidad en la zona de transición interfacial. Al someterlo a ciclos de FT (Figura 14b2), se observa la presencia de AFt alrededor de los poros existente y pequeñas fisuras en la matriz de concreto. La mezcla CPF2 (Figura 14c1) tiene una microestructura más densa que cubren una extensión mayor compuesta por la pasta cementante y PW, mayor cantidad de geles de CSH y una mejor conexión en la ITZ. Con respecto a la mezcla CPF2 ante ciclos FT (Figura 14c2), se visualiza una cantidad reducida de microporos, grietas y AFt.; a comparación de CP. Deduciendo que la mayor cantidad de gel CSH que se produce por el comportamiento puzolánico de PW, aporta en la mejora de la resistencia a ciclos de FT en el concreto permeable.



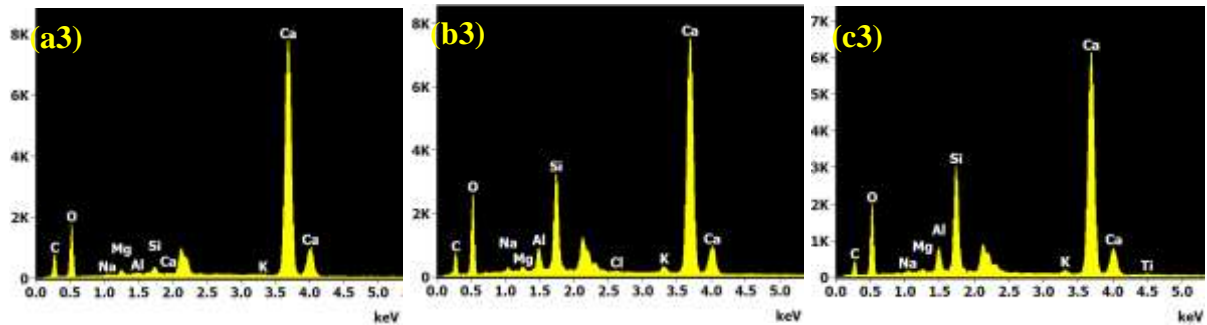


Fig. 14. Microestructura del concreto permeable. (a1) CP (28 días de curado), (b1) CPG2 (28 días de curado), (c1) CPF2 (28 días de curado), (a2) CP (60 ciclos FT), (b2) CPG2 (60 ciclos FT), (c2) CPF2 (60 ciclos FT), (a3) CP (Proporciones atómicas de elementos), (b3) CPG2 (Proporciones atómicas de elementos), (c3) CPF2 (Proporciones atómicas de elementos)

Por otra parte, con el análisis SEM se seleccionó un punto de la matriz cementante de la microestructura para determinar las proporciones atómicas de la variada composición elemental, tales como Sílice (Si), Aluminio (Al), Calcio (Ca), Oxígeno (O) y otros (Figura14a3, Figura 14b3 y Figura143c3), Con valores porcentuales atómicas en el orden de 0.67%, 0.11%, 21.05% y 59.26% para CP, 5.53%, 1.38%, 14.21% y 61.07% en CPG2, y 7.09%, 1.72%, 15.92% y 60.60% en CPF2. Observando que Ca presenta el pico más alto en las tres mezclas, y existe un crecimiento en los picos de Si y Al en CPG2 y CPF2. Por ende, una mayor proporción elemental de Si y Al sugiere la formación abundante de gel C-S-H logrando un desarrollo significativo en el desempeño mecánico y de durabilidad del concreto permeable [14].

IV. CONCLUSIONES

Este estudio analizo las propiedades de hidráulicas (porosidad, permeabilidad y densidad), propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y flexión), y durabilidad (abrasión y ciclos de congelación-descongelación) del concreto permeable que contiene PW como una alternativa de agregado. Validando el desempeño de PW y los resultados mediante el análisis de la microestructura del concreto. En base al resultado experimental y las discusiones, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La gradación F de PW creo mayor densidad en la matriz de cemento, mejorando la unión entre los agregados y reduciendo la porosidad del concreto en un 23.01% menor que la mezcla control (CP). PW conjuntamente con la pasta de cemento se alojó en los poros, lo que incrementa la densidad del concreto permeable. La gradación G redujo gradualmente la porosidad del concreto, disminuyendo la permeabilidad por la baja interconexión entre los poros y se generó un aumento mínimo en la densidad. La razón del echo se le atribuye al comportamiento puzolánico de PW, que incrementa el gel de CSH mejorando la ITZ pero obstruyendo la conexión entre los poros.
- La resistencia a compresión presenta una relación inversa con la porosidad. CPF1 y CPF2 al tener una baja porosidad presento un aumento de la resistencia a la compresión en un 9.21% y 37.68% respectivamente en función a la mezcla control. CPG1 tuvo una disminución poco significativa de la resistencia a la compresión a los 90 días de edad, con un 0.29% menor al CP. Sin embargo, todas las mezclas con PW dieron resultados favorables. Y los resultados de resistencia a la flexión fueron positivos en todas las mezclas, presentando CPF2 de la gradación F y CPG2 de la gradación G los resultados más altos, con 0.33% y 0.45% mayores a la mezcla control respectivamente.
- En el concreto permeable con gradación G de porcelana, se observó una baja resistencia a la abrasión, teniendo pérdidas de hasta 5.37% mayores a CP. Y a pesar que CPG2 obtuvo 1.72% mayor de resistencia a la compresión que CP, su desgaste fue mayor. Esto se dio por la característica física de la porcelana, ya que no tiene una dureza similar al agregado natural, lo cual afecta cuando el concreto permeable es sometido a cargas y fuerzas extremas.

- Pasando todo lo contrario cuando la porcelana se presenta en partículas más pequeñas, que mejoran significativamente la durabilidad del concreto permeable evaluados mediante la pérdida de masa. CPF1 y CPF2 mejoraron hasta en un 18.34% y 50.71% la resistencia a abrasión del concreto permeable a comparación de CP, y la resistencia a los ciclos de FT en un 18.43% y 42.58%. La pérdida de masa por los ciclos de FT fue mínima en todas las mezclas de concreto, siendo necesario evaluarlo a más ciclos de FT.
- Por los resultados obtenidos de las mezclas de porcelana, es factible considerar a los residuos de porcelana como material alternativo en la elaboración del concreto permeable. Ya que con gradaciones similares al agregado grueso se obtiene resultados parecidos a la mezcla control, y con gradaciones de agregado fino la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad son evidentes.

V. EXPRESIONES DE GRATITUD

Los autores agradecen a las personas involucradas por su dedicación en este trabajo.

Información de financiación: Los autores declaran que no hay financiación involucrada.

Contribución de los autores: Todos los autores han aceptado la responsabilidad por el contenido completo de este manuscrito y aprobaron su envío.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

VI. REFERENCIAS

- [1] S. Zhang, Z. Li, X. Ning, and L. Li, “Gauging the impacts of urbanization on CO2 emissions from the construction industry: Evidence from China,” *J Environ Manage*, vol. 288, p. 112440, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.112440.
- [2] A. S. Ruviaro, L. Silvestro, F. Pelisser, A. R. G. de Azevedo, P. R. de Matos, and A. L. G. Gastaldini, “Long-term effect of recycled aggregate on microstructure, mechanical properties, and CO2 sequestration of rendering mortars,” *Constr Build Mater*, vol. 321, p. 126357, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126357.
- [3] L. Gautam, J. Kumar Jain, A. Jain, and P. Kalla, “Valorization of bone-china ceramic powder waste along with granite waste in self-compacting concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 315, p. 125730, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125730.
- [4] M. Fan, B. Tang, X. Sun, X. He, and L. Yuan, “Experimental study on the water purification performance of carbonated recycled aggregate pervious concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 406, p. 133392, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133392.
- [5] J. Ximenes, C. Jesus, J. Aguiar, and J. Pais, “Mix design and physical and mechanical properties of pervious concretes,” *Materiales de Construccion*, vol. 72, no. 348, 2022, doi: 10.3989/mc.2022.292722.
- [6] R. Duan, G. Huang, X. Zhou, C. Lu, and C. Tian, “Record-Breaking heavy rainfall around Henan Province in 2021 and future projection of extreme conditions under climate change,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 625, p. 130102, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2023.130102.
- [7] O. Tamm, E. Saaremäe, K. Rahkema, J. Jaagus, and T. Tamm, “The intensification of short-duration rainfall extremes due to climate change – Need for a frequent update of intensity–duration–frequency curves,” *Clim Serv*, vol. 30, p. 100349, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.CLISER.2023.100349.
- [8] Y. Lu, Y. Zhou, and S. Zeng, “Understanding the link between industrial stimulation effect and environmental impact of sponge city: With a focus on the construction phase,” *J Clean Prod*, vol. 389, p. 136113, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.136113.
- [9] F. K. S. Chan *et al.*, “‘Sponge City’ in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context,” *Land use policy*, vol. 76, pp. 772–778, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.03.005.
- [10] V. Cominato, F. Benavente Canteras, L. Andréia Gachet, and R. Cristina Cecche Lintz, “The effect of granulometry of natural and recycled coarse aggregate on permeable concrete properties,” *Mater Today Proc*, vol. 65, pp. 1711–1718, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.04.717.
- [11] G. L. Vieira, J. Z. Schiavon, P. M. Borges, S. R. da Silva, and J. J. de Oliveira Andrade, “influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of

- pervious concrete mixtures,” *J Clean Prod*, vol. 271, p. 122665, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122665.
- [12] D. Tarangini, P. Sravana, and P. Srinivasa Rao, “Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete,” *Mater Today Proc*, vol. 51, pp. 2185–2189, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.11.132.
- [13] D. Zou, Z. Wang, M. Shen, T. Liu, and A. Zhou, “Improvement in freeze-thaw durability of recycled aggregate permeable concrete with silane modification,” *Constr Build Mater*, vol. 268, p. 121097, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121097.
- [14] M. Nazeer, K. Kapoor, and S. P. Singh, “Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials,” *Journal of Building Engineering*, vol. 69, p. 106275, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106275.
- [15] H. Song, J. Yao, and J. Xiang, “The role of aggregate and cement paste in the deterioration of the transitional interface zone of pervious concrete during freeze-thaw cycles,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, p. e01086, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.CSCM.2022.E01086.
- [16] W. Huang and H. Wang, “Multi-aspect engineering properties and sustainability impacts of geopolymer pervious concrete,” *Compos B Eng*, vol. 242, p. 110035, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2022.110035.
- [17] B. M. Taheri, A. M. Ramezani pour, S. Sabokpa, and M. Gapele, “Experimental evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete,” *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101617, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101617.
- [18] M. Adresi, A. Yamani, M. Karimaei Tabarestani, and H. Rooholamini, “A comprehensive review on pervious concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 407, p. 133308, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133308.
- [19] N. Jike *et al.*, “Pervious concrete with secondarily recycled low-quality brick-concrete demolition residue: Engineering performances, multi-scale/phase structure and sustainability,” *J Clean Prod*, vol. 341, p. 130929, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.130929.
- [20] M. Nazeer, K. Kapoor, and S. P. Singh, “Experimental investigation of clogging mechanism of pervious concrete made with variable aggregate gradations,” *Materiales de Construcción*, vol. 73, no. 351, p. e320, Aug. 2023, doi: 10.3989/mc.2023.319922.
- [21] J. Nilimaa, “Smart materials and technologies for sustainable concrete construction,” *Developments in the Built Environment*, vol. 15, p. 100177, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.DIBE.2023.100177.

- [22] H. Bilal, T. Chen, M. Ren, X. Gao, and A. Su, “Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 275, p. 122124, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122124.
- [23] ACI Committee 522, “Report on Pervious Concrete 522R-10,” *American Concrete Institute*, 2010.
- [24] O. AlShareedah and S. Nassiri, “Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review,” *J Clean Prod*, vol. 288, p. 125095, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125095.
- [25] S. Siddique, T. Gupta, A. A. Thakare, V. Gupta, and S. Chaudhary, “Acid resistance of fine bone china ceramic aggregate concrete,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 25, no. 7, pp. 1219–1232, 2021, doi: 10.1080/19648189.2019.1572543.
- [26] R. V. Meena, J. K. Jain, H. S. Chouhan, and A. S. Beniwal, “Use of waste ceramics to produce sustainable concrete: A review,” *Cleaner Materials*, vol. 4, p. 100085, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.CLEMA.2022.100085.
- [27] Mordor Intelligence, “Análisis del tamaño y la participación del mercado de vajilla de cerámica tendencias de crecimiento y pronósticos (2023-2028).” Accessed: Nov. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/ceramic-tableware-market>
- [28] M. A. P. Jordao and U. P. Dos Santos, “La industria cerámica brasileña,” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 40, no. 1, pp. 59–66, 2001.
- [29] S. Siddique, S. Shrivastava, S. Chaudhary, and T. Gupta, “Strength and impact resistance properties of concrete containing fine bone china ceramic aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 169, pp. 289–298, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.213.
- [30] L. Gautam, J. K. Jain, A. Jain, and P. Kalla, “Recycling of bone china ceramic waste as cement replacement to produce sustainable self-compacting concrete,” *Structures*, vol. 37, pp. 364–378, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2022.01.019.
- [31] F. Xu, X. Lin, and A. Zhou, “Effect of recycled ceramic aggregate on hydration heat and permeability of high performance concrete,” *Cem Concr Compos*, vol. 137, p. 104930, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.104930.
- [32] F. Xu, X. Lin, A. Zhou, and Q. feng Liu, “Effects of recycled ceramic aggregates on internal curing of high performance concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 322, p. 126484, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126484.
- [33] S. Ray, M. Haque, S. A. Soumic, A. F. Mita, M. M. Rahman, and B. B. Tanmoy, “Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102567, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102567.

- [34] Z. Keshavarz and D. Mostofinejad, "Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete," *Constr Build Mater*, vol. 195, pp. 218–230, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.033.
- [35] S. Siddique, S. Shrivastava, and S. Chaudhary, "Evaluating resistance of fine bone china ceramic aggregate concrete to sulphate attack," *Constr Build Mater*, vol. 186, pp. 826–832, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.138.
- [36] S. Siddique, S. Chaudhary, S. Shrivastava, and T. Gupta, "Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions," *J Clean Prod*, vol. 210, pp. 246–255, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.231.
- [37] L. Gautam, P. Kalla, J. K. Jain, R. Choudhary, and A. Jain, "Robustness of self-compacting concrete incorporating bone china ceramic waste powder along with granite cutting waste for sustainable development," *J Clean Prod*, vol. 367, p. 132969, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132969.
- [38] ASTM C33/C33M-23, "Standard Specification for Concrete Aggregates," *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2023.
- [39] S. Siddique, S. Shrivastava, and S. Chaudhary, "Durability properties of bone china ceramic fine aggregate concrete," *Constr Build Mater*, vol. 173, pp. 323–331, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.262.
- [40] L. Gautam, J. Kumar Jain, A. Jain, and P. Kalla, "Valorization of bone-china ceramic powder waste along with granite waste in self-compacting concrete," *Constr Build Mater*, vol. 315, p. 125730, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125730.
- [41] C192/C192M-19, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2020. doi: 10.1520/C0192_C0192M-19.
- [42] ASTM C1754/C1754M-12, "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete," *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2012. doi: 10.1520/C1754_C1754M-12.
- [43] ASTM C39/C39M-21, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C0039_C0039M-21.
- [44] ASTM C78/C78M-22, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," *ASTM International*. ASTM International, 2022.
- [45] ASTM C1747/C1747M-13, "Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion," *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2013. doi: 10.1520/C1747_C1747M-13.








- [46] ASTM C666/C666M-15, “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing,” *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2016. doi: 10.1520/C0666_C0666M-15.
- [47] V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, A. Santamaría, A. B. Espinosa, and V. Ortega-López, “Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate subjected to alternating-sign temperature variations: Thermal strain and damage,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01204, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CSCM.2022.E01204.
- [48] A. Singh, K. P. Biligiri, and P. V. Sampath, “Engineering properties and lifecycle impacts of Pervious All-Road All-weather Multilayered pavement,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 180, p. 106186, May 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106186.
- [49] S. P. Yap, P. Z. C. Chen, Y. Goh, H. A. Ibrahim, K. H. Mo, and C. W. Yuen, “Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates,” *J Clean Prod*, vol. 181, pp. 155–165, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.205.
- [50] M. Adamu, K. O. Ayeni, S. I. Haruna, Y. E. H. Ibrahim Mansour, and S. Haruna, “Durability performance of pervious concrete containing rice husk ash and calcium carbide: A response surface methodology approach,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00547, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CSCM.2021.E00547.
- [51] J. Yang *et al.*, “Research on pore-clogging behavior and mechanism in pervious concrete prepared with recycled aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 384, p. 131420, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131420.
- [52] RNE, “Norma CE. 010 Pavimentos Urbanos,” *Lima: ICG-Instituto de la Construcción y Gerencia*. Available from: https://cdnweb.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf, 2010.
- [53] S. Kant Sahdeo, G. D. Ransinchung, K. L. Rahul, and S. Debbarma, “Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures,” *Constr Build Mater*, vol. 255, p. 119260, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119260.
- [54] G. F. B. Sandoval and R. Pieralisi, “Sustainable aggregate impact on pervious concrete abrasion resistance,” *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101384, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101384.
- [55] C. Gaedicke, A. Marines, and F. Miankodila, “Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 68, pp. 701–708, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.001.
- [56] F. Wu, Q. Yu, and H. J. H. Brouwers, “Mechanical, absorptive and freeze–thaw properties of pervious concrete applying a bimodal aggregate packing model,” *Constr Build Mater*, vol. 333, p. 127445, May 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127445.

- [57] H. Zhao, Q. Geng, and X. Liu, "Influence of freeze–thaw cycles on mechanical properties of pervious concrete: From experimental studies to discrete element simulations," *Constr Build Mater*, vol. 409, p. 133988, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133988.
- [58] S. Siddique, S. Chaudhary, S. Shrivastava, and T. Gupta, "Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions," *J Clean Prod*, vol. 210, pp. 246–255, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.231.
- [59] L. E. R. Robles, "Evaluación de factores que afectan la aparición de etringita secundaria como simulación del envejecimiento de mezclas de concreto y su papel dentro de procesos de expansión y agrietamiento," in *10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2012.

ANEXOS

Anexo 1. Evidencia de sumisión de artículo

A manuscript number has been assigned to Analysis of the mechanical properties and durability of permeable concrete with porcelain used as fine aggregate

 Reviews on Advanced Materials Science <em@editorialmanager.com>      
Para: María Eugenia Chachaque Jimenez Lun 04/03/2024 047

You are being carbon copied ("cc:d") on an e-mail "To" "EDWIN PARILLO ESCARSENA" edwin.parillo@upeu.edu.pe
CC: "María Eugenia Chachaque Jimenez" maria.chachaque@upeu.edu.pe, "Kely Jessica Huisa Labra" kely.huisa@upeu.edu.pe

Dear EDWIN PARILLO ESCARSENA,

Your submission entitled "Analysis of the mechanical properties and durability of permeable concrete with porcelain used as fine aggregate" has been assigned the following manuscript number: RAMS-D-24-00032.

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to Editorial Manager as an author.
The URL is <https://www.editorialmanager.com/rams/>.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Juliusz Skoryna, Ph.D.
Managing Editor
Reviews on Advanced Materials Science

← Submissions Being Processed for Author

Page: 1 of 1 (1 total submissions)

Results per page 10

Action 	Manuscript Number 	Title 	Initial Date Submitted 	Status Date 	Current Status 
Action Links		Analysis of the mechanical properties and durability of permeable concrete with porcelain used as fine aggregate	Feb 29, 2024	Feb 29, 2024	Manuscript Submitted

Page: 1 of 1 (1 total submissions)

Results per page 10

Anexo 2. Copia de resolución de inscripción del perfil de proyecto, designación del comité dictaminador, y sustentación de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad.



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

RESOLUCIÓN N° 0269-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 13 de junio de 2023

VISTO:

El expediente de **María Eugenia Chachaque Jimenez**, identificado(a) con Código Universitario N° 201521892 y **Kely Jessica Huisa Labra**, identificado(a) con Código Universitario N° 201612328, 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 **María Eugenia Chachaque Jimenez** y **Kely Jessica Huisa Labra**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Análisis de las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto permeable con porcelana usado como agregado fino" 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 13 de junio 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 las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto permeable con porcelana usado como agregado fino**" 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. Ingrid Angela Villafuerte Lujano** y **Mg. Gerardo William Pari Quispe**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Dr. Santiago Ramírez López
SECRETARIO ACADÉMICO

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