



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería
con mención en Ingeniería Civil

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SECCIONES DE PAVIMENTO DE
HORMIGÓN POROSO CON RESIDUOS DE VIDRIO O CERÁMICA COMO
REEMPLAZO PARCIAL DE CEMENTO**



CARLA MARITZA FERRADA SEPÚLVEDA

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al grado académico de Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Civil

Profesor Guía
Mauricio Pradena

Mayo 2023
Concepción, Chile

© 2023 Carla Maritza Ferrada Sepúlveda

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al proyecto ANID PCI 2019/13269-4 “Sustainable and eco-efficient pervious concrete pavements for bikeways, sidewalks and parking lots for mitigating rainwater runoff and heat islands in urban areas” por permitir el financiamiento de la investigación.

Agradezco al profesor guía de esta investigación, Mauricio Pradena, por su apoyo en el desarrollo del trabajo.

Agradezco al Laboratorio de hormigones del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción por permitir el uso de sus instalaciones y a sus funcionarios por su ayuda.

Agradezco a Cristian Melipichún por su enorme disposición y ayuda para la molienda de residuos en la Planta Piloto de Metalurgia de la Universidad de Concepción.

Agradezco al Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción, especialmente al profesor Óscar Jerez por su gran disposición y apoyo en la investigación.

Agradezco al Centro de Espectroscopía y Microscopía de la universidad de Concepción y a su personal encargado por proveer a la investigación con imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Agradezco a René Irribarren por su gran disposición, ayuda y gestión para la realización del tramo de prueba.

RESUMEN

La expansión urbana se ha incrementado en los últimos años y se espera que continúe en ascenso. Esto genera cambios en el uso del suelo, creando más zonas pavimentadas que provocan una impermeabilización de la superficie, lo cual impacta el ciclo hidrológico debido a la disminución de la tasa de infiltración y aumento de la escorrentía superficial. Para mitigar estos efectos se han utilizado los pavimentos de hormigón poroso, que consiste en un hormigón con mínima presencia de árido fino que crea una red de vacíos interconectados en su estructura que permite el paso del agua.

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo y el cemento es uno de sus componentes principales. La producción de cemento es altamente contaminante, alcanzando entre un 8 a 9 % de las emisiones globales de CO₂ antropogénicas. Los hormigones con reemplazo parcial de cemento por materiales que tengan un menor impacto medioambiental son una alternativa más sustentable. Es por esto que en esta investigación se estudiaron mezclas de hormigón poroso con sustitución parcial de cemento por residuos de vidrio o cerámica para su utilización en pavimentos.

Se realizaron mezclas con 10% de reemplazo de cemento por cerámica y 10% y 20% de reemplazo de cemento por vidrio. Se midió la resistencia a la compresión, flexotracción, abrasión, permeabilidad, infiltración y microanálisis por SEM. Además, se construyó un espacio de estacionamiento con las mezclas que presentaron mejor desempeño. Los resultados demuestran que las mezclas con residuos aumentan la resistencia a la flexotracción, pero las mezclas con vidrio desarrollan su resistencia más lento. A los 28 días para un 10% de reemplazo de cemento por cerámica se obtuvieron 3.0 MPa y 2.6 MPa con compactación por apisonado y rodillo respectivamente y para un 20% de reemplazo de cemento por vidrio 3.1 MPa y 2.5 MPa con compactación por apisonado y rodillo respectivamente. Estos resultados exceden la resistencia mínima requerida en este estudio de 1.5 MPa para losas cortas. Por lo tanto, ambas mezclas son recomendadas para usar en pavimentos de estacionamiento.

ABSTRACT

Urban expansion has increased in recent years and is expected to continue to grow. This generates changes in land use, creating more paved areas that cause an impermeabilization of the surface, which impacts the hydrological cycle due to a decrease in the infiltration rate and an increase in surface runoff. To mitigate these effects, pervious concrete pavements have been used, which consists of concrete with minimal presence of fine aggregate that creates a network of interconnected voids in its structure that allows water to pass through.

Concrete is one of the most widely used building materials worldwide and cement is one of its main components. Cement production is highly polluting, contributing between 8 to 9 % of global anthropogenic CO₂ emissions. Concretes with partial replacement of cement by materials that have a lower environmental impact are a more sustainable alternative. For this reason, in this research, pervious concrete mixtures with partial replacement of cement by glass or ceramic waste were studied for use in pavements.

Mixes were made with 10% replacement of cement by ceramic and 10% and 20% replacement of cement by glass. Compressive strength, flexural strength, abrasion, permeability, infiltration and SEM microanalysis were measured. Additionally, a parking space was built with the best performing mixes. The results show that mixes with waste increase the flexural strength, but the mixes with glass develop their strength more slowly. At 28 days for 10% replacement of cement by ceramic were obtained 3.0 MPa and 2.6 MPa with rodding and roller compaction respectively and for 20% replacement of cement by glass 3.1 MPa and 2.5 MPa with rodding and roller compaction respectively. These results exceed the minimum strength required in the study of 1.5 MPa for short slabs. Therefore, both mixtures with waste are recommended for parking lot pavements.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Hipótesis	4
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo general	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.4	Metodología.....	5
1.5	Principales resultados y conclusiones	5
1.6	Organización de la tesis.....	6
CAPÍTULO 2	PAVIMENTOS DE HORMIGÓN POROSO MÁS SUSTENTABLES	
	7	
2.1	Introducción	7
2.2	Pavimentos de hormigón poroso.....	8
2.2.1	Caracterización.....	8
2.2.2	Constructabilidad	9
2.3.	Cemento en hormigones.....	11
2.3.1	Necesidad de reducir la cantidad de cemento	11
2.3.2	Reemplazo de cemento por residuos.....	11
2.3.3	Microestructura de la pasta de cemento	14
2.4	Conclusión	16
CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA.....	17
3.1	Introducción	17

3.2 Materiales	17
3.2.1 Agua	17
3.2.2 Cemento	18
3.2.3 Árido grueso.....	19
3.2.4 Árido fino.....	20
3.2.5 Residuos de cerámica.....	20
3.2.6 Residuos de vidrio.....	22
3.2.7 Probetas	24
3.2.8 Sección de pavimento	24
3.3 Experimentación	25
3.3.1 Dosificación del hormigón poroso.....	25
3.3.2 Preparación, compactación y curado de probetas	25
3.3.3 Diseño del rodillo compactador y tramo de pavimento	27
3.4 Ensayos	30
3.4.1 Resistencia a compresión	30
3.4.2 Resistencia a flexotracción.....	30
3.4.3 Resistencia a la abrasión	31
3.4.4 Permeabilidad.....	32
3.4.5 Infiltración.....	34
3.4.6 Microanálisis	36
3.5 Series experimentales.....	36
3.6 Conclusión	39

CAPÍTULO 4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
4.1	Introducción	40
4.2	Serie 1	41
4.2.1	Efecto de la cerámica como reemplazo de cemento	41
4.2.2	Efecto del vidrio como reemplazo de cemento	42
4.3	Serie 2	44
4.4	Serie 3	46
4.5.	Serie 4	49
4.6.	Serie 5	50
4.7.	Serie 6	51
4.8.	Serie 7	52
4.9	Conclusión	55
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	58
ANEXO 3.1	MÉTODO DE DOSIFICACIÓN	69
ANEXO 4.1	RESULTADOS POR PROBETA.....	72
ANEXO 4.2	IMÁGENES COMPLEMENTARIAS SEM	85
ANEXO 4.3	GRÁFICOS EDS ASOCIADOS A LA MINERALOGÍA	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Presiones de compactación de referencia.....	10
Tabla 2.2. Investigaciones donde han utilizado cerámica como reemplazo de cemento .	12
Tabla 2.3. Investigaciones donde han utilizado vidrio como reemplazo de cemento.....	13
Tabla 3.1 Caracterización Cemento Cbb	18
Tabla 3.2. Composición química del cemento, cerámica y vidrio	18
Tabla 3.3. Propiedades físicas del árido grueso	19
Tabla 3.4. Propiedades físicas del árido fino	20
Tabla 3.5. Dosificación	36
Tabla 3.6. Series experimentales.....	38
Tabla 3.7. Muestras realizadas en cada serie experimental	38
Tabla 4.1. Permeabilidad e infiltración de los puntos de medición en el tramo de pavimento.....	54
Tabla A.4.1 Densidad y resistencia a la compresión a los 7 días con compactación con pisón	72
Tabla A.4.2 Densidad y resistencia a la compresión a los 28 días con compactación con pisón	73
Tabla A.4.3 Densidad y resistencia a la compresión a los 90 días con compactación con pisón	74
Tabla A.4.4 Densidad y resistencia a la flexotracción a los 7 días con compactación con pisón	75
Tabla A.4.5 Densidad y resistencia a la flexotracción a los 28 días con compactación con pisón	76

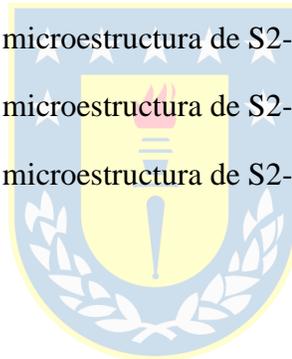
Tabla A.4.6 Densidad y resistencia a la flexotracción a los 90 días con compactación con pisón	77
Tabla A.4.7 Permeabilidad de probetas compactadas con pisón	78
Tabla A.4.8 Abrasión con método ASTM C1747	79
Tabla A.4.9 Abrasión con método Cantabro S3-1	80
Tabla A.4.10 Abrasión con método Cantabro S3-2	80
Tabla A.4.11 Abrasión con método Cantabro S3-3	81
Tabla A.4.12 Densidad y resistencia a la flexotracción en losetas compactadas con rodillo	81
Tabla A.4.13 Permeabilidad de losetas compactadas con rodillo	82
Tabla A.4.14 Infiltración de losetas compactadas con rodillo	82
Tabla A.4.15 Resistencia a la compresión de mezclas usadas en el tramo de pavimento a los 28 días.....	82
Tabla A.4.16 Permeabilidad del tramo de pavimento con NCAT	83
Tabla A.4.17 Infiltración del tramo de pavimento con anillo infiltrómetro.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Impacto de la urbanización en el ciclo hidrológico	1
Figura 2.1. Hormigón poroso	8
Figura 2.2. Sección típica de un pavimento de hormigón poroso.....	9
Figura 2.3. SEM de mezclas con residuos de cerámica (a) 0%, (b) 10%	15
Figura 2.4. SEM de mezclas con residuos de vidrio (a) 0%, (b) 30%	15
Figura 3.1. Distribución granulométrica de los áridos y cerámica fina	19
Figura 3.2. Molino de bolas utilizado en el proceso de trituración de residuos.....	21
Figura 3.3 Cerámica acondicionada. (a) Cerámica polvo, (b) Cerámica fina y (c) Vidrio	22
Figura 3.4. Botellas y envases de vidrio utilizados	24
Figura 3.5. Confección de vigas a partir de losetas.....	26
Figura 3.6. Rodillos compactadores. (a) rodillo de losetas y (b) rodillo tramo de pavimento.....	28
Figura 3.7. Plano del estacionamiento	29
Figura 3.8. Estacionamiento realizado con losas cortas. (a) Colocación de base y (b) losas realizadas.....	29
Figura 3.9. Probeta ensayada a resistencia a la compresión	30
Figura 3.10. Probeta ensayada a resistencia a la flexotracción	31
Figura 3.11. Permeabilidad en probetas. (a) Acondicionamiento de probetas y (b) Permeámetro de carga variable	33
Figura 3.12. Medición de permeabilidad con NCAT. (a) Permeabilidad en losetas y (b) Permeabilidad en tramo de pavimento.....	34

Figura 3.13. Medición de tasa de infiltración. (a) Infiltración en losetas y (b) Infiltración en tramo de pavimento	35
Figura 4.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con cerámica: (a) Resistencia a la compresión, (b) Resistencia a la flexotracción and (c) Permeabilidad ..	41
Figura 4.2. Propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con vidrio: (a) Resistencia a la compresión, (b) Resistencia a la flexotracción and (c) Permeabilidad ..	44
Figura 4.3. Imágenes SEM de la microestructura de S2-1: (a) Matriz cementicia y cristales de CH; (b) CSH y CH en la matriz cementicia	45
Figura 4.4. Imágenes SEM de la microestructura de S2-2: (a) Matriz cementicia (b) CSH en la matriz cementicia.....	45
Figura 4.5. Imágenes SEM de la microestructura de S2-3: (a) Matriz cementicia; (b) CSH y CH en la matriz cementicia	45
Figura 4.6. Resistencia a la abrasión. (a) EN 12697-17, (b) ASTM C1747 y (c) EN 12697-17 desde 0 a 300 Rev.	47
Figura 4.7. Efecto del Ensayo de Resistencia a la abrasión EN 12697-17. (a) Probeta original. (b) 50 Revoluciones. (c) 100 Revoluciones. (d) 150 Revoluciones. (e) 200 Revoluciones. (f) 250 Revoluciones. (g) 300 Revoluciones.....	48
Figura 4.8. Efecto del Ensayo de Resistencia a la abrasión según ASTM C1747	48
Figura 4.9. Resistencia a la flexotracción con diferentes métodos de compactación. (a) Compactación por apisonado y (b) Compactación con rodillo.....	49
Figura 4.10. Propiedades hidráulicas de las losetas (a) Permeabilidad con NCAT and (b) Tasa de infiltración.....	50
Figura 4.11. Resistencia a la compresión de las mezclas usadas en el tramo de pavimento a los 28 días.....	51
Figura 4.12. Propiedades hidráulicas del tramo de pavimento (a) Permeabilidad con NCAT y (b) Tasa de infiltración	52

Figura 4.13. Puntos de medición aleatorios en el tramo de pavimento	54
Figura A4.1. Imágenes SEM de la microestructura de S2-1: (a) Matriz cementicia con poros y cristales de CH; (b) Matriz cementicia con poros y cristales de CH.....	85
Figura A4.2. Imágenes SEM de la microestructura de S2-2: (a) Matriz cementicia y cristales de CH; (b) CSH en la matriz cementicia.....	85
Figura A4.3. Imágenes SEM de la microestructura de S2-3: (a) Matriz cementicia y cristales de CH; (b) CSH en la matriz cementicia.....	86
Figura A4.4. Imagen SEM de la microestructura de S2-1 y EDS asociado a CH	87
Figura A4.5. Imagen SEM de la microestructura de S2-1 y EDS asociado a CSH.....	88
Figura A4.6. Imagen SEM de la microestructura de S2-2 y EDS asociado a CH	89
Figura A4.7. Imagen SEM de la microestructura de S2-2 y EDS asociado a CSH.....	90
Figura A4.8. Imagen SEM de la microestructura de S2-3 y EDS asociado a CH	91
Figura A4.9. Imagen SEM de la microestructura de S2-3 y EDS asociado a CSH.....	92



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La expansión urbana ha incrementado considerablemente los últimos años y se espera que continúe en ascenso durante los próximos 30 años (Angel et al., 2011). El crecimiento urbano genera cambios en los usos de suelo, en el cual las superficies naturales son sustituidas progresivamente por edificaciones, zonas pavimentadas u otras superficies impermeables que impiden o reducen la infiltración, alterando el ciclo hidrológico y acrecentando los problemas relacionados con el drenaje y gestión de aguas pluviales (Trapote Jaume, 2016). El impacto que tiene la urbanización en el ciclo hidrológico es considerable, siendo la infiltración de agua lluvia en zonas naturales entre un 80 a 90 %, mientras que en zonas urbanas solo entre 0 a 10 % (Atlanta Regional Commission [ARC], 2016). Además, la escorrentía urbana genera problemas de contaminación, ya que contiene los mismos contaminantes que se encuentran en aguas residuales urbanas y metales pesados (Zafra et al., 2007).

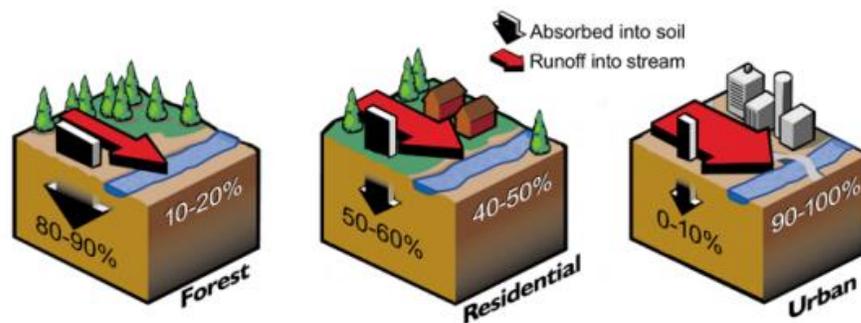


Figura 1.1. Impacto de la urbanización en el ciclo hidrológico

Fuente: ARC (2016)

Para contribuir a la solución de estos problemas, se ha utilizado como un tipo de pavimento permeable el hormigón poroso, el cual consiste en un hormigón con ausencia o mínima presencia de árido fino dentro de la mezcla, convirtiéndolo en un material con poros interconectados que permite que el agua pase a través de su estructura (American Concrete Institute [ACI], 2010). La construcción de pavimentos de hormigón poroso trae una serie de beneficios, ya que contribuye a la infiltración del suelo, recarga las napas subterráneas y disminuye la escorrentía superficial. Además, ayuda a reducir los efectos de la isla de calor en las zonas urbanas y reduce el hidroplaneo (Tennis et al., 2004).

El cemento es uno de los principales componentes del hormigón y la producción de este material genera efectos dañinos en el medio ambiente. La industria cementera emite a la atmósfera gases contaminantes y consume grandes cantidades de energía, alcanzando entre un 8 a 9 % de las emisiones globales de CO₂ antropogénicas (Monteiro et al., 2017) y emite SO_x y NO_x, los cuales causan lluvia ácida y smog (Potgieter, 2012). Además, la demanda de cemento se ha incrementado ampliamente en los últimos años, pasando de 1600 a 4050 millones de toneladas entre 2000 y 2018 (Curry, 2018; Van Oss, 2000) y se proyecta que aumenten a 5000 millones de toneladas en 2050 (Lehne y Preston, 2018). Por lo tanto, es importante disminuir la cantidad de cemento utilizada en las mezclas de hormigón y una de las alternativas es el reemplazo de cemento por materiales que tengan un menor impacto en el medio ambiente.

Incorporar materiales reciclados como reemplazo de cemento en hormigones es una alternativa beneficiosa tanto para disminuir la cantidad de cemento utilizada como para contribuir al manejo de residuos. Los residuos ocasionan problemas sanitarios y contaminación y han tenido un gran aumento en los últimos años. Además, al no separar los residuos para reciclaje o reutilización se genera una pérdida de valor tanto material como energética (Hernández y Corredor, 2016).

La incorporación de residuos como reemplazo de cemento en hormigones es un desafío, ya que su incorporación no debe generar efectos negativos en las mezclas y debe mantener la resistencia y durabilidad del material. En hormigones porosos esto es aún más difícil, ya que este tipo de hormigón presenta resistencias más bajas que un hormigón tradicional por su alto contenido de vacíos que le otorga alta permeabilidad. Dentro de los residuos que se han incorporado satisfactoriamente como reemplazo de cemento en mezclas de hormigón se encuentran la cerámica y el vidrio.

En hormigones porosos no se han encontrado investigaciones que reemplacen parcialmente el cemento por cerámica, pero si hay estudios favorables en hormigones tradicionales y morteros (Ay y Ünal, 2000; Bhargav y Kansal, 2020; Kannan et al., 2017; Mas et al., 2016; Samadi et al., 2015). En el caso del vidrio, se han encontrado escasas investigaciones en hormigones porosos (A. Y. Li et al., 2021; Pradeep et al., 2019; Talsania et al., 2015). Sin embargo, en hormigones tradicionales y morteros ha sido ampliamente estudiado con resultados favorables (Du y Tan, 2014; Nassar y Soroushian, 2012; Omran y Tagnit-Hamou, 2016; Vijayakumar et al., 2013). Por lo tanto, se espera que la incorporación de ambos materiales como reemplazo de cemento no genere efectos negativos en las mezclas y aumente la resistencia.

A pesar de que existen investigaciones que reemplazan cemento por residuos de cerámica y vidrio en hormigones, ninguna ha utilizado cemento puzolánico, el cual corresponde al que se utilizará en esta investigación. Además, es necesario investigar el efecto que tienen estos residuos en mezclas de hormigón poroso, ya que son mezclas diferentes a un hormigón tradicional, tanto en composición como colocación. En hormigones porosos no se ha evaluado la influencia que tiene la incorporación de residuos en la permeabilidad, lo cual es fundamental y lo que le entrega la característica propia a este tipo de pavimento. Por otro lado, las investigaciones realizadas solo se limitan a análisis en laboratorio, por lo que es considerable realizar estudios más adaptados al uso real, donde se apliquen las técnicas de colocación, compactación y curado adecuadas para este tipo de pavimento.

1.2 Hipótesis

Las secciones de pavimento de hormigón poroso con sustitución parcial de cemento por residuos tienen igual o mejor desempeño mecánico e hidráulico que los pavimentos de hormigón poroso tradicional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar experimentalmente mezclas de hormigón poroso con sustitución parcial de cemento por residuos de cerámica o vidrio para uso en pavimentos.



1.3.2 Objetivos específicos

- Optimizar mezclas de hormigón poroso con sustitución parcial de cemento por residuos de vidrio y cerámica.
- Diseñar un método de compactación aplicable a losetas de laboratorio y construcción de pavimentos de hormigón poroso.
- Comparar propiedades mecánicas e hidráulicas de una sección de pavimento con mezclas de hormigón poroso tradicional y hormigón poroso con residuos.

1.4 Metodología

La investigación consta de siete series, donde las primeras cinco se realizan en el laboratorio de hormigones y las dos últimas en terreno. La serie 1 corresponde a una optimización de mezclas con residuos, para la cual existe un avance en la Memoria de Título “Evaluación de mezclas de hormigones porosos con reemplazo parcial de cemento por residuos de vidrio o cerámica” (Ferrada, 2022), donde se obtuvieron los reemplazos de cemento adecuados según el tipo de residuo, en esta serie se eligen las mezclas con mejor desempeño para la utilización en series posteriores; la serie 2 demuestra los efectos obtenidos en las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con residuos a través del análisis microestructural realizado mediante SEM; la serie 3 evalúa el efecto de las mezclas con residuos en la resistencia a la abrasión, aplicando dos métodos diferentes de medición; la serie 4 compara el método de compactación por apisonado con el método de compactación con rodillo en las mezclas con residuos; la serie 5 evalúa la permeabilidad e infiltración en losetas de 30x56x15 cm compactadas con rodillo, la serie 6 analiza muestras de un tramo de pavimento realizado en condiciones de terreno y la serie 7 compara la permeabilidad e infiltración de las mezclas con residuos en un tramo de pavimento en condiciones de terreno.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Los resultados demuestran que tanto las mezclas con reemplazo de cemento por vidrio o cerámica incrementan la resistencia del hormigón poroso a compresión y flexotracción. Sin embargo, las mezclas con vidrio desarrollan la resistencia más lento que las otras. Se obtuvieron los mejores resultados para las mezclas con un 10 % y 20 % de reemplazo de cemento por cerámica y vidrio respectivamente, con una resistencia a la flexotracción a los 28 días de 3.0 MPa y 3.1 MPa respectivamente usando compactación por apisonado y 2.6 MPa y 2.5 MPa respectivamente usando compactación con rodillo.

La permeabilidad obtenida de las diferentes mezclas varía según el tipo de compactación y método de ensayo, donde se obtuvo en la mayoría de los casos una disminución en las mezclas que presentaban reemplazo de cemento por residuos. Para las mezclas con 10% y 20% de reemplazo de cemento por cerámica y vidrio se obtuvieron 0.35 y 0.51 cm/s con permeámetro de carga variable, 2.5 y 2.7 cm/s con permeámetro NCAT en losetas y 3.47 y 1.13 cm/s con permeámetro NCAT en tramo de prueba.

1.6 Organización de la tesis

El presente informe contiene 5 capítulos. El segundo capítulo contempla principalmente una selección bibliográfica donde se expone la caracterización del hormigón poroso para su uso como pavimento, principales aspectos de la construcción, problemática ambiental de la industria cementera e investigaciones relacionadas con la incorporación de residuos como cemento. El tercer capítulo abarca la metodología de trabajo, donde se exhiben los materiales, dosificación y ensayos realizados. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos en esta investigación para cada etapa junto con su análisis y el quinto capítulo entrega las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN POROSO MÁS SUSTENTABLES

2.1 Introducción

Los pavimentos permeables de hormigón son una buena alternativa para ayudar a mitigar los problemas asociados a escorrentías superficiales e inundaciones producto de un mal manejo de agua lluvia en las ciudades, ya que estos permiten el paso del agua a través de su estructura, aumentando la infiltración. El impacto en el ciclo hidrológico por la urbanización va en aumento, debido a que la expansión urbana ha crecido considerablemente en los últimos años y se espera que continúe en ascenso.

El hormigón poroso al igual que hormigones tradicionales está compuesto por gravilla, arena, cemento y agua. El cemento es uno de los componentes del hormigón que es más dañino para el medio ambiente, ya que su producción conlleva un gran gasto energético y contaminación. La incorporación de residuos como reemplazo de cemento es una excelente alternativa para apoyar la creación de un material más ecológico, además de contribuir a la reutilización y manejo de desechos.

En este capítulo se presenta la caracterización del hormigón poroso para su uso como pavimento, principales aspectos de la construcción, problemática ambiental de la industria cementera e investigaciones relacionadas con la incorporación de residuos como reemplazo parcial de cemento.

2.2 Pavimentos de hormigón poroso

2.2.1 Caracterización

Los pavimentos de hormigón poroso están compuestos por una mezcla de cemento, agua, árido grueso y ausencia o mínima presencia de árido fino, lo cual crea un material que permite el paso del agua a través de su estructura. Las principales diferencias con respecto a los pavimentos de hormigón tradicional son la proporción de los materiales que lo constituyen y el método de compactación. A diferencia de las mezclas de hormigón poroso, el hormigón tradicional incorpora una gran proporción de arena dentro de sus componentes, por lo que presentan una matriz más densa e impermeable. Además, los pavimentos de hormigón tradicional se compactan por vibración, mientras que los de hormigón poroso con rodillos. En la Figura 2.1 se observa una loseta de hormigón poroso drenando agua a través de su estructura.



Figura 2.1. Hormigón poroso

La estructura típica de un pavimento de hormigón poroso se presenta en la Figura 2.2, donde se coloca sobre la subrasante una subbase granular con contenido de vacíos entre 20 a 40% y sobre ella la capa de pavimento de hormigón poroso con contenido de vacíos entre 15 a 25% (Tennis et al., 2004). El hormigón poroso presenta poros interconectados que varían desde 2 a 8 mm y permeabilidad que puede variar entre 0.14 a 1.22 cm/s (ACI, 2010).

La resistencia del hormigón poroso es inferior a la de un hormigón tradicional, teniendo resistencia a la compresión entre 3.5 a 28 MPa y resistencia a la flexotracción entre 1.0 a 3.8 MPa. Debido a que este material presenta resistencias más bajas que un hormigón tradicional su uso está restringido, siendo aplicado principalmente a caminos de bajo tránsito, calles residenciales, ciclovías, aceras, estacionamientos, entre otros (Tennis et al., 2004).

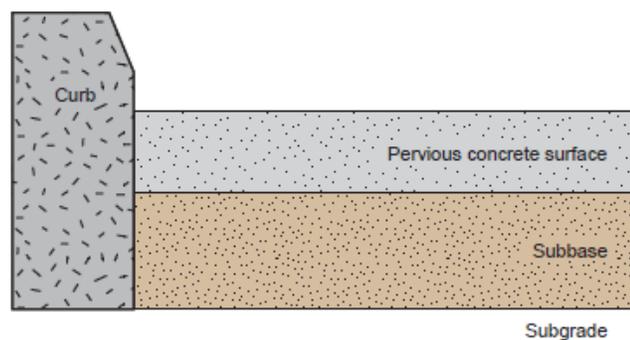


Figura 2.2. Sección típica de un pavimento de hormigón poroso

Fuente: Tennis et al. (2004).

2.2.2 Constructabilidad

La construcción de pavimentos de hormigón poroso es diferente a la construcción de pavimentos tradicionales, ya que conlleva requisitos especiales en la colocación, compactación, curado e inspección (Tennis et al., 2004) que permiten entregar las características propias de este tipo de pavimento. Para esto es necesario la existencia de procedimientos o estándares que detallen todas las etapas de diseño y construcción para que se cumplan los objetivos. No existe un estándar internacional que abarque todas las etapas de diseño y construcción de pavimentos porosos, pero si se han desarrollado en diferentes países. En EEUU existe el Reporte 522 del ACI (2010), el cual entrega lineamientos sobre diseño y construcción y en Chile existe la Cartilla de Especificaciones Técnicas Generales para Obras de Pavimentación en Hormigón Permeable (SERVIU Metropolitano, 2006).

Dentro de la construcción de pavimentos porosos uno de los aspectos más importantes es la compactación, ya que influye tanto en la resistencia y permeabilidad que tendrá el pavimento. La presión de compactación y diseño de rodillo no se encuentran estandarizados, por lo tanto, es difícil saber cuál es una presión adecuada para los pavimentos porosos de hormigón. Sin embargo, se han realizado varias investigaciones donde han aplicado compactación por rodillo y se tienen presiones de referencia, las cuales varían entre 0.06 a 0.08 MPa, tal como se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Presiones de compactación de referencia

Referencia	Presión (MPa)
Kevern <i>et al.</i> (2009)	0.060
SERVIU Metropolitano (2006)	0.069
Balbo <i>et al.</i> (2022)	0.070
Batezini (2013)	0.070
Castro <i>et al.</i> (2009)	0.080

Al igual que en los pavimentos de hormigón tradicional, en los pavimentos de hormigón poroso se generan juntas para prevenir el agrietamiento aleatorio, el espaciamiento recomendado es 6 metros, lo cual es más largo de lo usual debido a que tiende a agrietarse menos. Incluso en algunos pavimentos de hormigón poroso no se realizan juntas ya que no se considera un defecto estético ni afecta su desempeño estructural (Tennis *et al.*, 2004). Las juntas pueden ser formadas en el hormigón fresco con un dispositivo “cortador de pizza” o cortadas con sierra en el hormigón endurecido (Schaefer y Kevern, 2013). Otra técnica que es adecuada para secciones pequeñas es clavar con un martillo una regla de acero a la profundidad requerida (Tennis *et al.*, 2004).

2.3. Cemento en hormigones

2.3.1 Necesidad de reducir la cantidad de cemento

Los hormigones y morteros dentro de sus componentes incluyen al cemento, el cual es un material esencial en las mezclas, ya que al reaccionar con agua tiene la capacidad de endurecerse y unir los áridos mediante un proceso de fraguado. A pesar de que este material es fundamental dentro de las mezclas, es necesario disminuir su cantidad debido a lo contaminante que es su producción y las altas cantidades que son producidas. La industria cementera emite a la atmósfera gases contaminantes y consume grandes cantidades de energía, alcanzando entre un 8 a 9 % de las emisiones globales de CO₂ antropogénicas y entre un 2 a 3 % de la energía utilizada (Monteiro et al., 2017). Sin embargo, el dióxido de carbono no es el único gas emitido que es perjudicial para el medio ambiente, también se emite SO_x y NO_x, los cuales causan lluvia ácida y smog y que por lo tanto pueden tener un efecto muy negativo en la salud de poblaciones aledañas a las industrias cementeras (Potgieter, 2012).

La demanda de cemento se ha incrementado ampliamente en los últimos años, pasando de 1600 a 4050 millones de toneladas entre 2000 y 2018 (Curry, 2018; Van Oss, 2000) y se proyecta que aumenten a 5000 millones de toneladas en 2050 (Lehne y Preston, 2018). Conjuntamente, en Chile se evidencia un déficit en la capacidad de producción debido a la alta demanda que existe. En 2016 el consumo de cemento fue de 4.95 millones de toneladas, mientras que 4.31 millones de toneladas fueron producidas (FICEM, 2020).

2.3.2 Reemplazo de cemento por residuos

Una alternativa para disminuir la cantidad de cemento en las mezclas de hormigón es sustituirlo por materiales que generen reacciones químicas adecuadas y no presenten efectos negativos en las mezclas. Además, es necesario que tengan disponibilidad y que no se consuman grandes cantidades de energía para su utilización. Los residuos son una

buena alternativa para reemplazar el cemento, ya que corresponden a materiales que no están destinados a otro uso y por otro lado se contribuye en el manejo y reutilización de desechos, generando un doble impacto medioambiental positivo.

Los residuos de cerámica y residuos de vidrio son una buena alternativa para sustituir el cemento debido a su composición química. En el caso de la cerámica no se han realizado investigaciones aplicadas a hormigones porosos, pero si a hormigones tradicionales y morteros, en el caso del vidrio las investigaciones asociadas a mezclas de hormigón poroso son muy limitadas. En la tabla 2.2 y 2.3 se presentan investigaciones donde se ha reemplazado el cemento por cerámica y vidrio respectivamente.

Tabla 2.2. Investigaciones donde han utilizado cerámica como reemplazo de cemento

Referencia	Tipo de mezcla	Reemplazos utilizados	Reemplazo óptimo	Tipo de cemento
Bhargav y Kansal (2020)	Hormigón	0, 5, 10, 15 y 20%	15%	Portland puzolánico
Dieb y Kanaan (2018)	Hormigón	0, 10, 20, 30 y 40%	20%	Portland
Samadi et al. (2015)	Mortero	0, 20, 40 y 60%	40%	Portland
Viera y Chicaiza (2018)	Mortero	0, 3, 5, 7, 10 y 15%	10%	Portland
Li et al. (2020)	Mortero	0, 10, 20, 30 y 40%	30%	Portland
Kannan et al. (2017)	Hormigón	0, 20 y 40%	0%	Portland

En la Tabla 2.2 se observan investigaciones que obtuvieron incrementos en la resistencia con porcentajes de sustitución de cemento por cerámica entre 10 a 40%. Sin embargo, también hay investigaciones donde la resistencia decrece al reemplazar cemento por cerámica. Además, se ha demostrado que el reemplazo de cemento por cerámica presenta resistencias más bajas a edades tempranas, pero se incrementa a edades tardías. Mas *et al.* (2016) realizaron morteros con sustitución de cemento Portland entre 15-50 % por residuos de baldosas cerámicas y obtuvieron que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución disminuye la resistencia a la compresión, siendo más evidente a edades tempranas (3 y 7 días) y siendo más cercano al patrón a edades superiores a 90 días.

Para contrarrestar las bajas resistencias que presentan estas mezclas a edades tempranas, una alternativa es reemplazar cerámica por árido fino, lo cual ha demostrado incrementar la resistencia a la compresión y flexotracción a los 7 días (Díaz, 2022; Meena et al., 2022).

Tabla 2.3. Investigaciones donde han utilizado vidrio como reemplazo de cemento

Referencia	Tipo de mezcla	Reemplazos utilizados	Reemplazo óptimo	Tipo de cemento
Talsania et al. (2015)	Hormigón poroso	0, 10 y 20%	20%	Portland
Pradeep et al. (2019)	Hormigón poroso	0, 10 y 20%	20%	Portland
Vijayakumar et al. (2013)	Hormigón	0, 10, 20, 30 y 40%	40%	Portland
Kumar et al. (2014)	Hormigón	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40%	20%	Portland
Khatib et al. (2012)	Hormigón	0, 10, 20, 30 y 40%	10%	Portland

En la Tabla 2.3 se observan investigaciones que obtuvieron incrementos en la resistencia con porcentajes de sustitución de cemento por vidrio entre 10 a 40%. Además, se evidenció en algunas investigaciones el desarrollo de la resistencia tardía que presentan las mezclas con reemplazo de cemento por vidrio. Islam et al. (2017) observaron que a edades tempranas las mezclas con reemplazo parcial de cemento por vidrio presentan menor resistencia a la compresión que la mezcla patrón, sin embargo, luego de los 90 días las mezclas con reemplazos entre 5-20 % superan levemente la resistencia a la compresión de la mezcla patrón. Esto concuerda con lo obtenido por Omran y Tagnit-Hamou, (2016) donde se observa el efecto de las reacciones puzolánicas tardías, las cuales ocurren mayormente entre los 28 y 91 días, generándose un mayor incremento en la resistencia a la compresión entre esas edades.

2.3.3 Microestructura de la pasta de cemento

La microestructura de la pasta de cemento permite comprender el desempeño que presenta una mezcla de hormigón a nivel macro y sus características influyen directamente en la permeabilidad y resistencia que tendrá la mezcla. La microestructura de los materiales se puede estudiar por varios métodos, siendo la microscopía electrónica de barrido (SEM) muy utilizada, donde se puede identificar en imágenes de alta resolución y magnificación los productos de hidratación, porosidad, tamaños de partícula, entre otros.

La microestructura de la pasta de cemento presenta heterogeneidades, especialmente por la existencia de grandes poros y productos de gran cristalinidad en la zona de transición, esta condición se puede reducir en gran medida mediante la incorporación de partículas muy finas de materiales puzolánicos (Malhotra y Mehta, 1996). Hay varios materiales puzolánicos que son residuos industriales, como las cenizas volantes, sílice geotérmica, escoria granulada de alto horno y humo de sílice, materiales puzolánicos que son residuos municipales como los envases de vidrio y residuos de construcción como las cerámicas.

Se ha demostrado que las pastas de cemento que contienen cenizas volantes, sílice geotérmica, escoria granulada de alto horno y humo de sílice generan silicato de calcio hidratado (CSH) adicional, lo cual crea una matriz más densa que exhibe menos porosidad con respecto a una pasta con cemento tradicional (Gómez-Zamorano et al., 2015; Malhotra, 1976; Ornelas et al., 2015). Lo mismo ocurre al incorporar residuos de vidrio y cerámica en la pasta de cemento, ya que se ha demostrado que se genera una mayor cantidad de CSH por las reacciones puzolánicas, creando una matriz más densa que una pasta de cemento tradicional (Dos Santos Barreto et al., 2021; El-Kattan et al., 2020; Gautam et al., 2022; Jawad et al., 2020; Jiang et al., 2022; Khmiri et al., 2013; L. G. Li et al., 2019; Q. Li et al., 2022; Lim et al., 2018).

Las Figuras 2.3 y 2.4 muestran imágenes SEM de mezclas con residuos de cerámica y vidrio respectivamente.

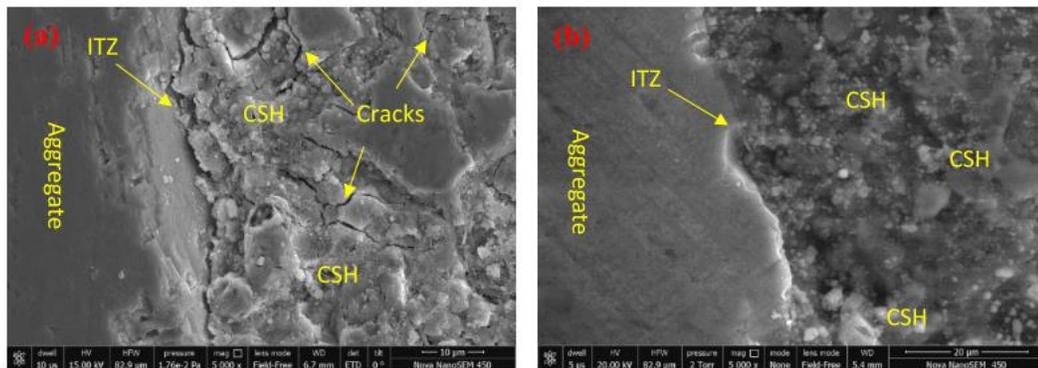


Figura 2.3. SEM de mezclas con residuos de cerámica (a) 0%, (b) 10%

Fuente: Gautam et al. (2022)

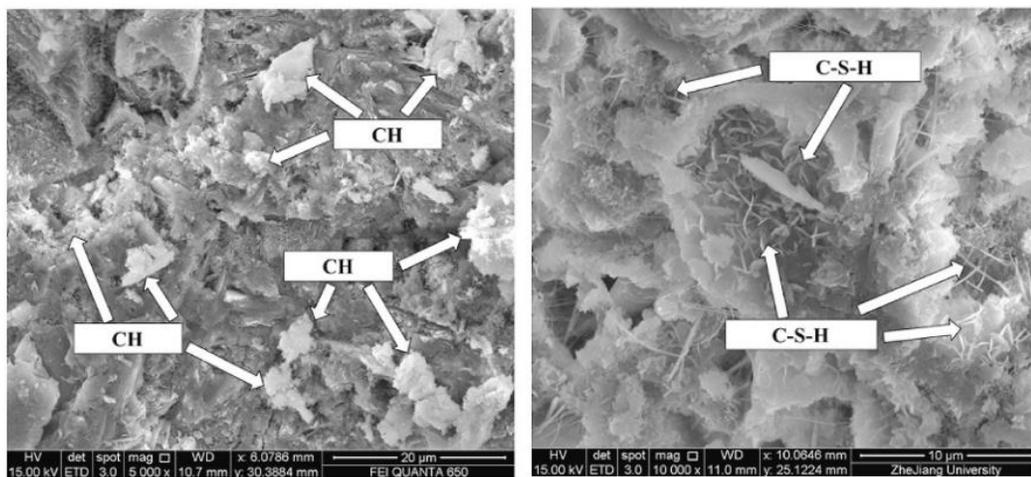


Figura 2.4. SEM de mezclas con residuos de vidrio (a) 0%, (b) 30%

Fuente: Jiang et al. (2022)

En la Figura 2.3 se observa como la incorporación de un 10% de cerámica en la pasta de cemento elimina el agrietamiento, generando una mezcla más densa y con mayor cantidad de CSH. La incorporación de vidrio genera efectos similares a la incorporación de cerámica, tal como se observa en la Figura 2.4 la incorporación de un 30% de vidrio en la pasta de cemento genera una matriz más densa y con mayor cantidad de CSH.

2.4 Conclusión

El cemento es fundamental dentro de las mezclas de hormigón. Sin embargo, se ha demostrado el alto impacto medioambiental que genera la producción de este material debido a la gran cantidad de emisiones que produce y el alto consumo de energía, por lo que es una necesidad disminuir la cantidad de cemento que se utiliza en hormigones. Existen varias investigaciones que reemplazan cemento por residuos, destacando el uso de residuos de vidrio y cerámica por sus características puzolánicas.

La mayoría de las investigaciones solo han sido aplicadas a morteros y hormigones tradicionales, por lo que es fundamental aplicarlas a hormigones porosos, ya que son diferentes a las mezclas de hormigón tradicional tanto en composición como en colocación y no se asegura que los resultados sean similares. Además, ninguna investigación ha utilizado cemento puzolánico, por lo tanto, los resultados pueden ser distintos a lo esperado debido a la gran cantidad de residuos que se incorporarían a las mezclas, ya que el cemento puzolánico contiene entre un 30 a 50 % de cenizas volantes que corresponden a residuos de las centrales termoeléctricas a carbón.

A partir de la revisión del estado del arte se demuestran que el reemplazo de cemento por residuos de vidrio y cerámica pueden incrementar las propiedades mecánicas y que debido a su composición actúan como materiales puzolánicos. Los porcentajes más utilizados son 10 y 20% para ambos residuos. Además, lo expuesto anteriormente se ha demostrado a partir de la microestructura de la pasta de cemento, ya que con la incorporación de residuos de vidrio y cerámica se genera mayor cantidad de CSH y una matriz más densa.

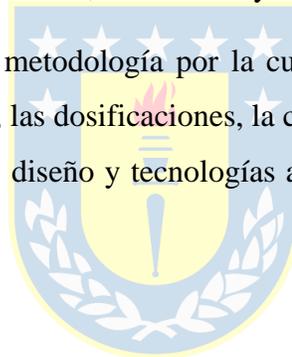
En general, las investigaciones enfocadas en el diseño de mezclas solo se limitan a desarrollar estudio en laboratorio que no se realiza con las técnicas constructivas apropiadas para el hormigón poroso, por lo que es fundamental analizar cómo funciona la mezcla desarrollada aplicando compactación adecuada y expuesto a condiciones de terreno.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Los pavimentos de hormigón poroso tienen que cumplir con cierta resistencia a la flexotracción y permeabilidad de acuerdo al uso que tendrá, es por esto que es indispensable estudiar la influencia que tiene la incorporación de residuos de vidrio y cerámica como reemplazo parcial de cemento con respecto al hormigón poroso tradicional tanto en propiedades mecánicas como hidráulicas, con el fin de decidir si es posible su utilización para la construcción de pavimentos. Los ensayos para las mezclas con y sin residuos corresponden a la resistencia a la compresión, resistencia a la flexotracción, resistencia a la abrasión, permeabilidad, infiltración y microestructura mediante SEM.

En este capítulo se presenta la metodología por la cual se rige esta investigación, los materiales que fueron utilizados, las dosificaciones, la confección de probetas, definición y especificación de los ensayos, diseño y tecnologías aplicadas en la construcción y las conclusiones alcanzadas.



3.2 Materiales

3.2.1 Agua

El agua utilizada en las mezclas de hormigón poroso es la proveniente de la red pública proporcionada por la empresa Essbio, la cual cumple con la normativa vigente para uso en hormigones según la NCh 1498.

3.2.2 Cemento

El cemento utilizado corresponde a cemento Cbb Especial, el cual es un cemento obtenido por molienda conjunta de Clinker, puzolana y yeso. Cumple los requerimientos de la NCh 148 y se clasifica según su composición y resistencia como cemento clase Puzolánico, grado corriente. Sus propiedades y composición química se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1 Caracterización Cemento Cbb

Propiedades		Valor
Peso específico (g/cm ³)		2,8
Expansión en autoclave (%)		0,1
Fraguado inicial (h:m)		2:40
Fraguado final (h:m)		3:40
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	7 días	320
	28 días	410

Tabla 3.2. Composición química del cemento, cerámica y vidrio

Materiales	Cemento (%)	Cerámica (%)	Vidrio (%)
CaO	47,09	1,17	12,43
SiO ₂	29,64	57,68	69,14
Al ₂ O ₃	10,42	21,95	2,15
SO ₃	3,51	0,11	0,06
Fe ₂ O ₃	3,33	9,82	0,52
MgO	2,98	2,03	0,41
K ₂ O	0,99	3,86	0,85
TiO ₂	0,84	1,09	0,11
Na ₂ O	0,51	1,22	14,05
P ₂ O ₅	0,13	0,17	0,03
Otros	0,56	0,91	0,24

3.2.3 Árido grueso

Los áridos gruesos utilizados corresponden a gravilla 3/8” adquirida en la empresa Áridos HH en Concepción, cuyo proveedor es la empresa Áridos Livio Maggi que obtiene los áridos en la ribera del río Ñuble. En la Tabla 3.3 se presentan las propiedades físicas de los áridos y en la Figura 3.1 la distribución granulométrica.

Tabla 3.3. Propiedades físicas del árido grueso

Propiedades físicas	Valor
Densidad real árido saturado superficialmente seco (kg/m ³)	2683
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2643
Densidad neta (kg/m ³)	2752
Absorción de agua (%)	1,49

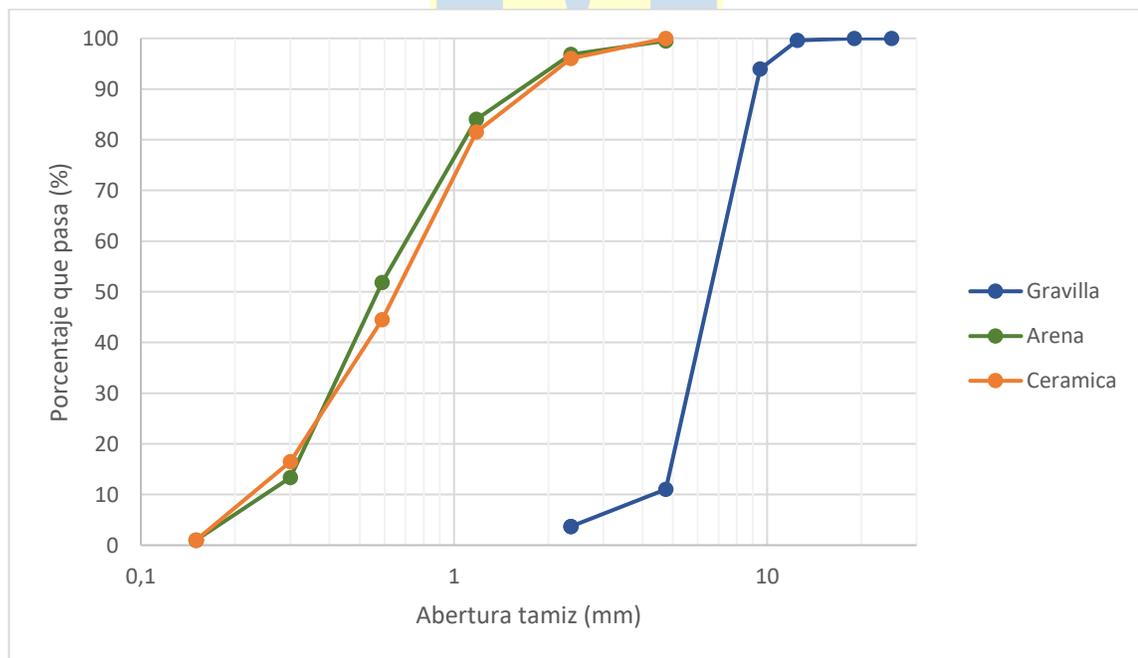


Figura 3.1. Distribución granulométrica de los áridos y cerámica fina

3.2.4 Árido fino

La arena utilizada corresponde a arena Bío Bío, adquirida en la empresa Áridos HH en Concepción. En la Tabla 3.4 se presentan las propiedades físicas y en la Figura 3.1 la distribución granulométrica.

Tabla 3.4. Propiedades físicas del árido fino

Propiedades físicas	Valor
Densidad real del árido saturado superficialmente seco (kg/m^3)	2729
Densidad real (kg/m^3)	2682
Densidad neta (kg/m^3)	2814
Absorción de agua (%)	1.75
Partículas finas menores a 0.080 mm (%)	0.59

3.2.5 Residuos de cerámica

La cerámica utilizada corresponde a baldosa cerámica para piso o pared color blanco, prensada en seco, esmaltada y con una absorción de agua de 7,5 %. Las materias primas que la componen son arcillas, caolín, feldespato, alúmina, pigmentos cerámicos, compuestos vitrificables, bentonita, bióxido de silicio, dolomita, fritas cerámicas, silicato de zirconio y aditivos. Las baldosas cerámicas se encontraban limpias y secas, por lo que no fue necesario tratarlas en ese aspecto.

El tamaño de partícula de la cerámica para ser incorporada como reemplazo de cemento en las mezclas de hormigón es muy importante, ya que interviene en la actividad puzolánica que tendrá, siendo 90 μm el tamaño máximo considerado apropiado (Ay y Ünal, 2000). También se ha utilizado un tamaño máximo de partícula de 75 μm (Chicaiza y Guerra, 2017; Pereira-De-Oliveira et al., 2012) y 40 μm (Mas et al., 2016; Samadi et al., 2015) con resultados favorables.

En esta investigación se tomó como referencia la Norma ASTM C618 referente a diferentes propiedades para cenizas volantes y puzolanas naturales, donde se especifica que la cantidad retenida después de tamizado en un tamiz de 45 μm (N° 325), debe ser máximo 34 %.

La molienda se realizó en un molino de bolas ubicado en la Planta Piloto de Metalurgia en la Universidad de Concepción, el cual se presenta en la Figura 3.2. Para la cerámica polvo el molino se cargó con 18 kg de cerámica aproximadamente y se hizo funcionar por tres horas y media, tiempo en el cual cumplía el requisito de la ASTM C618 con un porcentaje retenido sobre el tamiz N°325 de 27 %. Para la cerámica fina se cargó el molino con 28 kg de cerámica y se hizo funcionar por 10 minutos, este proceso fue muy ineficiente debido a que solo un 40% del material cumplía con la granulometría apropiada.

La granulometría de la cerámica fina se presenta en la Figura 3.1, la cerámica acondicionada se presenta en la Figura 3.3 a-b y la composición química determinada por análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) se presenta en la Tabla 3.2.



Figura 3.2. Molino de bolas utilizado en el proceso de trituración de residuos

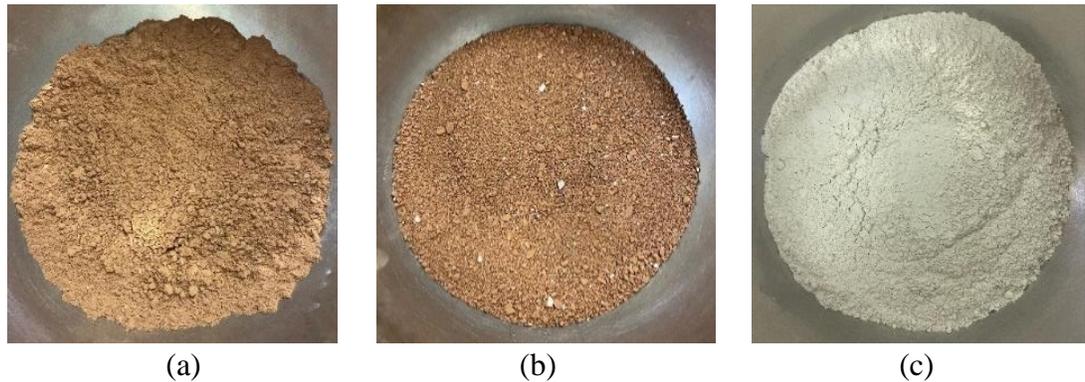


Figura 3.3 Cerámica acondicionada. (a) Cerámica polvo, (b) Cerámica fina y (c) Vidrio

3.2.6 Residuos de vidrio

El vidrio utilizado corresponde a vidrio sódico cálcico que proviene de la recolección de botellas sin hacer distinción por forma o contenido previo con el fin de representar los típicos desechos domiciliarios que se generan. Las botellas recogidas fueron sometidas a un lavado con agua y detergente para quitar restos orgánicos o cualquier residuo producto de su uso y fueron remojadas para remover con facilidad las etiquetas. Posteriormente se dejaron secar completamente.

En cuanto al color del vidrio, tanto el vidrio transparente como el vidrio con color tienen comportamiento puzolánico (Islam et al., 2017). Chen et al. (2002) caracterizaron 32 tipos de vidrios y obtuvieron que no existe diferencia significativa en la composición química por el color o el origen. Aun así, existen investigaciones que demuestran que el color presenta un efecto diferente en propiedades mecánicas (Dyer y Dhir, 2001). Por lo tanto, para mantener la composición del vidrio completamente controlada durante toda la investigación se decidió utilizar 55 % de vidrio color verde, 30 % color ámbar y 15 % transparente.

La actividad puzolánica del vidrio se ve influenciada por el tamaño de partícula, siendo 75 μm considerado apropiado por Pereira-De-Oliveira et al. (2012), Shi y Zheng (2007) y Vijayakumar et al. (2013). Sin embargo, a medida que el tamaño de partícula disminuye, las reacciones puzolánicas son mayores y hay elevada contribución a la resistencia. Dentro de los rangos estudiados con mejores resultados se encuentran entre 0-25 μm (Mirzahosseini y Riding, 2015) y 0-38 μm (Shao et al., 2000) con alta reactividad puzolánica. El tamaño de partícula del vidrio también influye en la expansión debido a la reacción de álcali sílice, siendo menor a medida que disminuye el tamaño de partícula del vidrio y considerándose apropiado un tamaño de partícula inferior a 600 μm (Lee et al., 2011).

En esta investigación se tomó como referencia la Norma ASTM C618 referente a diferentes propiedades para cenizas volantes y puzolanas naturales, donde se especifica que la cantidad retenida después de tamizado en un tamiz de 45 μm (N° 325), debe ser máximo 34 %. La molienda se realizó en un molino de bolas ubicado en la Planta Piloto de Metalurgia en la Universidad de Concepción, el cual se presenta en la Figura 3.2. El molino se cargó con 15 kg de vidrio aproximadamente y se hizo funcionar por tres horas y media, tiempo en el cual cumplía el requisito de la ASTM C618 con un porcentaje retenido sobre el tamiz N°325 de 24 %.

El vidrio utilizado se presenta en la Figura 3.4, el resultado acondicionado se presenta en la Figura 3.3 c y la composición química determinada por análisis XRF se presenta en la Tabla 3.2.



Figura 3.4. Botellas y envases de vidrio utilizados

3.2.7 Probetas

Cuatro tipos de probetas diferentes fueron utilizadas en los ensayos. Probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto fueron utilizadas para medir resistencia a la compresión y permeabilidad con permeámetro de carga variable. Para medir resistencia a la flexotracción se utilizaron probetas prismáticas de 15x15x56 cm. Para medir resistencia a la abrasión se utilizaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 10 cm de alto y para medir permeabilidad con NCAT e infiltración se utilizaron losetas de 15x30x56 cm.

3.2.8 Sección de pavimento

Se construyó una sección de pavimento de hormigón poroso correspondiente a un tramo de estacionamiento. El estacionamiento fue construido con la tecnología de losas cortas y tiene dimensiones de 2.50 x 5.00 m, con losas cortas de 1.25 x 2.50 m y un espesor de 15 cm. Tres mezclas diferentes fueron utilizadas, la mezcla de control, la mezcla con cerámica con mejor desempeño y la mezcla con vidrio con mejor desempeño.

3.3 Experimentación

3.3.1 Dosificación del hormigón poroso

La dosificación se realizó de acuerdo al Método de dosificación modificado de Nguyen et al. (2014), al cual se le realizaron modificaciones propuestas por Oviedo et al. (2022). Se consideró una porosidad de diseño de 15% y una razón agua cemento de 0.39. El detalle del método de dosificación se presenta en el Anexo 3.1.

3.3.2 Preparación, compactación y curado de probetas

La preparación, compactación y curado de probetas se realiza acorde a la NCh 1017. A partir de la dosificación de las mezclas se estima la masa de cada material de acuerdo a la cantidad de probetas que se requiera confeccionar. Las mezclas se realizan en una betonera, donde se introduce primero el árido grueso, luego el árido fino y finalmente el cemento. Se mezcla por unos segundos y se incorpora agua en pequeñas cantidades hasta que la mezcla esté homogénea, mezclando por alrededor de 5 minutos. En el caso de las mezclas que contienen residuos, estos fueron incorporados en la etapa final del amasado luego de incorporar toda el agua. Mientras la betonera se encuentra funcionando, los residuos se incorporan en pequeñas cantidades con el fin de que puedan distribuirse homogéneamente en toda la mezcla mientras la betonera gira.

Al finalizar el amasado se introduce la mezcla en los moldes y se compacta, este proceso depende del tipo de probeta que se confecciona. En el caso de probetas cilíndricas se incorpora el material en tres capas de igual espesor y se compacta mediante apisonado con 25 golpes en cada capa, al compactar cada capa se realizan 5 golpes al molde para que no se generen oquedades por el pisón. En el caso de probetas prismáticas se incorpora el material en dos capas de igual espesor y se compacta mediante apisonado con 66 golpes

en cada capa, al compactar cada capa se realizan 5 golpes al molde para que no se generen oquedades por el pisón.

En el caso de las losetas, el material se incorpora en una capa y la compactación se realiza mediante rodillo con una presión de 0.067 MPa realizando 3 pasadas. Para ensayar las losetas a flexotracción se dividió el molde en dos con una placa metálica, tal como se observa en la Figura 3.5 y así se generaron las mismas medidas que presentan las probetas prismáticas.



Figura 3.5. Confección de vigas a partir de losetas

Al terminar la colocación del material se enrasa la superficie y se deja fraguar a temperatura ambiente por 24 horas en el caso de probetas cilíndricas y 48 horas en el caso de probetas prismáticas y losetas. El curado inicial se realiza con polietileno transparente cubriendo toda la superficie expuesta de las probetas para evitar la evaporación del agua. Luego del fraguado inicial se realiza el desmolde y etiquetado de cada probeta. Posteriormente las probetas son ingresadas a una cámara húmeda que presenta condiciones ideales para el curado, con humedad sobre 95% y temperatura de 23°C.

En el caso del tramo de prueba realizado, la mezcla se colocó en una capa y fue compactado con un rodillo con una presión de 0.065 MPa al realizar 4 pasadas. El curado inicial se realizó con polietileno transparente por 7 días.

3.3.3 Diseño del rodillo compactador y tramo de pavimento

Dos rodillos compactadores fueron diseñados para usar en losetas de laboratorio y en una sección de pavimento de hormigón poroso. Como el área de contacto del rodillo con la mezcla era desconocido, se tomó como referencia la investigación de Kevern et al. (2009), donde se indica que el área de contacto varía con cada pasada del rodillo, teniendo bajas presiones de compactación en las primeras pasadas. Las presiones de compactación usadas por otros autores son conocidas y fueron presentadas en la Tabla 2.1, las cuales varían entre 0.06 a 0.08 MPa.

Para compactar losetas se diseñó un rodillo de 150 mm de diámetro, 500 mm de longitud y 60 kg, cuya presión de compactación teórica corresponde a 0.067 MPa al pasar el rodillo 2 veces. Posteriormente se midió el área de contacto real y se encontró que era mayor a la indicada por Kevern et al. (2009), por lo tanto se ajustó el número de pasadas a 3 para generar presiones adecuadas. Al igual que para las losetas, se diseñó un rodillo para la construcción del tramo de pavimento. Se consideró el mismo procedimiento, excepto que se incrementó el número de pasadas a 4, ya que corresponde a la mínima área de contacto con la mezcla y optimiza las dimensiones del rodillo. Se diseñó un rodillo de 140 mm de diámetro, 1250 mm de largo y 125 kg, cuya presión de compactación corresponde a 0.065 MPa. Los rodillos utilizados en losetas y en el tramo de pavimento se presentan en la Figura 3.6a y 3.6b respectivamente.

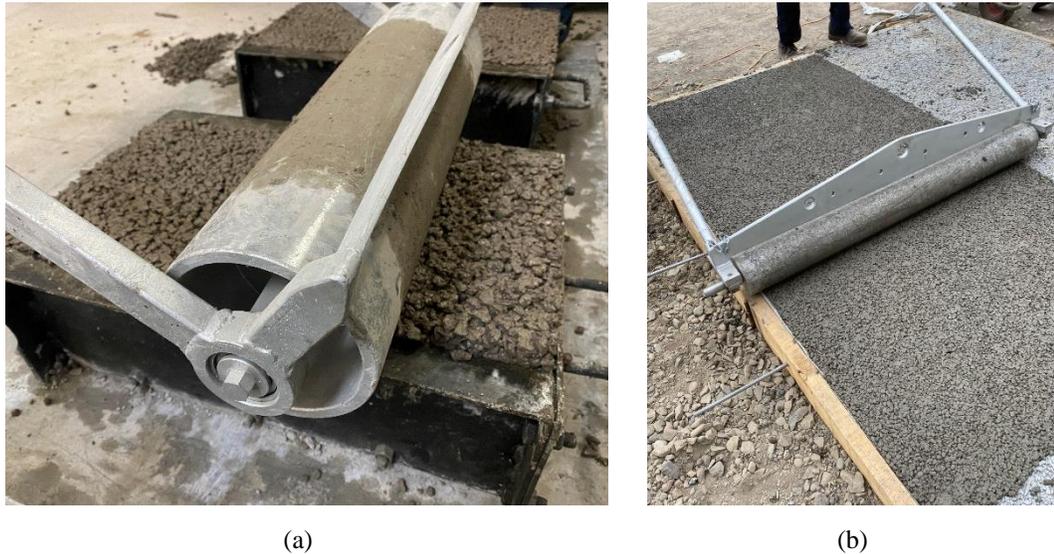


Figura 3.6. Rodillos compactadores. (a) rodillo de losetas y (b) rodillo tramo de pavimento

Se construyó un tramo de pavimento correspondiente a un estacionamiento, el cual está diseñado con la tecnología de losas cortas, donde losas con residuos de cerámica y vidrio se usaron para comparar resultados con la mezcla tradicional. En la Figura 3.7 se puede observar la disposición de las losas, donde 1 losa corresponde a PC-10CP, 1 losa a PC-20GP y 2 losas a PC-C. En la Figura 3.8 se pueden observar imágenes de la construcción del estacionamiento.

El diseño estructural está basado en Villar (2022), donde para losas cortas se obtuvo una resistencia mínima a la flexotracción de 1.5 MPa. La tecnología de losas cortas permite una distribución más eficiente de las cargas, ya que las losas no soportan más que un set de ruedas al mismo tiempo. De acuerdo a Villar (2022), la resistencia mínima para el pavimento de estacionamiento con losas cortas se reduce 0.9 MPa comparado con las losas tradicionales. Por lo tanto, debido a que el hormigón poroso tiene menor resistencia que un hormigón tradicional, la tecnología de losas cortas ayuda desde el diseño estructural a que pueda tener más aplicaciones.

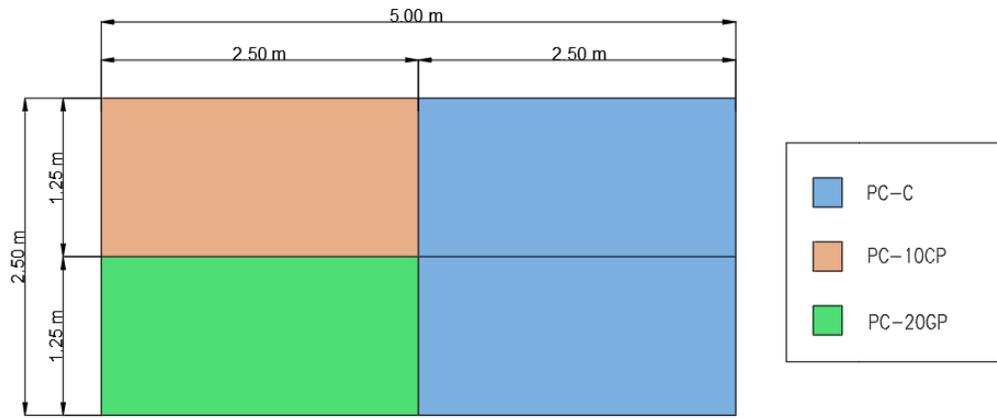


Figura 3.7. Plano del estacionamiento



Figura 3.8. Estacionamiento realizado con losas cortas. (a) Colocación de base y (b) losas realizadas

3.4 Ensayos

3.4.1 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión se evaluó de acuerdo a la NCh 1037, utilizando probetas cilíndricas de hormigón poroso de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días para observar la evolución del desarrollo de la resistencia. En el tramo de pavimento las muestras de control de las mezclas utilizadas se evaluaron a los 28 días. Se realizaron cinco probetas para cada edad de ensayo. La Figura 3.9 muestra un ensayo a compresión en una máquina de ensayos universal.



Figura 3.9. Probeta ensayada a resistencia a la compresión

3.4.2 Resistencia a flexotracción

La resistencia a la flexotracción se evaluó de acuerdo a la norma NCh 1038, utilizando moldes prismáticos de 56 x 15 x 15 cm. El ensayo de resistencia a la flexotracción se realizó a los 7, 28 y 90 días para observar la evolución del desarrollo de la resistencia. Se realizaron cinco probetas por cada edad de ensayo. La Figura 3.10 muestra un ensayo a flexotracción en una máquina de ensayos universal.



Figura 3.10. Probeta ensayada a resistencia a la flexotracción

3.4.3 Resistencia a la abrasión

El hormigón poroso es más vulnerable que el hormigón convencional al agrietamiento y desgaste bajo cargas de tráfico, debido a la reducción de la resistencia y del área de contacto entre las partículas de áridos asociadas al alto contenido de vacíos (Dong et al., 2013), por lo que caracterizar la resistencia a la abrasión en laboratorio es una medida importante de durabilidad.

La resistencia a la abrasión se ha medido utilizando diferentes ensayos, tal como el ensayo de resistencia a la degradación por abrasión e impacto en hormigones porosos que se rige por la ASTM C1747, el Ensayo Cantabro que se rige por la EN 12697, el ensayo de abrasión superficial ASTM C944 y el aparato de análisis de pavimento asfáltico – Loaded wheel (APA) (Dong et al., 2013). En esta investigación se realizarán los ensayos a la degradación por abrasión e impacto en hormigones porosos de acuerdo a la ASTM C1747 y el Ensayo Cantabro utilizado en mezclas asfálticas de acuerdo a la EN 12697.

Los ensayos considerados son muy similares y utilizan como aparato principal la máquina de desgaste de Los Ángeles sin bolas de acero, con una tasa constante de 30 rpm y probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro. La pérdida de masa se calcula usando la Ecuación 1.

Para el ensayo acorde a la ASTM C1747 tres probetas se introducen en conjunto en la máquina de los Ángeles hasta completar 500 revoluciones, en cambio para el ensayo que se rige por la EN 12697-17 cinco probetas se introducen por separado hasta completar 300 revoluciones midiendo cada 50 revoluciones.

$$PL = 100 \cdot \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \quad (1)$$

Donde:

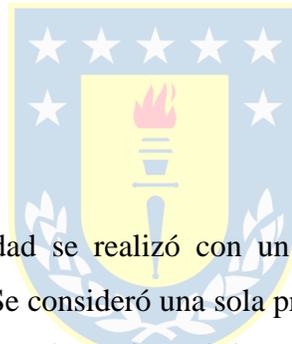
PL : pérdida de partículas expresado en %.

W_1 : Masa inicial de la probeta.

W_2 : Masa final de la probeta.

3.4.4 Permeabilidad

La medición de la permeabilidad se realizó con un permeámetro de carga variable especificado en el ACI (2010). Se consideró una sola probeta cilíndrica para realizar este ensayo y se repitió tres veces para determinar el tiempo que tarda el agua en descender entre alturas conocidas. Este procedimiento se repitió en cinco probetas para cada mezcla. El coeficiente de permeabilidad se calcula según la Ecuación 2. Para medir la permeabilidad en las losetas y en la sección del pavimento se utilizó el permeámetro NCAT, que también se basa en el principio de carga variable y se calcula con la Ecuación 2. En la Figura 3.11 se presenta el acondicionamiento de la probeta y permeámetro de carga variable utilizado y en la Figura 3.12 se presenta el permeámetro NCAT utilizado en losetas y en el tramo de pavimento.



$$k = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2)$$

Donde:

k : Coeficiente de permeabilidad.

a : Área tubo de admisión.

A : Área de la muestra.

L : largo de la muestra.

h_1 : Altura inicial de agua.

h_2 : Altura final de agua.

t : Tiempo que demora entre h_1 y h_2 .



(a)

(b)

Figura 3.11. Permeabilidad en probetas. (a) Acondicionamiento de probetas y (b) Permeámetro de carga variable

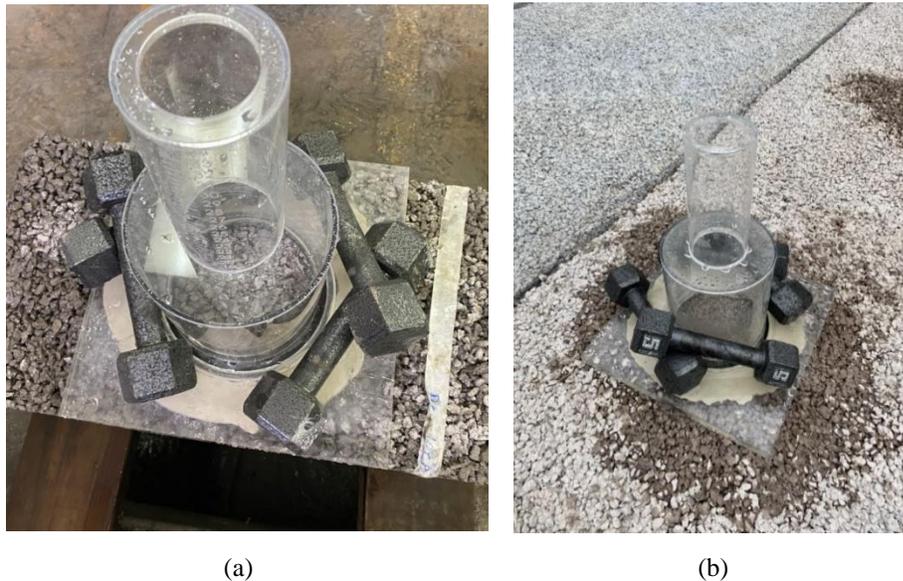


Figura 3.12. Medición de permeabilidad con NCAT. (a) Permeabilidad en losetas y (b) Permeabilidad en tramo de pavimento

3.4.5 Infiltración

La infiltración se midió en losetas y en la sección del pavimento según la norma ASTM C1701 con un anillo de infiltración de aluminio de 294 mm de diámetro. Se define una cantidad de masa de agua de acuerdo con la condición de permeabilidad del pavimento y luego se cuenta el tiempo desde el momento en que el agua impacta la superficie de hormigón permeable y se detiene cuando el agua libre ya no está presente en la superficie permeable. La tasa de infiltración se calcula según la ecuación 3. El anillo infiltrómetro utilizado en losetas y tramo de pavimento se presenta en la Figura 3.13.

$$I = \frac{KM}{(D^2t)} \quad (3)$$

Donde:

I: Infiltración.

K: Factor 4583666000 (mm³-s)/(kg-h).

M: Masa de agua.

D: Diámetro del anillo de infiltración.

t: tiempo.



(a)

(b)

Figura 3.13. Medición de tasa de infiltración. (a) Infiltración en losetas y (b) Infiltración en tramo de pavimento

3.4.6 Microanálisis

Se realizó microanálisis para complementar la caracterización de las mezclas de hormigón poroso con sustitución de cemento por residuos a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), donde se utilizó un microscopio JEOL JSM 6380LV con sistema de análisis EDS de Oxford Instrument. Se tomaron imágenes de las mezclas con 10% de sustitución de cemento por cerámica y 20% de sustitución de cemento por vidrio y de la muestra patrón sin residuos para comparar los resultados. Las muestras se analizaron a los 140 días para asegurar que las reacciones puzolánicas con el cemento se han estabilizado.

3.5 Series experimentales

En primer lugar, se definieron las mezclas que se estudiarán basadas en resultados previos (Ferrada, 2022) e investigaciones realizadas en hormigón poroso, hormigón tradicional y morteros (Tabla 2.2 y 2.3). Cinco mezclas diferentes fueron realizadas, la mezcla de control (PC-C), 10% de reemplazo de cemento por polvo cerámica (PC-10CP), 10% de reemplazo de cemento por polvo de cerámica y 5% de reemplazo de arena por cerámica fina (PC-10CP-5CF), 10% de reemplazo de cemento por polvo de vidrio (PC-10GP) y 20% de reemplazo de cemento por polvo de vidrio (PC-20GP). La dosificación en kg/m^3 utilizada para cada mezcla se presenta en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Dosificación

Mezcla	Gravilla	Arena	Cemento	Agua	CP	CF	GP
PC-C	1345.16	201.74	345.31	134.67	-	-	-
PC-10CP	1345.16	201.74	310.78	134.67	34.53	-	-
PC-10CP-5CF	1345.16	191.65	310.78	134.67	34.53	10.09	-
PC-10GP	1345.16	201.74	310.78	134.67	-	-	34.53
PC-20GP	1345.16	201.74	276.25	134.67	-	-	69.06

La investigación se dividió en 7 series experimentales con un total de 30 experimentos realizados. La serie 1 tiene como objetivo encontrar porcentajes óptimos de sustitución de cemento por residuos de vidrio o cerámica, basado principalmente en el efecto que generan en la resistencia y permeabilidad. La serie 2 tiene como objetivo demostrar a través del análisis microestructural el efecto que tienen en la resistencia la incorporación de residuos como reemplazo de cemento. La serie 3 tiene como objetivo evaluar el efecto que genera la sustitución de cemento por residuos en la resistencia a la abrasión y comparar dos métodos diferentes. La serie 4 tiene como objetivo comparar la compactación con rodillo y la compactación por apisonado en las mezclas de hormigón poroso con residuos. La serie 5 tiene como objetivo evaluar la permeabilidad e infiltración de las mezclas de hormigón poroso realizadas en losetas compactadas con rodillo. La serie 6 tiene como objetivo evaluar las mezclas ante condiciones de terreno, por lo que se construyó un tramo de estacionamiento y se tomaron muestras de las mezclas utilizadas y la serie 7 tiene como objetivo comparar la permeabilidad e infiltración de las mezclas de hormigón poroso estudiadas en un tramo de estacionamiento ante condiciones de terreno.

En la Tabla 3.6 se presentan las series realizadas, donde se muestra el tipo de compactación, residuos reemplazados (%) y edades (días) a los cuales se realizaron los ensayos.

Se consideraron 5 probetas por cada edad de ensayo para evaluar resistencia a la compresión (NCh 1037), flexotracción (NCh 1038) y abrasión (EN 12697) y 3 probetas por cada edad de ensayo para evaluar resistencia a la abrasión (ASTM C1747). En el caso de permeabilidad en probetas cilíndricas se utilizan las mismas que se ensayan a resistencia a la compresión y en el caso de losetas se confecciona 1 por tipo de mezcla para medir permeabilidad e infiltración. La cantidad de probetas utilizada en cada serie se presenta en la Tabla 3.7, teniendo un total de 279 muestras en la investigación.

Tabla 3.6. Series experimentales

Serie	Experimento	CMP	CP	CF	GP	C	F	A	P	I	SEM
1	1	RD	0	0	0	7-28-90	7-28-90	-	90	-	-
	2	RD	10	0	0	7-28-90	7-28-90	-	90	-	-
	3	RD	10	5	0	7-28-90	7-28-90	-	90	-	-
	4	RD	0	0	10	7-28-90	7-28-90	-	90	-	-
	5	RD	0	0	20	7-28-90	7-28-90	-	90	-	-
2	1	RD	0	0	0	-	-	-	-	-	140
	2	RD	10	0	0	-	-	-	-	-	140
	3	RD	0	0	20	-	-	-	-	-	140
3	1	RD	0	0	0	-	-	28	-	-	-
	2	RD	10	0	0	-	-	28	-	-	-
	3	RD	0	0	20	-	-	28	-	-	-
	4	RD	0	0	0	-	-	28*	-	-	-
	5	RD	10	0	0	-	-	28*	-	-	-
	6	RD	0	0	20	-	-	28*	-	-	-
4	1	RD	10	0	0	-	7-28	-	-	-	-
	2	RD	0	0	20	-	7-28	-	-	-	-
	3	RL	10	0	0	-	7-28	-	-	-	-
	4	RL	0	0	20	-	7-28	-	-	-	-
5	1	RL	0	0	0	-	-	-	28	-	-
	2	RL	10	0	0	-	-	-	28	-	-
	3	RL	0	0	20	-	-	-	28	-	-
	4	RL	0	0	0	-	-	-	-	28	-
	5	RL	10	0	0	-	-	-	-	28	-
	6	RL	0	0	20	-	-	-	-	28	-
6	1	RD	0	0	0	28	-	-	-	-	-
	2	RD	10	0	0	28	-	-	-	-	-
	3	RD	0	0	20	28	-	-	-	-	-
7	1	RL	0	0	0	-	-	-	28	28	-
	2	RL	10	0	0	-	-	-	28	28	-
	3	RL	0	0	20	-	-	-	28	28	-

“CMP” es compactación, donde “RD” es apisonado y “RL” es rodillo. “C” corresponde a Resistencia a la compresión, “F” a Resistencia a la flexotracción, “A” a resistencia a la abrasión, “P” a permeabilidad e “I” a infiltración. *Indica diferentes metodologías de ensayo.

Tabla 3.7. Muestras realizadas en cada serie experimental

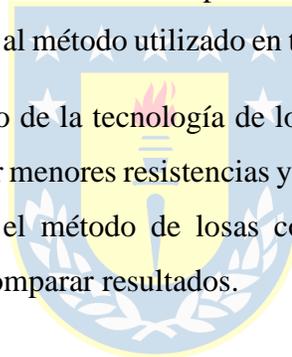
Serie	Cantidad de muestras
1	150
2	3
3	24
4	60
5	3
6	15
7	24

3.6 Conclusión

En este capítulo se abordó detalladamente la metodología por la cual se rige esta investigación, donde se explicó la estrategia de trabajo que consiste en la realización 7 series que involucran un total de 279 muestras. Se presentaron las propiedades de los materiales y el método de dosificación utilizado. Se detalló el procedimiento de confección de probetas y los ensayos realizados.

Se puede notar que el procedimiento de diseño y confección del hormigón poroso difiere considerablemente al del hormigón tradicional, ya que no se diseña para una cierta resistencia, si no que, para un cierto porcentaje de vacíos, lo cual es característico de este tipo de mezclas. Además, el método de compactación realizado en laboratorio que corresponde al apisonado difiere al método utilizado en terreno que corresponde al rodillo.

En el tramo de pavimento el uso de la tecnología de losas cortas es beneficioso, ya que optimiza el pavimento al requerir menores resistencias y por ende se podría tener un menor espesor. En esta investigación el método de losas cortas permitió realizar losas con diferentes mezclas para poder comparar resultados.



CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión, flexotracción, abrasión, permeabilidad, infiltración y microestructura para las mezclas en estudio. Además, se realiza el análisis correspondiente de los resultados y las comparaciones entre la mezcla patrón y las mezclas con residuos. La nomenclatura utilizada está asociada a la serie a la que pertenece el experimento, lo cual se definió en la Tabla 3.6. Los resultados obtenidos por probeta para los diferentes ensayos efectuados se presentan en el Anexo 4.1.

El capítulo se divide en 7 secciones, donde cada sección está asociada a una serie experimental. La serie 1 presenta los porcentajes óptimos de sustitución, donde se escoge la mezcla que presenta mejor desempeño para cada residuo; la Serie 2 donde se demuestran los efectos obtenidos a través del análisis microestructural; la Serie 3 evalúa el efecto de las mezclas con residuos en la resistencia a la abrasión; la Serie 4 compara los métodos de compactación utilizados; la Serie 5 evalúa la permeabilidad e infiltración en losetas compactadas con rodillo, la Serie 6 analiza muestras de un tramo de pavimento realizado ante condiciones ambientales y la Serie 7 compara la permeabilidad e infiltración de las mezclas con residuos en un tramo de pavimento.

4.2 Serie 1

4.2.1 Efecto de la cerámica como reemplazo de cemento

Los resultados de las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con cerámica en comparación con la mezcla patrón se presentan en la Figura 4.1. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones.

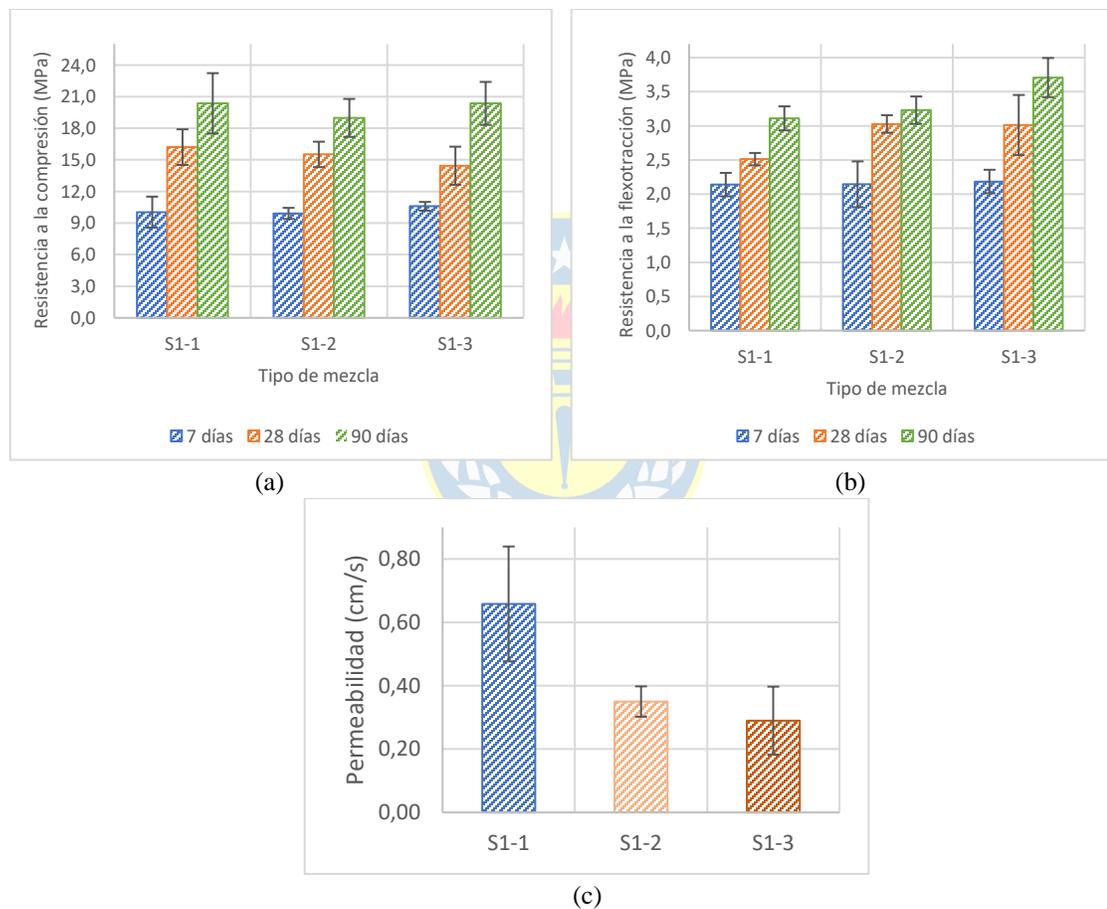


Figura 4.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con cerámica: (a) Resistencia a la compresión, (b) Resistencia a la flexotracción and (c) Permeabilidad

Con respecto a la mezcla patrón, la resistencia a la compresión (Figura 4.1a) de la S1-2 disminuyó un 1%, 4% y 7% a los 7, 28 y 90 días, respectivamente. S1-3 muestra un aumento del 6% a los 7 días, una disminución del 11% a los 28 días y a los 90 días no hubo diferencias entre las medias. La resistencia a la flexotracción (Figura 4.1b) del S1-2 no muestra diferencias en las medias a los 7 días, pero a los 28 y 90 días hay un aumento del 20.5% y del 4%, respectivamente. La resistencia a la flexotracción de S1-3 muestra aumentos del 2%, 20% y 19% a los 7, 28 y 90 días, respectivamente. La permeabilidad de todas las mezclas está por encima de los límites establecidos por la ACI (2010) para su uso en pavimentos que están en el rango de 0.14 a 1.22 cm/s, pero se puede observar que la incorporación de cerámica reduce la permeabilidad de la mezcla (Figura 4.1c).

En la resistencia a compresión, se observa que la sustitución del cemento por cerámica produce ligeras variaciones, estando los resultados dentro del rango de la desviación estándar. Además, el porcentaje utilizado como sustitución coincide con los resultados de Vejmelková et al. (2012) y Viera & Chicaiza (2018). En la resistencia a flexotracción, los incrementos son más notables y concuerdan con las investigaciones de Bhargav y Kansal (2020) y Díaz (2022). Se puede observar, también, que el S1-2 muestra un buen comportamiento a los 7 días y la sustitución de la arena por cerámica fina no aumenta significativamente la resistencia a edades tempranas, por lo que su uso no está plenamente justificado. El estudio del S1-2 se continuará en las series posteriores de la investigación.

4.2.2 Efecto del vidrio como reemplazo de cemento

Los resultados de las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con vidrio en comparación con la mezcla patrón se presentan en la Figura 4.2. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones.

Con respecto a la mezcla patrón, la resistencia a la compresión (Figura 4.2a) de S1-4 disminuyó un 1,5% y un 9% a los 7 y 28 días respectivamente y a los 90 días no hubo diferencias entre las medias. En el caso de S1-5, la resistencia a la compresión disminuye un 8% a los 7 días y aumenta un 1% y un 15% a los 28 y 90 días respectivamente. La resistencia a la flexotracción (Figura 4.2b) de la mezcla S1-4 disminuye un 11% a los 7 días y aumenta un 7% y un 24% a los 28 y 90 días respectivamente. La resistencia a la flexotracción de S1-5 disminuye un 12% a los 7 días y aumenta un 24% y un 16% a los 28 y 90 días respectivamente. La permeabilidad (Figura 4.2c) de todas las mezclas está por encima de los límites establecidos por la ACI (2010) para su uso como pavimentos, que están en el rango de 0,14 a 1,22 cm/s.

Los resultados concuerdan con los obtenidos por otras investigaciones como Kumar et al. (2014), Pradeep et al. (2019) y Talsania et al. (2015), teniendo como porcentaje óptimo un 20% de sustitución de vidrio por cemento con incrementos en la resistencia a compresión y flexotracción. También se puede observar que las mezclas con vidrio presentan bajas resistencias a edades tempranas, estando por debajo del hormigón poroso patrón, pero a medida que aumenta la edad del ensayo, lo superan. Esto se explica por el efecto de las reacciones puzolánicas tardías, que también se evidencia en las investigaciones de Islam et al. (2017) y Omran y Tagnit-Hamou (2016). Considerando los resultados, se obtuvo que ambas mezclas con 10% o 20% de reemplazo de cemento por vidrio podrían ser utilizadas, debido a que afectan la permeabilidad en menor grado y producen incrementos en la resistencia. Para sustituir más cemento, se continuó el estudio del S1-5 en la serie posterior de la investigación.

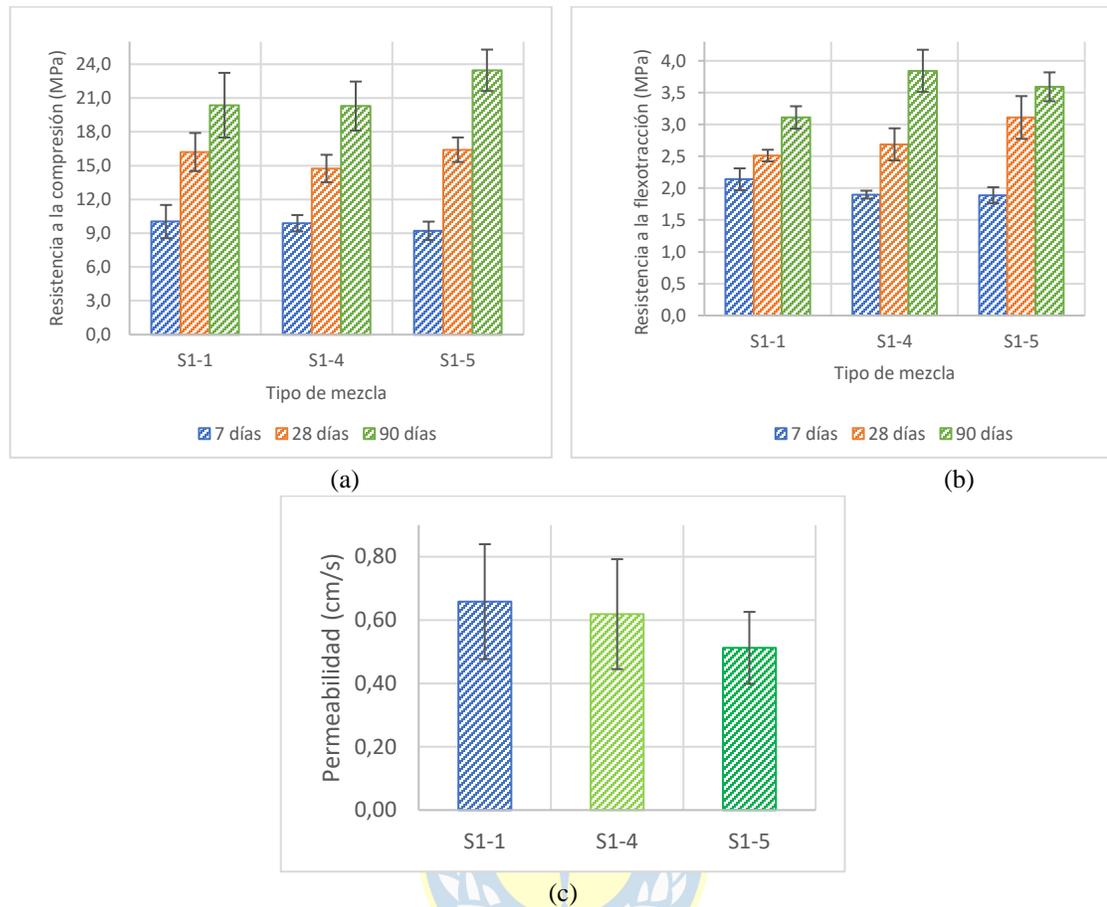
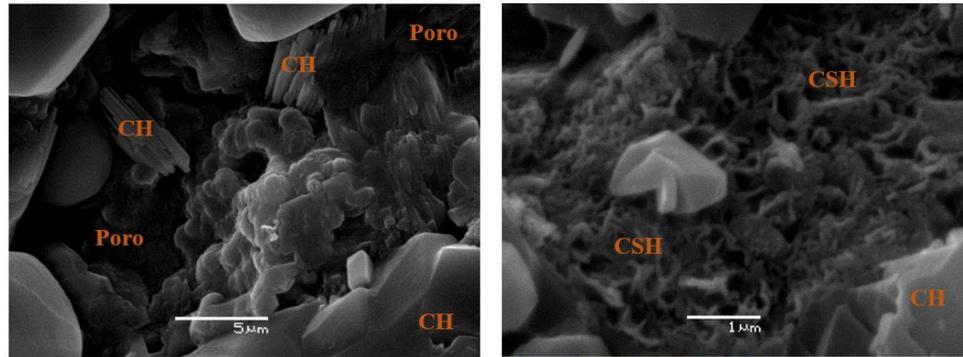


Figura 4.2. Propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con vidrio: (a) Resistencia a la compresión, (b) Resistencia a la flexotracción and (c) Permeabilidad

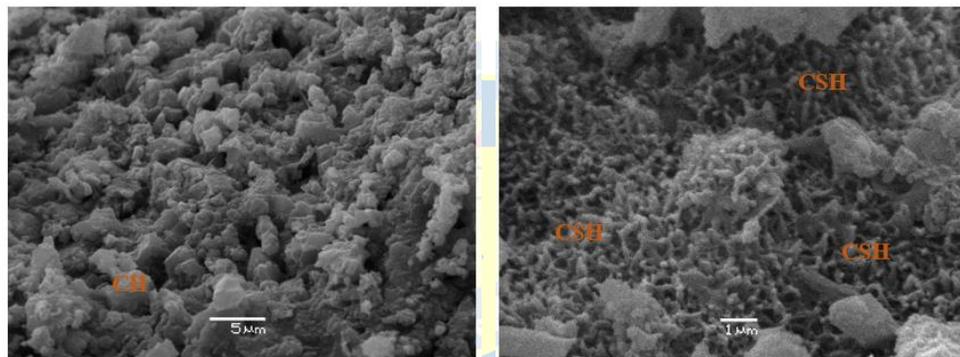
4.3 Serie 2

La microestructura de S2-1, S2-2 y S2-3 se muestran en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente. Otras imágenes complementarias de SEM se encuentran en el Anexo 4.2. Para identificar las principales fases obtenidas mediante SEM se utilizó espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) y algunas de las muestras analizadas se presentan en el Anexo 4.3.



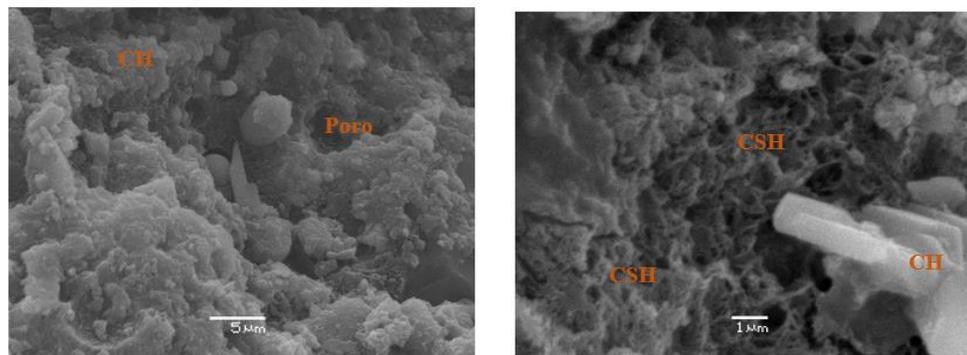
(a) (b)

Figura 4.3. Imágenes SEM de la microestructura de S2-1: (a) Matriz cementicia y cristales de CH; (b) CSH y CH en la matriz cementicia



(a) (b)

Figura 4.4. Imágenes SEM de la microestructura de S2-2: (a) Matriz cementicia (b) CSH en la matriz cementicia



(a) (b)

Figura 4.5. Imágenes SEM de la microestructura de S2-3: (a) Matriz cementicia; (b) CSH y CH en la matriz cementicia

Las principales fases que se pueden identificar en las imágenes son el silicato cálcico hidratado (CSH) y el hidróxido de calcio (CH). En la Figura 4.3a, S2-1 presenta cantidades considerables de CH y una matriz cementante con poros, la Figura 4.3b muestra cristales de CHS y CH. Como se puede observar en la Figura 4.4, S2-2 muestra diferencias con respecto a la muestra patrón, teniendo menos cristales de CH y más CSH, lo que se explica debido a la reacción puzolánica. Además, se puede observar que la matriz de cemento es más densa que la mezcla patrón, lo que coincide con los resultados obtenidos por Dos Santos Barreto et al. (2021), El-Kattan et al. (2020), Gautam et al. (2022), Li et al. (2019) and Lim et al. (2018). Esto puede explicar el aumento de la resistencia y la disminución de la permeabilidad de las mezclas cerámicas.

La Figura 4.5a muestra un cambio en la morfología de S2-3 y una reducción en la cantidad de CH, ya que se consume como resultado de la reacción puzolánica con los granos de vidrio (Sobolev et al., 2007). En la Figura 4.5b se identifican cantidades masivas de CSH que concuerdan con expuesto por Jiang et al. (2022) y Li et al. (2022). En las figuras 4.5a y 4.5b se puede observar que la matriz cementante es más densa que la muestra de control, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Jawad et al. (2020) y Khmiri et al. (2013). Esto puede explicar el aumento de la resistencia y la disminución de la permeabilidad de las mezclas con vidrio. Además, no hay presencia de agrietamiento o formación retardada de etringita, por lo que se podría inferir que no hay presencia de expansión producto de la reacción álcali-sílice.

4.4 Serie 3

Como las mezclas de hormigón poroso se utilizan sobre todo en pavimentos, es necesario complementar la caracterización con pruebas de resistencia a la abrasión. La Figura 4.6 muestra la resistencia a la abrasión de la mezcla patrón, mezcla con vidrio y cerámica con dos métodos diferentes.

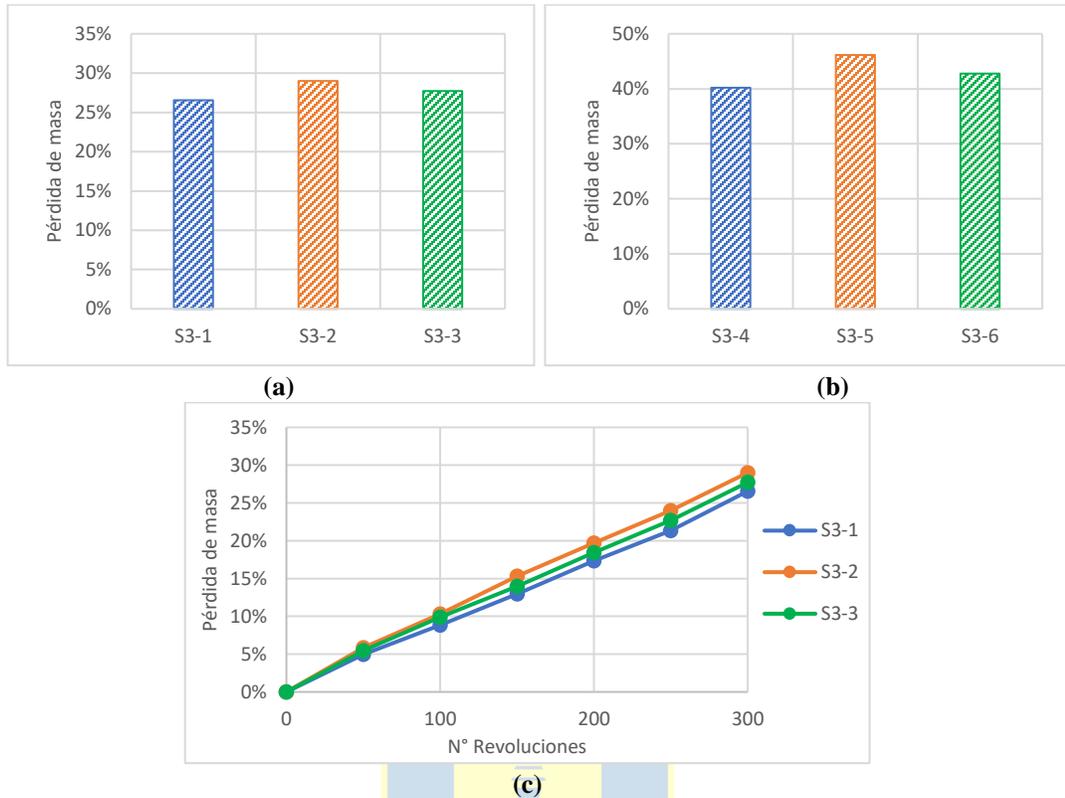


Figura 4.6. Resistencia a la abrasión. (a) EN 12697-17, (b) ASTM C1747 y (c) EN 12697-17 desde 0 a 300 Rev.

La resistencia a la abrasión según la norma EN 12697-17 (Figura 4.6c) muestra la evolución de la pérdida de masa a medida que aumentan las revoluciones, con la misma tendencia para las tres mezclas, es decir, 27%, 28% y 29% de pérdida de masa para S3-1, S3-2 y S3-3 respectivamente. En la Figura 4.7 se muestra el cambio que tuvieron las probetas al realizar el ensayo. Los resultados con el método ASTM C1747 a 500 revoluciones corresponden al 40%, 43% y 46% para la S3-4, S3-5 y S3-6 respectivamente y en la Figura 4.8 se presentan los cambios en las probetas. La resistencia a la abrasión obtenida con el método EN 12697-17 presenta buenos resultados, ya que está por debajo de lo obtenido en algunos casos por Dong et al., (2013), Giustozzi (2016) and Wu et al. (2010). Lo obtenido por el método ASTM C1747 es superior debido a que las probetas se introducen de tres en tres y se considera un mayor número de revoluciones. Los resultados

con este método son similares a los alcanzados por Moruza (2016) e inferiores a los obtenidos por Gaedicke et al. (2014).

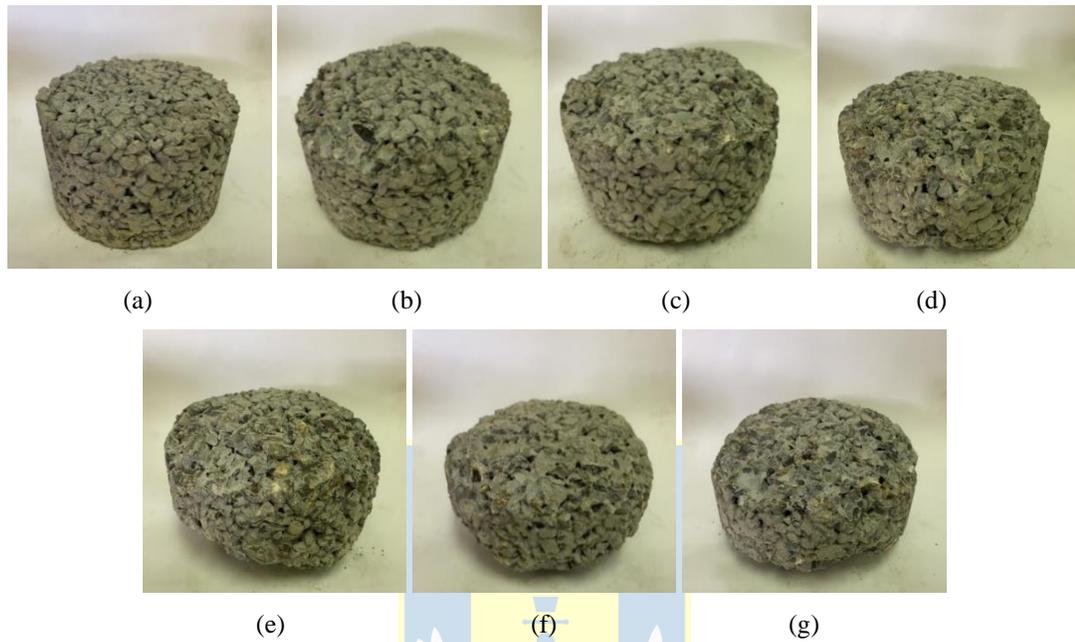


Figura 4.7. Efecto del Ensayo de Resistencia a la abrasión EN 12697-17. (a) Probeta original. (b) 50 Revoluciones. (c) 100 Revoluciones. (d) 150 Revoluciones. (e) 200 Revoluciones. (f) 250 Revoluciones. (g) 300 Revoluciones



Figura 4.8. Efecto del Ensayo de Resistencia a la abrasión según ASTM C1747

4.5. Serie 4

Los resultados de la resistencia a la flexotracción con compactación por apisonado se muestran en la Figura 4.9a y con compactación de rodillo se muestran en la Figura 4.9b. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones.

La resistencia a la flexotracción disminuyó cuando se aplicó la compactación con rodillo. Para las mezclas con cerámica se obtuvo una reducción del 10 y 13% a los 7 y 28 días, respectivamente y para las mezclas con vidrio se obtuvo una reducción del 5 y 18% a los 7 y 28 días, respectivamente. La disminución de la resistencia puede explicarse por el hecho de que la compactación con rodillo no genera una compactación uniforme en todo el espesor del pavimento, siendo la zona superior más compacta y menos porosa, y la zona inferior menos compacta y más porosa (Haselbach y Freeman, 2006). Por otro lado, la compactación por apisonado se realiza en tres capas, por lo tanto, la compactación a lo largo de la probeta es más uniforme.

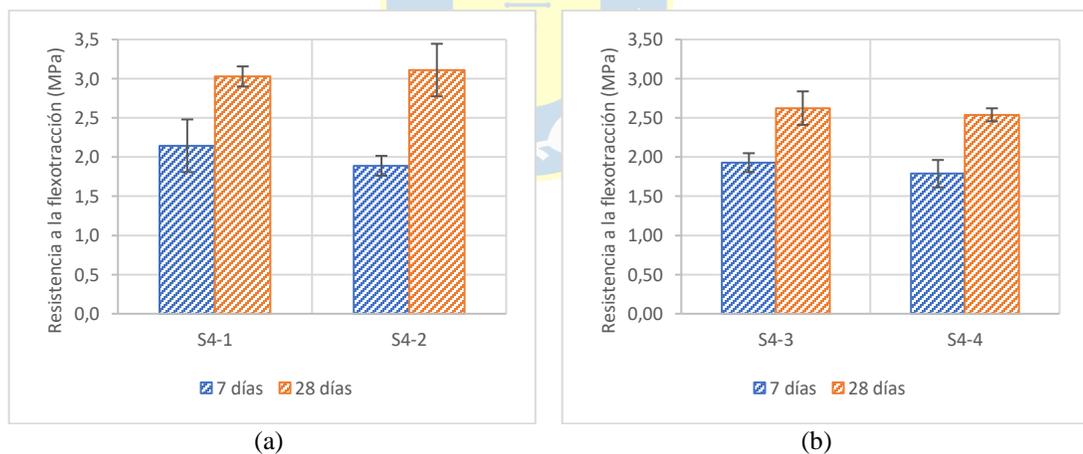


Figura 4.9. Resistencia a la flexotracción con diferentes métodos de compactación. (a) Compactación por apisonado y (b) Compactación con rodillo

4.6. Serie 5

Los resultados de permeabilidad e infiltración realizados en losetas compactadas con rodillo se muestran en la Figura 4.10a y 4.10b respectivamente.

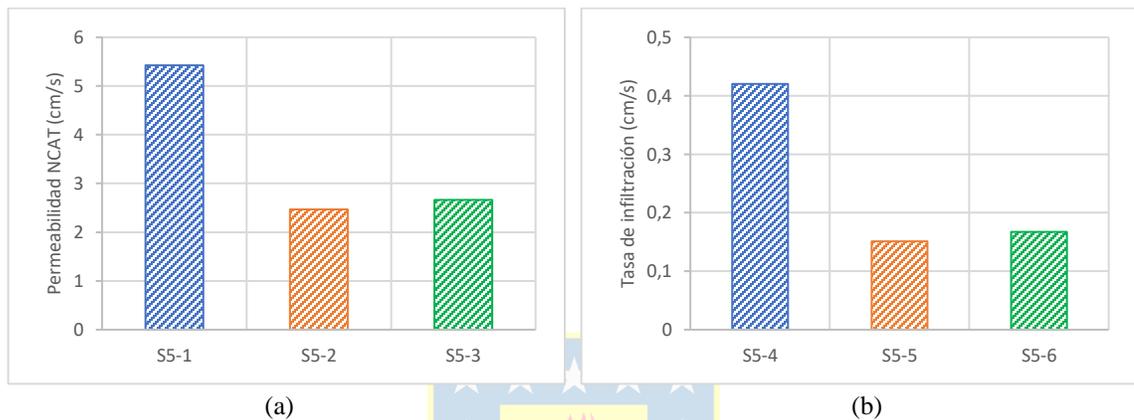


Figura 4.10. Propiedades hidráulicas de las losetas (a) Permeabilidad con NCAT and (b) Tasa de infiltración

La permeabilidad y la tasa de infiltración de todas las mezclas están por encima de los límites establecidos por la ACI (2010) para su uso como pavimentos, los cuales oscilan entre 0,14 y 1,22 cm/s, pero la infiltración de las mezclas con residuos se aproxima a los límites inferiores. También puede observarse que la incorporación de residuos mantiene una tendencia tanto en la permeabilidad como en la infiltración, reduciéndolas entre un 50 y un 64 %. Esto se explica por los resultados obtenidos en la Serie 2 de la investigación mediante el estudio de microestructura por SEM, donde se obtuvieron matrices más densas para las mezclas con cerámica y vidrio.

Se obtuvieron diferencias considerables con el permeámetro NCAT y las mediciones del permeámetro de laboratorio, lo que se explica principalmente por la forma en que fluye el agua. El principio utilizado para cuantificar la permeabilidad corresponde a la ley de Darcy, que es aplicable al flujo en una dimensión. En el laboratorio, las probetas se cubren por los lados para restringir el flujo de agua en una sola dirección, sin embargo, en terreno

esto no puede controlarse y el agua puede fluir en dos dimensiones. Por lo tanto, al aplicar dos dispositivos de medición de permeabilidad con el mismo principio en terreno y en laboratorio, cabe esperar que la permeabilidad medida en terreno sea mayor que en el laboratorio (Gogula et al., 2003). En el caso de la permeabilidad y la infiltración también hay diferencias notorias, lo que ocurre porque el permeámetro NCAT tiene un diámetro menor que ejerce un flujo en dos direcciones y el infiltrómetro tiene un diámetro mayor que induce un flujo unidireccional (Li et al., 2013). La variación obtenida entre los diferentes ensayos coincide con la obtenida por Chen et al. (2019) and Li et al. (2013).

4.7. Serie 6

La resistencia a la compresión de las mezclas utilizadas en el tramo de pavimento a los 28 días es mostrada en la Figura 4.11. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones.

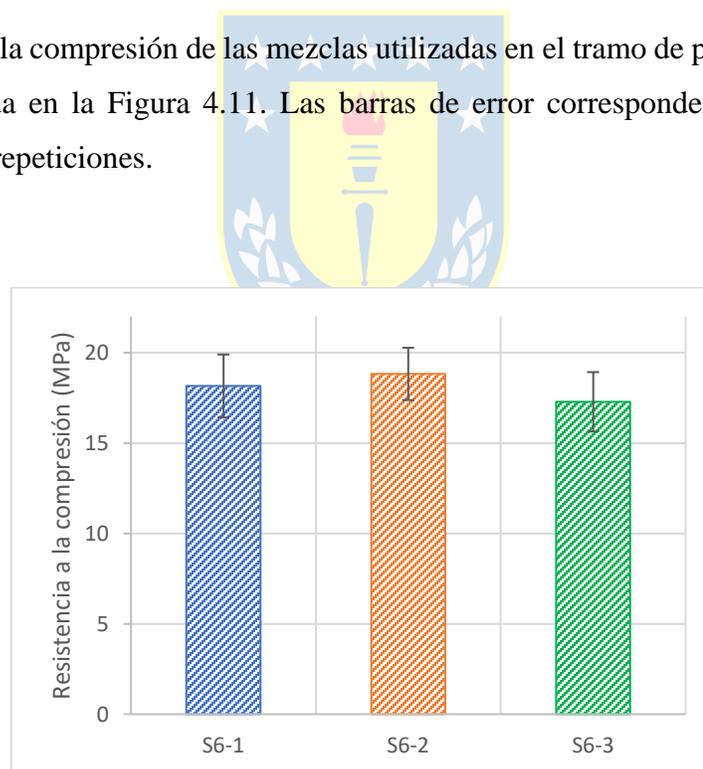


Figura 4.11. Resistencia a la compresión de las mezclas usadas en el tramo de pavimento a los 28 días

La resistencia a la compresión de las mezclas es similar a las obtenidas en la Serie 1 e incluso superior, presentando valores sobre los 17 MPa. Los tres valores están muy próximos entre sí, encontrándose dentro de los rangos de desviación estándar. Con respecto a la mezcla patrón, la resistencia a la compresión de S6-2 aumenta un 3,7% y la de S6-3 disminuye un 4,8%. Se considera que la realización de las mezclas en condiciones ambientales y de forma masiva no afectó a la resistencia. Por lo tanto, la construcción de pavimentos de hormigón permeable con las mezclas estudiadas es apropiada.

4.8. Serie 7

Los resultados de permeabilidad e infiltración realizados en el tramo de pavimento compactado con rodillo se muestran en la Figura 4.12a y en la Figura 4.12b respectivamente.

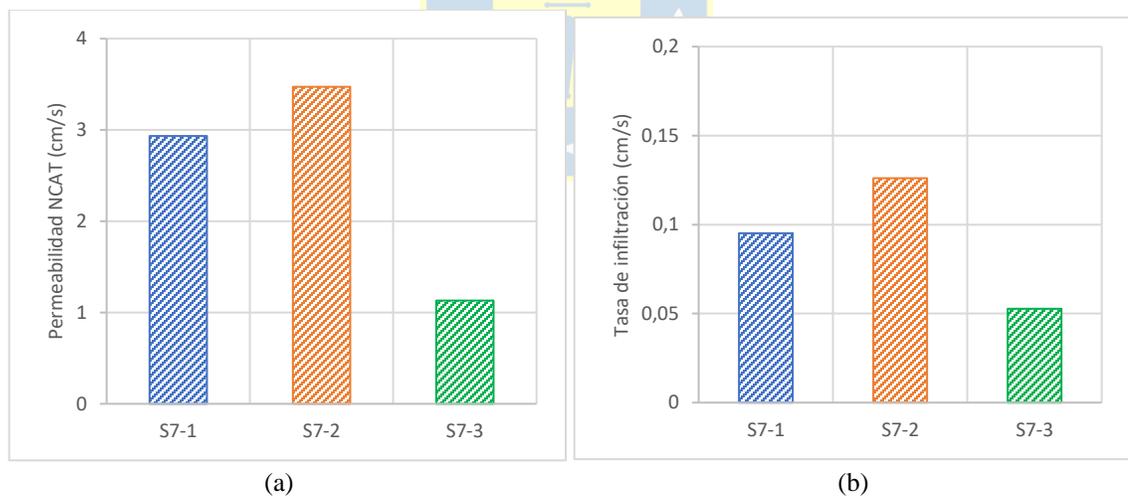


Figura 4.12. Propiedades hidráulicas del tramo de pavimento (a) Permeabilidad con NCAT y (b) Tasa de infiltración

Los resultados de permeabilidad e infiltración en promedio son inferiores a los obtenidos en etapas anteriores. Se observó que los resultados varían mucho dependiendo del sitio de medición, ya que la superficie y la interconexión de poros no son iguales en todo el pavimento permeable. La Figura 4.13 muestra los lugares considerados para las mediciones de permeabilidad e infiltración, los cuales se escogieron aleatoriamente y la Tabla 4.1 muestra las mediciones asociadas a cada punto. Se puede observar que la diferencia entre un punto de medición y otro es considerable, con variaciones de hasta 85, 50 y 70% para S7-1, S7-2 y S7-3 respectivamente. Además, el pavimento al encontrarse emplazado en condiciones de terreno puede haberse obstruido parcialmente por polvo, áridos u otros materiales, lo cual genera una disminución en la permeabilidad e infiltración.

Los resultados también cambian la tendencia observada en la Serie 5, siendo la mezcla con cerámica la que presenta los valores más altos de permeabilidad y la mezcla con vidrio la que presenta los valores más bajos. Al igual que en la Serie 5, se obtuvo una gran diferencia entre la medición con el permeámetro NCAT y el infiltrómetro según ASTM C1701, que se explica por la diferencia en la dirección del movimiento del flujo de agua (Li et al., 2013).

Los ensayos utilizados para medir permeabilidad e infiltración solo muestran una parte del área del pavimento, donde se difiere considerablemente entre mediciones. Para realizar una medición más completa y evitar los problemas de variación entre puntos de medición, se han propuesto los métodos a gran escala, donde se inunda una superficie completa del pavimento y se mide el tiempo que demora en drenar el agua. Al comparar estos métodos con un método de infiltración con doble anillo que se considera un método de medición puntual, se genera una variación, presentando diferencias de un 30% (Lucke et al., 2014). Por lo tanto, se podría considerar que el método a gran escala también podría diferir a los métodos puntuales considerados en esta investigación y por la enorme variación que existe no serían apropiados para representar la infiltración del pavimento.

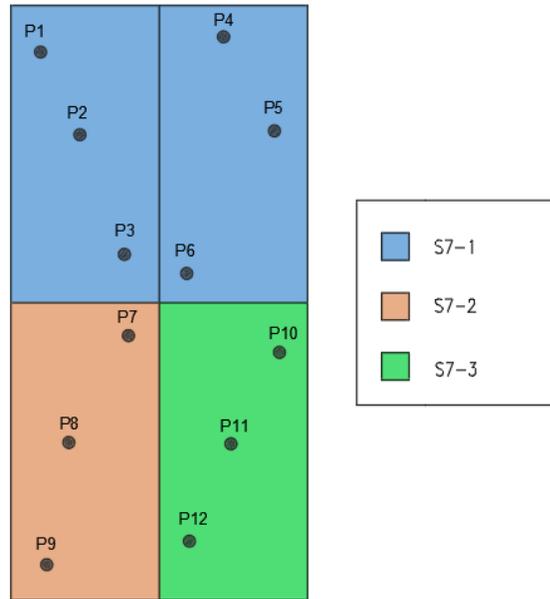


Figura 4.13. Puntos de medición aleatorios en el tramo de pavimento

Tabla 4.1. Permeabilidad e infiltración de los puntos de medición en el tramo de pavimento

Ubicación	Permeabilidad con NCAT (cm/s)	Infiltración (cm/s)
P1	2,95	0,07
P2	5,04	0,14
P3	6,60	0,24
P4	1,18	0,04
P5	0,99	0,05
P6	0,84	0,02
P7	0,82	0,04
P8	0,91	0,06
P9	1,67	0,06
P10	3,37	0,07
P11	4,03	0,24
P12	3,02	0,07

4.9 Conclusión

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en las 7 series consideradas en esta investigación. En la serie 1 se determinaron las mezclas con residuos que presentaron un mejor desempeño considerando resistencia a la compresión, flexotracción y permeabilidad, las cuales corresponden a mezclas con 10% de cerámica y 20% de vidrio como reemplazo de cemento. En la serie 2 se demostró mediante análisis microestructural los resultados obtenidos en la serie 1, donde se evidenció la alta presencia de CSH en las mezclas con vidrio y cerámica, lo cual contribuye al aumento de la resistencia. En la serie 3 se demostró con dos métodos diferentes que la sustitución de cemento por residuos de vidrio y cerámica no influye considerablemente en la resistencia a la abrasión del hormigón poroso. En la serie 4 se demostró que la compactación con rodillo reduce la resistencia a la flexotracción hasta un 18%. En la serie 5 se evidenció la reducción de la permeabilidad e infiltración al reemplazar el cemento por residuos de vidrio y cerámica, hasta en un 64%. En la serie 6 se evaluaron mezclas tomadas del tramo de pavimento realizado ante condiciones de terreno, de lo cual no se obtuvieron diferencias significativas con respecto a lo analizado en laboratorio e incluso se alcanzaron valores superiores, sobre los 17 MPa. En la serie 7 se evidenció la disminución de la permeabilidad e infiltración de las mezclas en el tramo de pavimento y la variabilidad que existe entre las mediciones.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Las mezclas de hormigón poroso con sustitución parcial del cemento por residuos de cerámica o de vidrio son adecuadas para la construcción de estacionamientos, especialmente las mezclas con 10% de reemplazo de cemento por cerámica y 20% de reemplazo de cemento por vidrio, las cuales demuestran resistencias a la compresión de 18,8 y 17,3 MPa respectivamente ante condiciones de terreno y resistencias a la flexotracción de 2,6 y 2,5 MPa respectivamente en mezclas compactadas con rodillo. La resistencia mínima requerida para la construcción de un estacionamiento corresponde a 1,5 MPa, por lo que se supera considerablemente con las mezclas realizadas. La incorporación de residuos en las mezclas genera una disminución considerable en la permeabilidad e infiltración del pavimento. Al tener resistencias sobre las exigidas en el pavimento y permeabilidades bajas se podría reformular la dosificación incrementando el volumen de vacíos para generar un equilibrio entre ambos parámetros.

Las variaciones de resistencia y permeabilidad con respecto a la mezcla de control se demostraron a través de la microestructura mediante SEM. Las mezclas con reemplazo de cemento por residuos de cerámica y vidrio presentaron matrices más densas y con mayor cantidad de CSH, mientras que la mezcla control evidenciaba mayor cantidad de CH y algunos poros en la matriz. Es por esto que las mezclas con residuos pueden presentar mayor resistencia y menor permeabilidad que la mezcla tradicional.

Considerando la sustitución de cemento por cerámica, los principales resultados muestran que presenta un buen comportamiento a edades tempranas, encontrándose los resultados entre los rangos de desviación estándar y por lo tanto no es necesaria la sustitución de arena por cerámica. En la resistencia a la flexotracción, que se considera la más importante en la construcción de pavimentos de hormigón, los resultados más favorables se observaron para la sustitución de un 10% de cemento por cerámica, obteniéndose a los 28 días 3,0 y 2,6 MPa al compactar con pisón y rodillo respectivamente. En cuanto a la resistencia a la abrasión no se generaron diferencias significativas comparando con la

muestra de control. Con respecto a las propiedades hidráulicas de las mezclas con cerámica, se observó una reducción considerable en losetas, con una disminución de 54 y 64% en permeabilidad e infiltración respectivamente y en el tramo de pavimento se observó un incremento de 18 y 32% en permeabilidad e infiltración respectivamente, sin embargo, los resultados se encuentran bajo el límite requerido y se observa una gran variabilidad en las mediciones, por lo que los métodos utilizados no se consideran los más adecuados.

Considerando la sustitución del cemento por vidrio, los principales resultados muestran que hay una disminución de la resistencia a edades tempranas, pero después de 28 días la resistencia es superior a la muestra de control, especialmente en la resistencia a la flexotracción, que se considera más importante en la construcción de pavimentos de hormigón. Se obtuvo al compactar con pisón 3,1 y 3,6 MPa a los 28 y 90 días respectivamente y al compactar con rodillo 2,5 MPa a los 28 días. En cuanto a la resistencia a la abrasión no se generaron diferencias significativas comparando con la muestra de control. Con respecto a las propiedades hidráulicas de las mezclas con vidrio, se observó una reducción considerable en losetas, con una disminución de 50 y 60% en permeabilidad e infiltración respectivamente y en el tramo de pavimento de un 61 y 45% en permeabilidad e infiltración respectivamente. Los resultados se encuentran bajo el límite requerido y se observa una gran variabilidad en las mediciones, por lo que los métodos utilizados no se consideran los más adecuados.

Los resultados de las losetas y de la sección del pavimento demuestran que el sistema de compactación diseñado es adecuado, ya que se logra una resistencia superior a la mínima e incluso se podría utilizar en otras aplicaciones. Además, la permeabilidad se puede mejorar incrementando el volumen de vacíos en el diseño de mezclas. Por lo tanto, el rodillo diseñado con presiones de 0.065 MPa es adecuado para la construcción de pavimentos de hormigón poroso.

REFERENCIAS

- American Concrete Institute [ACI]. (2010). 522R-10. Report on Pervious Concrete. Technical Documents; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2010.
- Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A., & Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries , 2000 – 2050. *Progress in planning*, 75, 53–107. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001>
- ASTM C618-19 (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use in Concrete*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- ASTM C1747-22 (2022). *Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- ASTM C1701-20 (2020). *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- Atlanta Regional Commission. (2016). Georgia - Stormwater Management Manual. En *Stormwater management Manual* (Vol. 1). <https://cdn.atlantaregional.org/wp-content/uploads/gsmm-2016-final.pdf>
- Ay, N., & Ünal, M. (2000). Use of waste ceramic tile in cement production. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 497–499. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00202-7)
- Balbo, J., Scarati Martins, J. R., Posser Cargnin, A., Ribeiro da Silva, E., Lo Ribeiro, H., & Prandi de Oliveira, I. (2022). *Ciclovía em pavimentos drenantes com concreto permeáveis para mitigação da impermeabilização de superfícies urbanas e redução do escoamento de águas pluviais com sua captação*.

- Batezini, R. (2013). *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. Universidade de Sao Paulo.
- Bhargav, M., & Kansal, R. (2020). Experimental Investigation to Substitute of Cement with Ceramic Tiles Powder in Concrete. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, Vol. 8(IX), 302–307.
- Castro, J., Solminihac, H. De, Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Materiales de Construcción*, Vol. 24(3), 271–284.
- Chen, G., Lee, H., Young, K. L., Yue, P. L., Wong, A., Tao, T., & Choi, K. K. (2002). Glass recycling in cement production-an innovative approach. *Waste Management*, 22(7), 747–753. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00047-8)
- Chen, L. M., Chen, J. W., Chen, T. H., Lecher, T., & Davidson, P. C. (2019). Measurement of permeability and comparison of pavements. *Water (Switzerland)*, 11(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w11030444>
- Chicaiza, C., & Guerra, G. (2017). *Estudio del uso de residuos cerámicos como sustituto de un porcentaje de cemento para la fabricación de morteros*. Universidad Central del Ecuador.
- Curry, K. C. (2018). Cement. En *U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK*. <https://www.trademining.com/index.jsp>.
- Díaz, S. (2022). *Análisis del uso de cerámica como alternativa sustentable de reemplazo parcial de cemento y áridos finos en hormigones*. Universidad de Concepción.
- Dieb, A. S. El, & Kanaan, D. M. (2018). Ceramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 17, e00063. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00063>

- Dong, Q., Wu, H., Huang, B., Shu, X., & Wang, K. (2013). Investigation into Laboratory Abrasion Test Methods for Pervious Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 886–892. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000683](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000683)
- Dos Santos Barreto, E., Vaz Stafanato, K., Marvila, M. T., Garcez De Azevedo, A. R., Ali, M., Lobo Pereira, R. M., & Monteiro, S. N. (2021). Clay ceramic waste as pozzolan constituent in cement for structural concrete. *Materials*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ma14112917>
- Du, H., & Tan, K. H. (2014). Waste glass powder as cement replacement in concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(11), 468–477. <https://doi.org/10.3151/jact.12.468>
- Dyer, T. D., & Dhir, R. K. (2001). Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, 412–417.
- El-Kattan, I. M., Abdelzahera, M. A., & Farghalib, A. A. (2020). Positive impact of ultra fine-ceramic waste on the physico-mechanical features and microstructure of white cement pastes composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.087>
- EN 12697-17 (2018). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 17: *Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes*. Madrid. España 2018.
- Ferrada, C. (2022). *Evaluación de mezclas de hormigones porosos con reemplazo parcial de cemento por residuos de vidrio o cerámica*. Universidad de Concepción.
- Federación Interamericana del Cemento [FICEM]. *El cemento, el concreto y su contribución en el desarrollo de ciudades sostenibles y resilientes*, 7th ed.; Cemento & Concreto de Iberoamérica y El Caribe: Bogotá, Colombia, 2020.

- Gaedicke, C., Marines, A., & Miankodila, F. (2014). Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *68*, 701–708.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.001>
- Gautam, L., Jain, J. K., Jain, A., & Kalla, P. (2022). Recycling of bone china ceramic waste as cement replacement to produce sustainable self-compacting concrete. *Structures*, *37*(January), 364–378. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.019>
- Giustozzi, F. (2016). Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. *Construction and Building Materials*, *111*, 502–512.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136>
- Gogula, A., Hossain, M., Romanoschi, S., & Fager, G. A. (2003). Correlation between the Laboratory and Field Permeability Values for the Superpave Pavements. *Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2003*.
<http://ctre.iastate.edu/pubs/midcon2003/gogulasuperpave.pdf>
- Gómez-Zamorano, L. Y., Iñiguez-Sánchez, C. A., & Lothenbach, B. (2015). Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas. *ALCONPAT*, *Vol.5*(1).
- Haselbach, L. M., & Freeman, R. M. (2006). Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement. *ACI Materials Journal*, *103*(6), 452–458.
<https://doi.org/10.14359/18223>
- Hernández, S., & Corredor, L. (2016). Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI. *Revista de Tecnología*, *15*(1), 57–76. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041529>
- INN. *Cemento — Terminología, clasificación y especificaciones generales*, NCh148.1968; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1968.

- INN. *Hormigón y mortero — Agua de amasado — Clasificación y requisitos*, NCh1498.2012; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2012.
- INN. *Hormigón — Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento*, NCh1017.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.
- INN. *Hormigón — Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*, NCh1037.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.
- INN. *Hormigón — Ensayo de tracción por flexión*, NCh1038.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.
- Islam, G. M. S., Rahman, M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 6(1), 37–44.
- Jawad, Z. F., Ghayyib, R. J., & Salman, A. J. (2020). Microstructural and compressive strength analysis for cement mortar with industrial waste materials. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(5), 1007–1016. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091524>
- Jiang, X., Xiao, R., Bai, Y., Huang, B., & Ma, Y. (2022). Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 340(October 2021), 130778. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130778>
- Kannan, D. M., Aboubakr, S. H., EL-Dieb, A. S., & Reda Taha, M. M. (2017). High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Construction and Building Materials*, Vol. 144, 35–41.

- Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2009). Evaluation of Pervious Concrete Workability Using Gyrotory Compaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1561(December). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21)
- Khatib, J. M., Negim, E. M., Sohl, H. S., & Chileshe, N. (2012). Glass Powder Utilisation in Concrete Production. *European Journal of Applied Sciences*, Vol. 4(4), 173–176.
- Khmiri, A., Chaabouni, M., & Samet, B. (2013). Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, 44, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>
- Kumar, P., B, A. M., & K, V. (2014). Effect of Partial Replacement of Cement With Waste Glass Powder on the Properties of concrete. *International Journal os Structural and Civil Engineering Research*, Vol. 3(2), 1–6.
- Lee, G., Ling, T. C., Wong, Y. L., & Poon, C. S. (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2611–2618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.008>
- Lehne, J., & Preston, F. (2018). *Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete* (p. 138). Chatam House. The Royal Institute of International Affairs.
- Li, A. Y., Qiao, H., Li, Q., Hakuzweyezu, T., & Chen, B. (2021). Study on the performance of pervious concrete mixed with waste glass powder. *Construction and Building Materials*, 300, 123997. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123997>

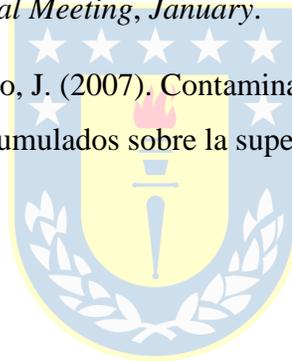
- Li, H., Kayhanian, M., & Harvey, J. T. (2013). Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *Journal of Environmental Management*, 118, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>
- Li, L. G., Zhuo, Z. Y., Zhu, J., Chen, J. J., & Kwan, A. K. H. (2019). Reutilizing ceramic polishing waste as powder filler in mortar to reduce cement content by 33% and increase strength by 85%. *Powder Technology*, 355, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.043>
- Li, L., Liu, W., You, Q., Chen, M., & Zeng, Q. (2020). Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. *Journal of Cleaner Production*, 259.
- Li, Q., Qiao, H., Li, A., & Li, G. (2022). Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. *Construction and Building Materials*, 324(January), 126531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531>
- Lim, N. H. A. S., Mohammadhosseini, H., Tahir, M. M., Samadi, M., & Sam, A. R. M. (2018). Microstructure and Strength Properties of Mortar Containing Waste Ceramic Nanoparticles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(10), 5305–5313. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3154-x>
- Lucke, T., Boogaard, F., & van de Ven, F. (2014). Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 22–35. <https://doi.org/10.1080/21650020.2014.893200>
- Malhotra, V. ., & Mehta, P. K. (1996). Pozzolanic and cementitious Materials. *Advances in Concrete Technology, Vol. 1*, 208.

- Malhotra, V. M. (1976). No-Fines Concrete – Its Properties and Applications. *American Concrete Institute*, 73, 628–644.
- Mas, M., Monzó, J., & Payá, J. (2016). Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement. *Advances in Cement Research*, 28(4), 221–232.
- Meena, R. V., Jain, J. K., Chouhan, H. S., & Beniwal, A. S. (2022). “Mechanical and durability performance of self-compacting concrete with waste ceramic tile as a replacement for natural river sand”. *Materials Today: Proceedings*, 60, 187–193.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.303>
- Mirzahosseini, M., & Riding, K. A. (2015). Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). *Cement and Concrete Composites*, 56, 95–105.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004>
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, Vol. 16, 698–699.
- Moruzá, G. M. (2016). *Development of a VDOT Special Provision for Pervious Concrete in Stormwater Management*. University of Virginia.
- Nassar, R. U. D., & Soroushian, P. (2012). Green and durable mortar produced with milled waste glass. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 64(7), 605–615.
- Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, Vol. 73, 271–282.
- Omran, A., & Tagnit-Hamou, A. (2016). Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*, Vol. 109, 84–95.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006>

- Ornelas, R. P., Guerrero, L. C., San Miguel, G. F., Álvarez, A. T., Guerra, & Delgadillo, H. M. (2015). Propiedades de pastas de cementos modificados con residuos industriales. *Ingenierías*, Vol. XVIII(68), 41–51.
- Oviedo, I., Pradena, M., Link, Ó., & Balbó, J. T. (2022). Using Natural Pozzolans to Partially Replace Cement in Pervious Concretes : A Sustainable Alternative ? *Sustainability*, 14(14122), 1–17.
- Pereira-De-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. S. (2012). The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, 31, 197–203.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>
- Potgieter, J. H. (2012). An Overview of Cement production: How “green” and sustainable is the industry? *Environmental Management and Sustainable Development*, Vol. 1(2), 14–37.
- Pradeep, A., A, A., Pc, M. S., Pv, V., & Thirumurgan, A. (2019). *Experimental investigation on cement with waste glass powder in pervious concrete*. 10(3), 98–102.
- Samadi, M., Warid, M., Seung, H., Rahman, A., Ismail, M., Hasanah, N., Farhayu, N., & N.Hafizan. (2015). Properties of mortar containing ceramic powder waste as cement replacement. *Jurnal Teknologi*, Vol. 77(12), 93–97.
- Schaefer, V. R., & Kevern, J. T. (2013). Installation and maintenance considerations for improved freeze-thaw durability of pervious concrete. *ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions - Proceedings of the 10th International Symposium on Cold Regions Development*, 459–470. <https://doi.org/10.1061/9780784412978.045>
- SERVIU Metropolitano. (2006). *Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias*. Servicio de Vivienda y Urbanización Metropolitano. Santiago, Chile.

- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30, 91–100.
- Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234–247.
- Sobolev, K., Türker, P., Soboleva, S., & Iscioglu, G. (2007). Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. *Waste Management*, 27(7), 971–976. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.014>
- Talsania, S., Pitroda, J., & Vyas., C. M. (2015). Experimental Investigation on Partial Replacement of Cement with waste glass powder on pervious concrete. *International Conference on: “Engineering: Issues, opportunities and Challenges for Development”*, 1–13.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). Pervious concrete pavement. En *International Journal of Civil Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1201/b17043-16>
- Torkittikul, P., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.004>
- Trapote Jaume, A. (2016). Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible. *Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 26–40. <https://doi.org/10.22507/jet.v5n2a1>
- Van Oss, H. G. (2000). Cement. En *U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK*.
- Vejmelková, E., Keppert, M., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Keršner, Z., & Černý, R. (2012). Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.018>

- Viera, P., & Chicaiza, C. (2018). Uso De Residuos Cerámicos Como Sustituto Del Cemento Para Fabricación De Morteros. *Ciencia*, 20(1), 34.
<https://doi.org/10.24133/ciencia.v20i1.554>
- Vijayakumar, G., Vishaliny, M. H., & Govindarajulu, D. (2013). Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2(2), 153–157.
- Villar, J. (2022). *Análisis del desempeño estructural y constructabilidad de pavimentos de hormigón permeable para estacionamiento*. Universidad de Concepción.
- Wu, H., Huang, B., Shu, X., Dong, Q., Shrum, E., Jared, D., & Wu, P. (2010). Laboratory Evaluation of Latex-Modified Pervious Concrete. *Transportation Research Board 89th Annual Meeting, January*.
- Zafra, C., Temprano, J., & Tejero, J. (2007). Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación*, 27(1), 4–10.



ANEXO 3.1 MÉTODO DE DOSIFICACIÓN

El método de dosificación utilizado corresponde al método desarrollado por Nguyen *et al.* (2014). El procedimiento para el diseño de mezclas se puede dividir en los siguientes pasos.

1. Determinar las propiedades de los áridos, granulometría, densidades y absorción.
2. Seleccionar la porosidad de diseño de la mezcla (V_v).
3. Seleccionar el parámetro k , que según diversos autores varía entre 1,064 y 1,233. Se recomienda la utilización de $k=1,116$.
4. Calcular el volumen de los áridos (V_G) de acuerdo con la Ecuación A.1.
El porcentaje de absorción de los áridos se estima según la proporción de árido fino y árido grueso según la Ecuación A.2.
5. Calcular la masa de árido fino y árido grueso de acuerdo a la proporción elegida según las Ecuaciones A.3 y A.4.
6. Determinar la razón agua/cemento según la prueba de drenaje del aglomerante.
7. Calcular el parámetro β según la Ecuación A.5.
8. Calcular el volumen de pasta de cemento (V_p) según la Ecuación A.6.
9. Calcular las masas de cemento y agua según Ecuaciones A.7 y A.8 respectivamente.

A continuación, se presentan las ecuaciones necesarias para el desarrollo del procedimiento de dosificación.

Cálculo del volumen de áridos (V_G):

$$V_G = \frac{1 - V_v}{a \cdot (k^3 - 1) + 1 + b} \quad (A.1)$$

Donde:

a : Porcentaje de áridos más grandes que 80 μm .

b : Porcentaje de absorción de los áridos.

k : Parámetro k determinado.

V_p : Porosidad de diseño determinada.

Porcentaje de absorción de los áridos (b):

$$b = C_{abs} A_g \cdot \% A_g + C_{abs} A_f \cdot \% A_f \quad (A.2)$$

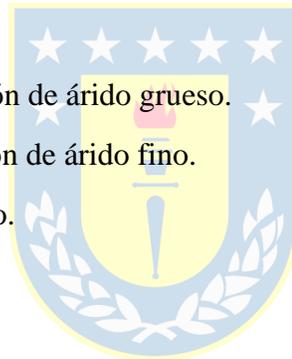
Donde:

$C_{abs} A_g$: Coeficiente de absorción de árido grueso.

$C_{abs} A_f$: Coeficiente de absorción de árido fino.

$\%A_g$: Porcentaje de árido grueso.

$\%A_f$: Porcentaje de árido fino.



Estimación de la cantidad de árido fino (A_f) y árido grueso (A_g):

$$A_f = V_G * \%A_f \quad (A.3)$$

$$A_g = V_G * (1 - \%A_f) \quad (A.4)$$

Cálculo de parámetro Beta:

$$\beta = \frac{3(k-1)}{a \cdot (k^3 - 1) + 1 + b} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^2 \quad (A.5)$$

Donde:

a : Porcentaje de áridos más grandes que 80 μm .

b : Porcentaje de absorción de los áridos.

k : Parámetro k determinado.

Estimación del volumen de pasta (V_p):

$$V_p = \beta \cdot (1 - V_v) \quad (A.6)$$



Masa de cemento (C) y masa de agua (A):

$$C = \frac{V_p}{\left(\frac{1}{\gamma_C} + \frac{w/c}{\gamma_A}\right)} \quad (A.7)$$

$$A = C \cdot (w/c) \quad (A.8)$$

Donde:

γ_C : Peso específico del cemento.

γ_A : Peso específico del agua.

w/c : Razón agua cemento.

ANEXO 4.1 RESULTADOS POR PROBETA

Tabla A.4.1 Densidad y resistencia a la compresión a los 7 días con compactación con pisón

Tipo de Mezcla	Colada	Densidad (kg/cm ³)	Resistencia (MPa)
S1-1	C1-1	2123,1	8,57
	C1-2	2189,2	10,33
	C1-3	2113,7	11,78
	C1-4	2217,5	11,02
	C1-5	2123,1	8,47
S1-2	C1-1	2142,0	10,37
	C1-2	2208,1	9,20
	C1-3	2142,0	9,67
	C1-4	2151,5	9,84
	C1-5	2170,3	10,49
S1-3	C1-1	2198,6	9,88
	C1-2	2226,9	10,74
	C1-3	2170,3	10,6
	C1-4	2198,6	10,83
	C1-5	2170,3	10,91
S1-4	C1-1	2151,5	9,95
	C1-2	2198,6	10,93
	C1-3	2160,9	8,93
	C1-4	2160,9	10,03
	C1-5	2170,3	9,59
S1-5	C11-1	2142	9,43
	C11-2	2104,3	7,80
	C11-3	2132,6	9,44
	C11-4	2142	9,45
	C11-5	2160,9	9,94

Tabla A.4.2 Densidad y resistencia a la compresión a los 28 días con compactación con pisón

Tipo de mezcla	Colada	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S1-1	C1-1	2160,9	16,15
	C1-2	2085,4	14,16
	C1-3	2094,8	14,96
	C1-4	2104,3	17,68
	C1-5	2104,3	18,09
S1-2	C1-1	2151,5	13,92
	C1-2	2179,8	17,01
	C1-3	2217,5	16,27
	C1-4	2208,1	15,56
	C1-5	2151,5	14,83
S1-3	C24-1	2198,6	14,54
	C24-2	2217,5	13,52
	C24-3	2198,6	16,01
	C24-4	2189,2	11,89
	C24-5	2236,4	16,25
S1-4	C7-1	2160,9	15,66
	C7-2	2160,9	14,36
	C7-3	2170,3	14,19
	C7-4	2151,5	16,28
	C7-5	2132,6	13,24
S1-5	C1-1	2198,6	15,37
	C1-2	2208,1	18,1
	C1-3	2198,6	15,7
	C1-4	2226,9	16,81
	C1-5	2170,3	16,08

Tabla A.4.3 Densidad y resistencia a la compresión a los 90 días con compactación con pisón

Tipo de mezcla	Colada	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S1-1	C1-1	2198,6	23,89
	C1-2	2198,6	19,7
	C1-3	2179,8	20,94
	C1-4	2132,6	21,27
	C1-5	2113,7	16,02
S1-2	C1-1	2179,8	20,04
	C1-2	2208,1	16,46
	C1-3	2170,3	18,17
	C1-4	2198,6	21,19
	C1-5	2179,8	19,05
S1-3	C1-1	2189,2	19,91
	C1-2	2198,6	20,05
	C1-3	2160,9	19,53
	C1-4	2170,3	18,49
	C1-5	2255,2	23,84
S1-4	C1-1	2179,8	20,36
	C1-2	2189,2	23,53
	C1-3	2142	18,06
	C1-4	2151,5	20,93
	C1-5	2236,4	18,54
S1-5	C1-1	2189,2	22,19
	C1-2	2198,6	26,62
	C1-3	2208,1	22,44
	C1-4	2179,8	22,54
	C1-5	2208,1	23,52

Tabla A.4.4 Densidad y resistencia a la flexotracción a los 7 días con compactación con pisón

Tipo de mezcla	Colada	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S1-1	C1-1	2076,2	1,96
	C1-2	2073,0	2,39
	C1-3	2098,4	2,00
	C1-4	2056,1	2,19
	C1-5	2063,5	2,16
S1-2	C1-1	2177,2	2,16
	C1-2	2189,4	1,91
	C1-3	2133,3	2,18
	C1-4	2113,4	1,80
	C1-5	2184,6	2,67
S1-3	C1-1	2156,3	2,48
	C1-2	2189,0	2,18
	C1-3	2148,4	2,1
	C1-4	2068,0	2,04
	C14-5	2113,1	1,95
S1-4	C1-1	2038,0	2,02
	C1-2	2070,1	1,96
	C1-3	2056,9	1,88
	C1-4	2035,8	1,87
	C1-5	2073,0	1,95
S1-5	C14-1	2144,3	1,71
	C14-2	2132,0	1,8
	C14-3	2153,5	2,00
	C14-4	2129,8	1,98
	C14-5	2113,1	1,95

Tabla A.4.5 Densidad y resistencia a la flexotracción a los 28 días con compactación con pisón

Tipo de mezcla	Colada	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S1-1	C4-1	2089,5	2,51
	C4-2	2059,4	2,64
	C4-3	2059,0	2,48
	C4-4	2053,2	2,54
	C5-5	2064,9	2,39
S1-2	C1-1	2170,4	2,98
	C1-2	2193,5	3,12
	C1-3	2156,6	3,15
	C1-4	2133,3	2,83
	C1-5	2139,3	3,06
S1-3	C27-1	2124,6	2,5
	C27-2	2115,9	2,65
	C27-3	2149,1	3,47
	C27-4	2178,1	3,01
	C27-5	2200,9	3,43
S1-4	C1-1	2087,9	2,7
	C1-2	2087,4	2,71
	C1-3	2072,9	2,75
	C1-4	2100,8	2,99
	C1-5	2109,2	2,29
S1-5	C1-1	2110,9	3,02
	C1-2	2143,3	3,09
	C1-3	2195,8	3,63
	C1-4	2113,3	2,7
	C1-5	2166,6	3,17

Tabla A.4.6 Densidad y resistencia a la flexotracción a los 90 días con compactación con pisón

Tipo de mezcla	Colada	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S1-1	C5-1	2081,3	3,10
	C5-2	2079,7	2,98
	C5-3	2080,4	3,36
	C5-4	2067,3	3,18
	C5-5	2051,8	2,91
S1-2	C1-1	2109,3	3,06
	C1-2	2152,1	3,22
	C1-3	2116,0	3,57
	C1-4	2175,3	3,2
	C1-5	2123,7	3,1
S1-3	C1-1	2128,5	3,35
	C1-2	2160,1	3,99
	C1-3	2133,6	3,68
	C1-4	2144,4	3,52
	C1-5	2183,7	4,00
S1-4	C1-1	2090,0	3,43
	C1-2	2133,3	4,01
	C1-3	2090,2	3,67
	C1-4	2086,3	3,8
	C1-5	2175,4	4,3
S1-5	C1-1	2127,2	3,43
	C1-2	2151,0	3,97
	C1-3	2151,3	3,62
	C1-4	2127,2	3,52
	C1-5	2135,8	3,42

Tabla A.4.7 Permeabilidad de probetas compactadas con pisón

Tipo de mezcla	Repetición	Diámetro [m]	Altura [m]	Tiempos 40-20 [s]	Permeabilidad [cm/s]
S1-1	1	0,15	0,3	31,96	0,45
		0,15	0,3	33,09	0,44
		0,15	0,3	33,44	0,43
	2	0,15	0,3	20,82	0,69
		0,15	0,3	20,77	0,69
		0,15	0,3	21,24	0,68
	3	0,15	0,3	25,63	0,56
		0,15	0,3	25,91	0,56
		0,15	0,3	25,85	0,56
	4	0,15	0,3	21,44	0,67
		0,15	0,3	21,28	0,68
		0,15	0,3	21,21	0,68
	5	0,15	0,3	15,97	0,90
		0,15	0,3	15,23	0,95
		0,15	0,3	15,45	0,93
S1-2	1	0,15	0,3	44,5	0,32
		0,15	0,3	44,26	0,33
		0,15	0,3	44,36	0,33
	2	0,15	0,3	43,6	0,33
		0,15	0,3	44,49	0,32
		0,15	0,3	45,63	0,32
	3	0,15	0,3	41,94	0,34
		0,15	0,3	43,83	0,33
		0,15	0,3	44,75	0,32
	4	0,15	0,3	34,59	0,42
		0,15	0,3	32,51	0,44
		0,15	0,3	32,34	0,45
	5	0,15	0,3	42,29	0,34
		0,15	0,3	43,07	0,33
		0,15	0,3	43,96	0,33
S1-3	1	0,15	0,3	48,39	0,30
		0,15	0,3	49,86	0,29
		0,15	0,3	48,14	0,30
	2	0,15	0,3	58,57	0,25
		0,15	0,3	63,46	0,23
		0,15	0,3	64,43	0,22
	3	0,15	0,3	30,93	0,47
		0,15	0,3	32,6	0,44
		0,15	0,3	31,17	0,46
	4	0,15	0,3	83,27	0,17
		0,15	0,3	89,96	0,16
		0,15	0,3	85,02	0,17
	5	0,15	0,3	48,39	0,30
		0,15	0,3	49,86	0,29
		0,15	0,3	48,14	0,30
S1-4	1	0,15	0,3	19,17	0,75
		0,15	0,3	18,9	0,76
		0,15	0,3	18,9	0,76

	2	0,15	0,3	38,84	0,37
		0,15	0,3	37,67	0,38
		0,15	0,3	37,68	0,38
	3	0,15	0,3	18,09	0,80
		0,15	0,3	17,85	0,81
		0,15	0,3	17,6	0,82
	4	0,15	0,3	27,76	0,52
		0,15	0,3	27,58	0,52
		0,15	0,3	25,95	0,56
	5	0,15	0,3	23,17	0,62
		0,15	0,3	23,25	0,62
		0,15	0,3	23,95	0,60
S1-5	1	0,15	0,3	22,33	0,65
		0,15	0,3	22,86	0,63
		0,15	0,3	21,63	0,67
	2	0,15	0,3	27,5	0,52
		0,15	0,3	26,88	0,54
		0,15	0,3	26,9	0,54
	3	0,15	0,3	38,47	0,37
		0,15	0,3	37,7	0,38
		0,15	0,3	37,88	0,38
	4	0,15	0,3	24,69	0,58
		0,15	0,3	24,87	0,58
		0,15	0,3	24,09	0,60
	5	0,15	0,3	34,4	0,42
		0,15	0,3	34,73	0,42
		0,15	0,3	35,25	0,41

Tabla A.4.8 Abrasión con método ASTM C1747

Mezcla	Masa inicial (kg)	Masa final (kg)	Masa perdida (%)
S3-1	11,042	6,603	40%
S3-2	9,439	5,082	43%
S3-3	10,294	5,891	46%

Tabla A.4.9 Abrasión con método Cantabro S3-1

Masa (kg)	PC-C (1)	PC-C (2)	PC-C (3)	PC-C (4)	PC-C (5)
Inicial	3,573	3,597	3,469	3,693	3,092
50 Rev	3,406	3,401	3,355	3,55	2,859
% Pérdida de masa 50 Rev	5%	5%	3%	4%	8%
100 Rev	3,274	3,263	3,254	3,417	2,693
% Pérdida de masa 100 Rev	8%	9%	6%	7%	13%
150 Rev	3,142	3,152	3,119	3,229	2,545
% Pérdida de masa 150 Rev	12%	12%	10%	13%	18%
200 Rev	2,981	2,903	2,953	3,078	2,492
% Pérdida de masa 200 Rev	17%	19%	15%	17%	19%
250 Rev	2,845	2,779	2,832	2,922	2,339
% Pérdida de masa 250 Rev	20%	23%	18%	21%	24%
300 Rev	2,699	2,636	2,721	2,82	1,967
% Pérdida de masa 300 Rev	24%	27%	22%	24%	36%

Tabla A.4.10 Abrasión con método Cantabro S3-2

Masa (kg)	PC-C (1)	PC-C (2)	PC-C (3)	PC-C (4)	PC-C (5)
Inicial	3,237	3,171	3,238	3,368	3,194
50 Rev	3,049	2,985	3,054	3,127	3,04
% Pérdida de masa 50 Rev	6%	6%	6%	7%	5%
100 Rev	2,855	2,825	2,918	3,018	2,921
% Pérdida de masa 100 Rev	12%	11%	10%	10%	9%
150 Rev	2,628	2,612	2,8	2,909	2,78
% Pérdida de masa 150 Rev	19%	18%	14%	14%	13%
200 Rev	2,487	2,495	2,635	2,77	2,633
% Pérdida de masa 200 Rev	23%	21%	19%	18%	18%
250 Rev	2,347	2,408	2,502	2,681	2,385
% Pérdida de masa 250 Rev	27%	24%	23%	20%	25%
300 Rev	2,11	2,18	2,387	2,437	2,395
% Pérdida de masa 300 Rev	35%	31%	26%	28%	25%

Tabla A.4.11 Abrasión con método Cantabro S3-3

Masa (kg)	PC-C (1)	PC-C (2)	PC-C (3)	PC-C (4)	PC-C (5)
Inicial	2,995	3,244	3,192	3,23	3,177
50 Rev	2,815	3,062	2,996	3,074	3,025
% Pérdida de masa 50 Rev	6%	6%	6%	5%	5%
100 Rev	2,678	2,943	2,829	2,934	2,893
% Pérdida de masa 100 Rev	11%	9%	11%	9%	9%
150 Rev	2,525	2,808	2,688	2,827	2,778
% Pérdida de masa 150 Rev	16%	13%	16%	12%	13%
200 Rev	2,384	2,661	2,57	2,697	2,61
% Pérdida de masa 200 Rev	20%	18%	19%	17%	18%
250 Rev	2,276	2,57	2,389	2,575	2,441
% Pérdida de masa 250 Rev	24%	21%	25%	20%	23%
300 Rev	2,06	2,402	2,241	2,46	2,294
% Pérdida de masa 300 Rev	31%	26%	30%	24%	28%

Tabla A.4.12 Densidad y resistencia a la flexotracción en losetas compactadas con rodillo

Tipo de mezcla	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S4-1	2008,8	2,04
	2039,0	1,77
	1963,2	2,05
	2077,6	1,85
	1949,0	1,93
S4-2	1970,9	1,77
	2008,0	1,79
	1986,8	1,79
	1960,6	1,9
	1943,5	1,44

Tabla A.4.13 Permeabilidad de losetas compactadas con rodillo

Permeámetro NCAT			h1 (cm)	h2 (cm)	k (cm/s)	k (cm/s)
S5-1	t1 (s)	2,65	8	3	5,5518637	5,42387639
	t2 (s)	2,76	8	3	5,33059377	
	t3 (s)	2,73	8	3	5,38917172	
S5-2	t1 (s)	6,17	11	4	2,4593215	2,46740225
	t2 (s)	6,1	11	4	2,48754323	
	t3 (s)	6,18	11	4	2,45534202	
S5-3	t1 (s)	5,64	11	4	2,69042796	2,66251945
	t2 (s)	5,66	11	4	2,68092114	
	t3 (s)	5,8	11	4	2,61620925	

Tabla A.4.14 Infiltración de losetas compactadas con rodillo

Infiltrómetro			Masa (kg)	I (mm/h)	I (cm/s)	I (cm/s)
S5-1	t1 (s)	63,64	18	14998,9424	0,41663729	0,42018778
	t2 (s)	63,29	18	15081,8881	0,41894133	
	t3 (s)	62,39	18	15299,4501	0,42498473	
S5-2	t1 (s)	34,99	3,6	5456,03141	0,15155643	0,15102507
	t2 (s)	35,6	3,6	5362,54323	0,14895953	
	t3 (s)	34,76	3,6	5492,13288	0,15255925	
S5-3	t1 (s)	32,18	3,6	5932,45926	0,16479053	0,16718228
	t2 (s)	32,74	3,6	5830,98775	0,16197188	
	t3 (s)	30,34	3,6	6292,23925	0,17478442	

Tabla A.4.15 Resistencia a la compresión de mezclas usadas en el tramo de pavimento a los 28 días

Tipo de mezcla	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
S6-1	2170,3	19,96
	2179,8	17,16
	2179,8	15,98
	2217,5	19,9
	2208,1	17,8
S6-2	2255,2	17,28
	2236,4	19,12
	2236,4	18,48
	2236,4	21,13
	2255,2	18,13
S6-3	2189,2	16,35
	2198,6	18,25
	2198,6	15,09
	2179,8	17,4
	2189,2	19,33

Tabla A.4.16 Permeabilidad del tramo de pavimento con NCAT

Permeámetro NCAT			h1 (cm)	h2 (cm)	k (cm/s)
PC-C (1)	t1 (s)	3,53	8	4	2,94538462
	t2 (s)	3,54	8	4	2,93706432
	t3 (s)	3,5	8	4	2,97063077
PC-C (2)	t1 (s)	1,92	8	4	5,41521235
	t2 (s)	2,09	8	4	4,97474053
	t3 (s)	2,2	8	4	4,7260035
PC-C (3)	t1 (s)	1,49	8	4	6,97799175
	t2 (s)	1,46	8	4	7,12137514
	t3 (s)	1,82	8	4	5,71275149
PC-C (4)	t1 (s)	8,23	8	4	1,26333022
	t2 (s)	8,92	8	4	1,16560625
	t3 (s)	9,28	8	4	1,12038876
PC-C (5)	t1 (s)	9,86	8	4	1,05448354
	t2 (s)	10,65	8	4	0,97626363
	t3 (s)	11,08	8	4	0,93837615
PC-C (6)	t1 (s)	12,11	8	4	0,85856381
	t2 (s)	12,42	8	4	0,83713428
	t3 (s)	12,78	8	4	0,81355303
PC-20GP (1)	t1 (s)	12,37	8	4	0,840518
	t2 (s)	12,79	8	4	0,81291694
	t3 (s)	13,12	8	4	0,7924701
PC-20GP (2)	t1 (s)	11,01	8	4	0,94434221
	t2 (s)	11,2	8	4	0,92832212
	t3 (s)	12,04	8	4	0,86355546
PC-20GP (3)	t1 (s)	5,82	8	4	1,78646181
	t2 (s)	6,4	8	4	1,6245637
	t3 (s)	6,56	8	4	1,5849402
PC-10CP (1)	t1 (s)	2,41	5	3	3,1794126
	t2 (s)	2,23	5	3	3,4360468
	t3 (s)	2,2	5	3	3,48290198
PC-10CP (2)	t1 (s)	1,96	5	3	3,90937977
	t2 (s)	1,98	5	3	3,86989109
	t3 (s)	1,78	5	3	4,30471031
PC-10CP (3)	t1 (s)	2,6	5	3	2,94707091
	t2 (s)	2,59	5	3	2,95844956
	t3 (s)	2,42	5	3	3,16627453

Tabla A.4.17 Infiltración del tramo de pavimento con anillo infiltrómetro

Infiltrómetro			Masa (kg)	I (mm/h)	I (cm/s)
PC-C (1)	t1 (s)	75,37	3,6	2532,924757	0,07035902
	t2 (s)	78,36	3,6	2436,275382	0,06767432
	t3 (s)	77,37	3,6	2467,449127	0,06854025
PC-C (2)	t1 (s)	36,89	3,6	5175,021386	0,14375059
	t2 (s)	38,36	3,6	4976,708523	0,1382419
	t3 (s)	36,91	3,6	5172,217257	0,1436727
PC-C (3)	t1 (s)	112,93	18	8452,428006	0,23478967
	t2 (s)	105,99	18	9005,875033	0,2501632
	t3 (s)	106,49	18	8963,589959	0,24898861
PC-C (4)	t1 (s)	132,38	3,6	1442,110129	0,04005861
	t2 (s)	138,66	3,6	1376,79604	0,03824433
	t3 (s)	135,63	3,6	1407,553926	0,03909872
PC-C (5)	t1 (s)	207,23	3,6	921,2302222	0,02558973
	t2 (s)	214,54	3,6	889,8412368	0,02471781
	t3 (s)	231,83	3,6	823,4764221	0,02287435
PC-C (6)	t1 (s)	100,86	3,6	1892,787418	0,05257743
	t2 (s)	103,55	3,6	1843,616986	0,05121158
	t3 (s)	101,25	3,6	1885,496681	0,05237491
PC-20GP (1)	t1 (s)	129,93	3,6	1469,303001	0,04081397
	t2 (s)	126,48	3,6	1509,381238	0,04192726
	t3 (s)	125,34	3,6	1523,109454	0,0423086
PC-20GP (2)	t1 (s)	102,54	3,6	1861,776272	0,05171601
	t2 (s)	93,12	3,6	2050,113176	0,05694759
	t3 (s)	88,25	3,6	2163,2469	0,06009019
PC-20GP (3)	t1 (s)	83,07	3,6	2298,140592	0,06383724
	t2 (s)	84,12	3,6	2269,454814	0,06304041
	t3 (s)	98,47	3,6	1938,727927	0,05385355
PC-10CP	t1 (s)	112,41	18	8491,528287	0,23587579
	t2 (s)	113,05	18	8443,455946	0,23454044
	t3 (s)	111,8	18	8537,859523	0,23716276
PC-10CP	t1 (s)	67,22	3,6	2840,025869	0,07888961
	t2 (s)	75,77	3,6	2519,553107	0,06998759
	t3 (s)	78,29	3,6	2438,453684	0,06773482
PC-10CP	t1 (s)	73,64	3,6	2592,429915	0,07201194
	t2 (s)	77,39	3,6	2466,811461	0,06852254
	t3 (s)	75,82	3,6	2517,891571	0,06994143

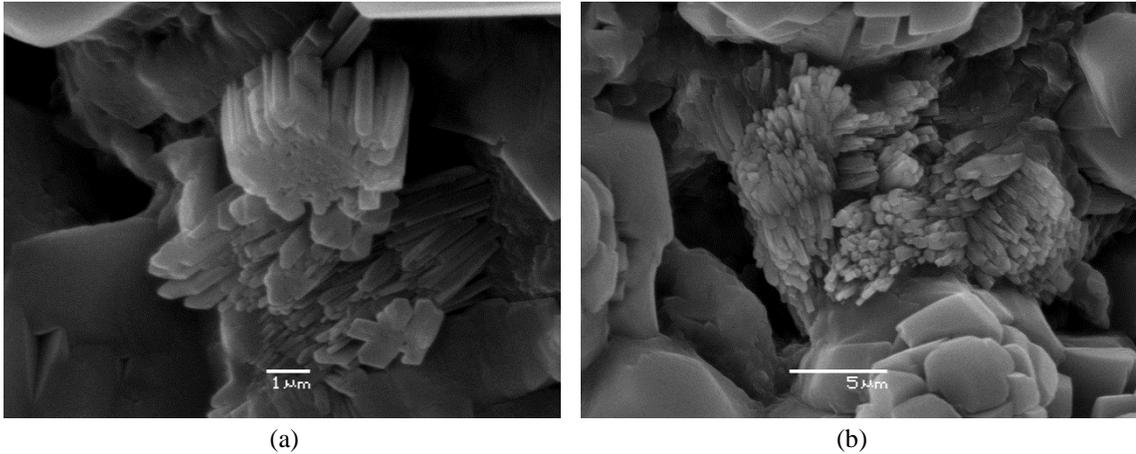
ANEXO 4.2 IMÁGENES COMPLEMENTARIAS SEM

Figura A4.1. Imágenes SEM de la microestructura de S2-1: (a) Matriz cementicia con poros y cristales de CH; (b) Matriz cementicia con poros y cristales de CH

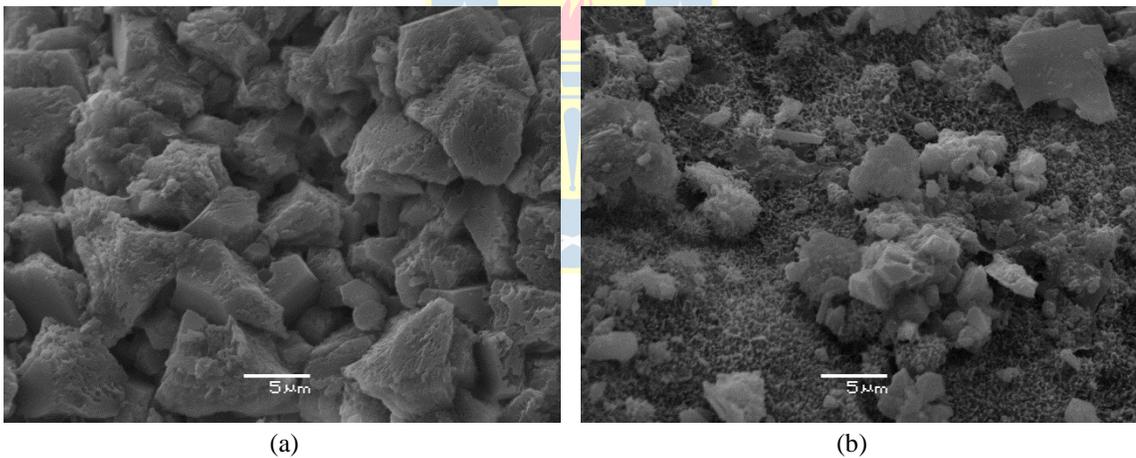


Figura A4.2. Imágenes SEM de la microestructura de S2-2: (a) Matriz cementicia y cristales de CH; (b) CSH en la matriz cementicia

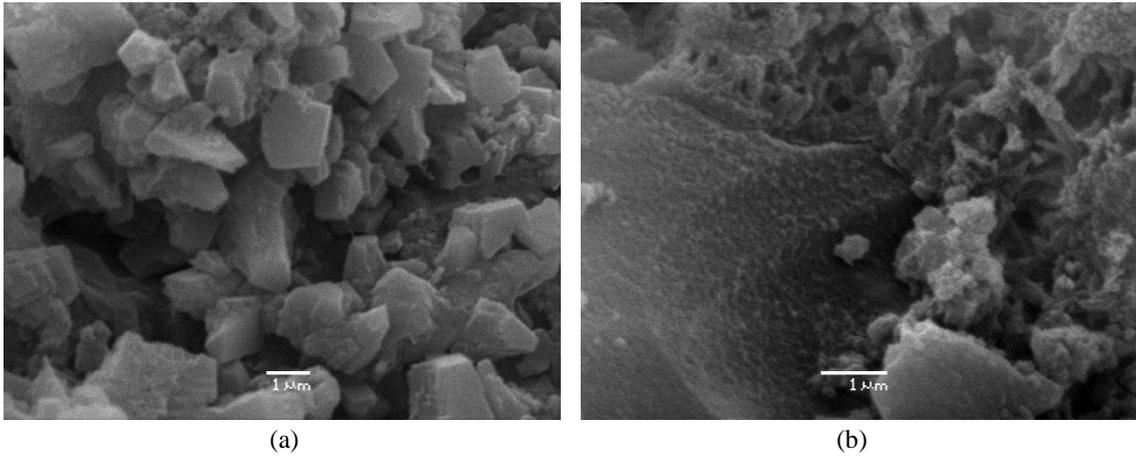


Figura A4.3. Imágenes SEM de la microestructura de S2-3: (a) Matriz cementicia y cristales de CH; (b) CSH en la matriz cementicia



ANEXO 4.3 GRÁFICOS EDS ASOCIADOS A LA MINERALOGÍA

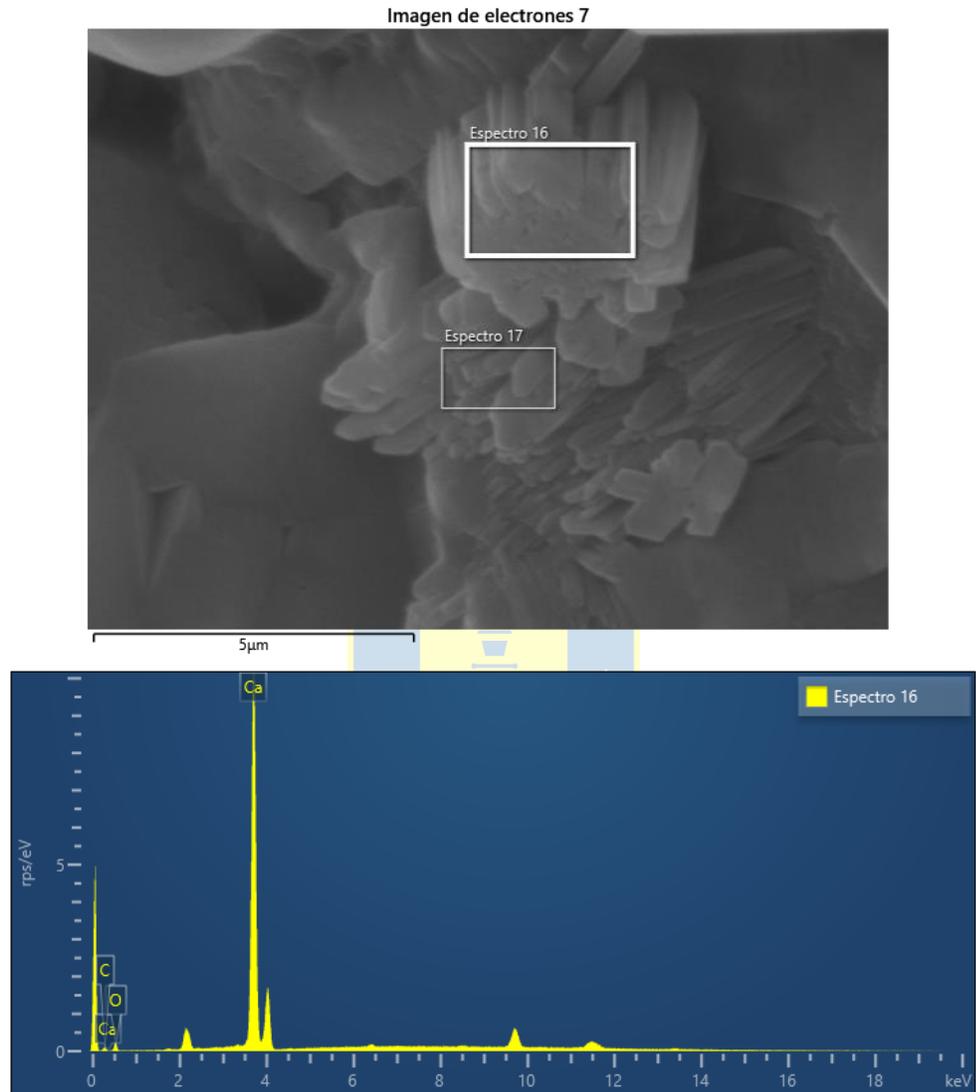


Figura A4.4. Imagen SEM de la microestructura de S2-1 y EDS asociado a CH

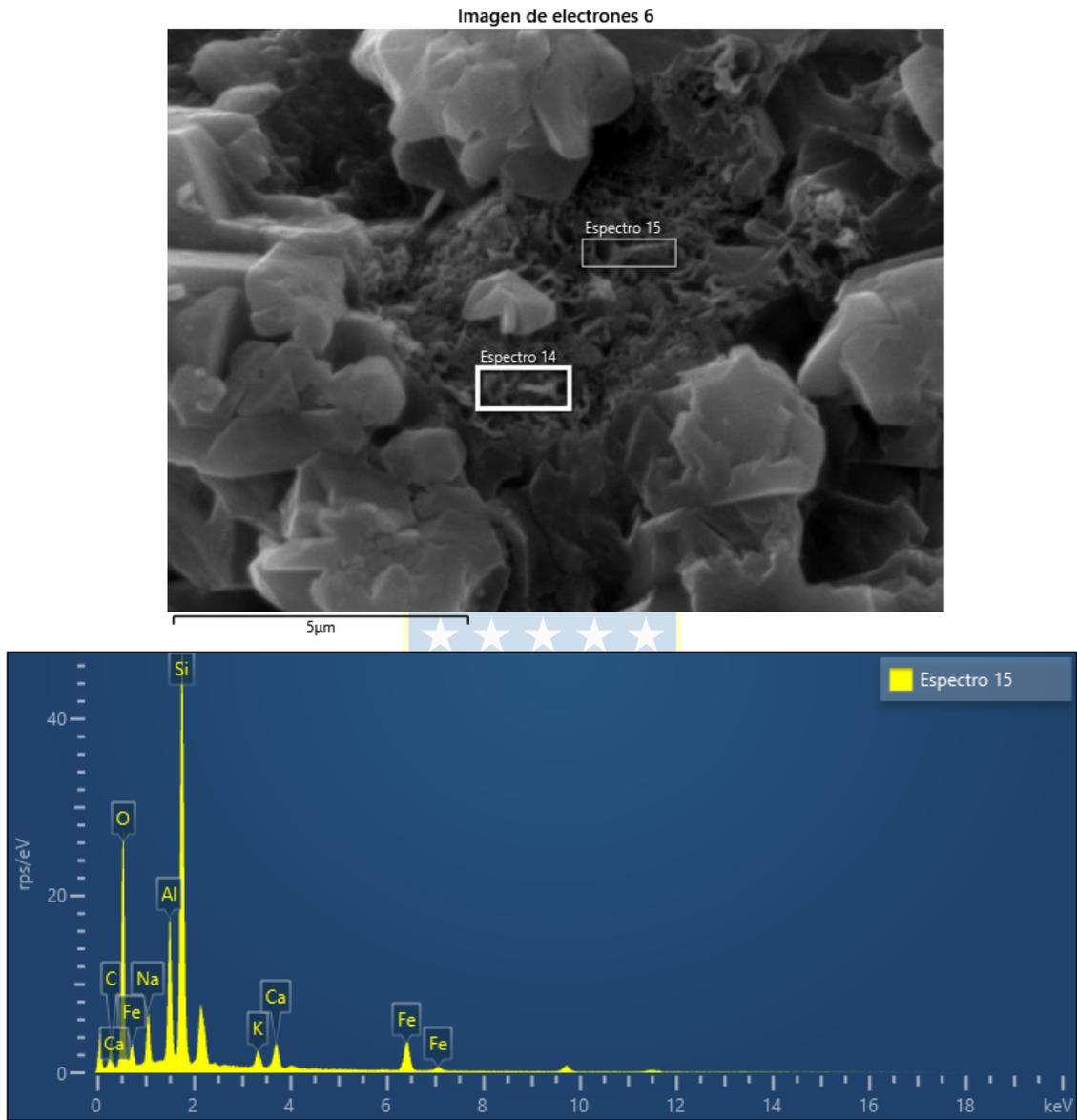


Figura A4.5. Imagen SEM de la microestructura de S2-1 y EDS asociado a CSH

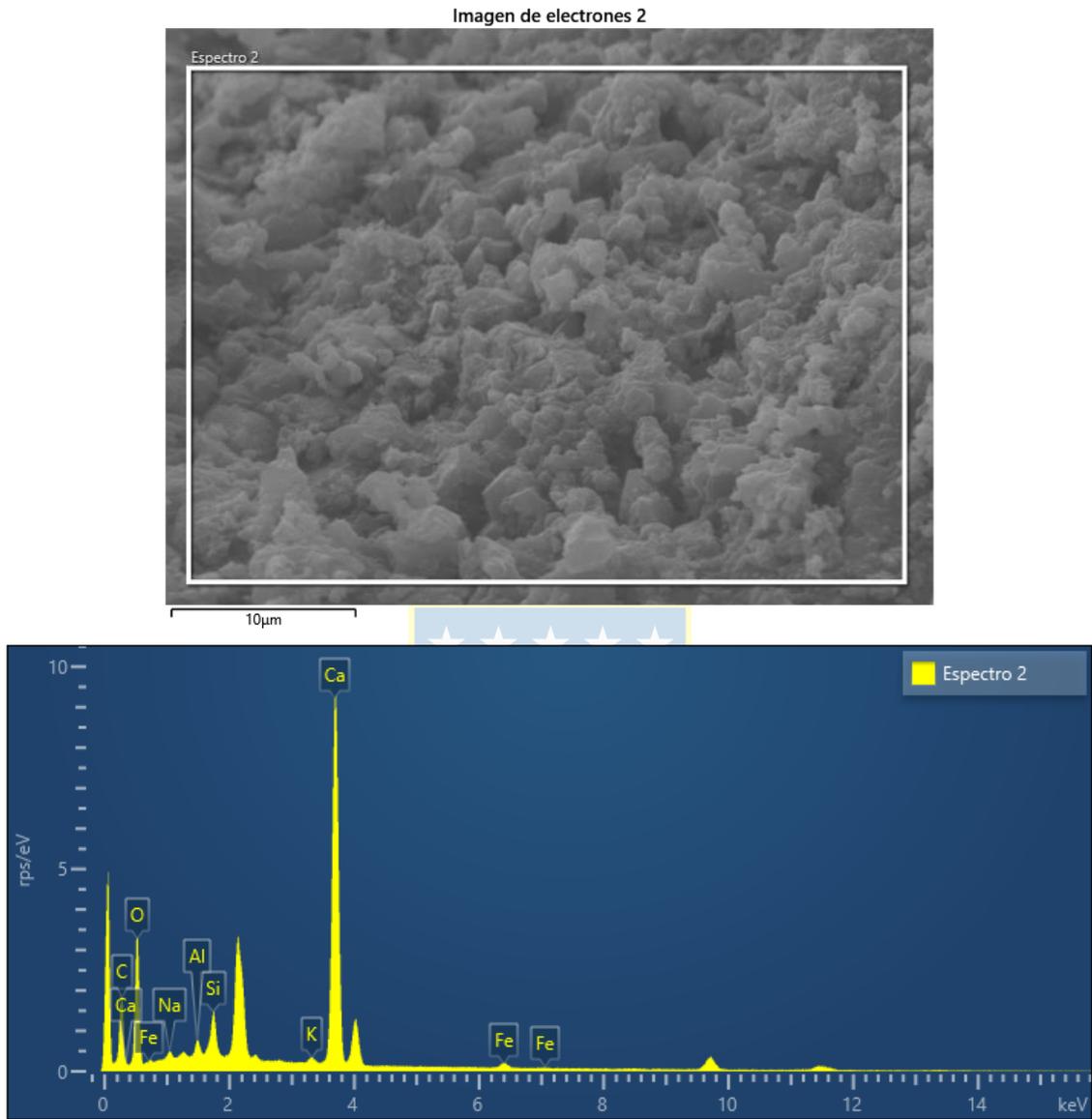


Figura A4.6. Imagen SEM de la microestructura de S2-2 y EDS asociado a CH

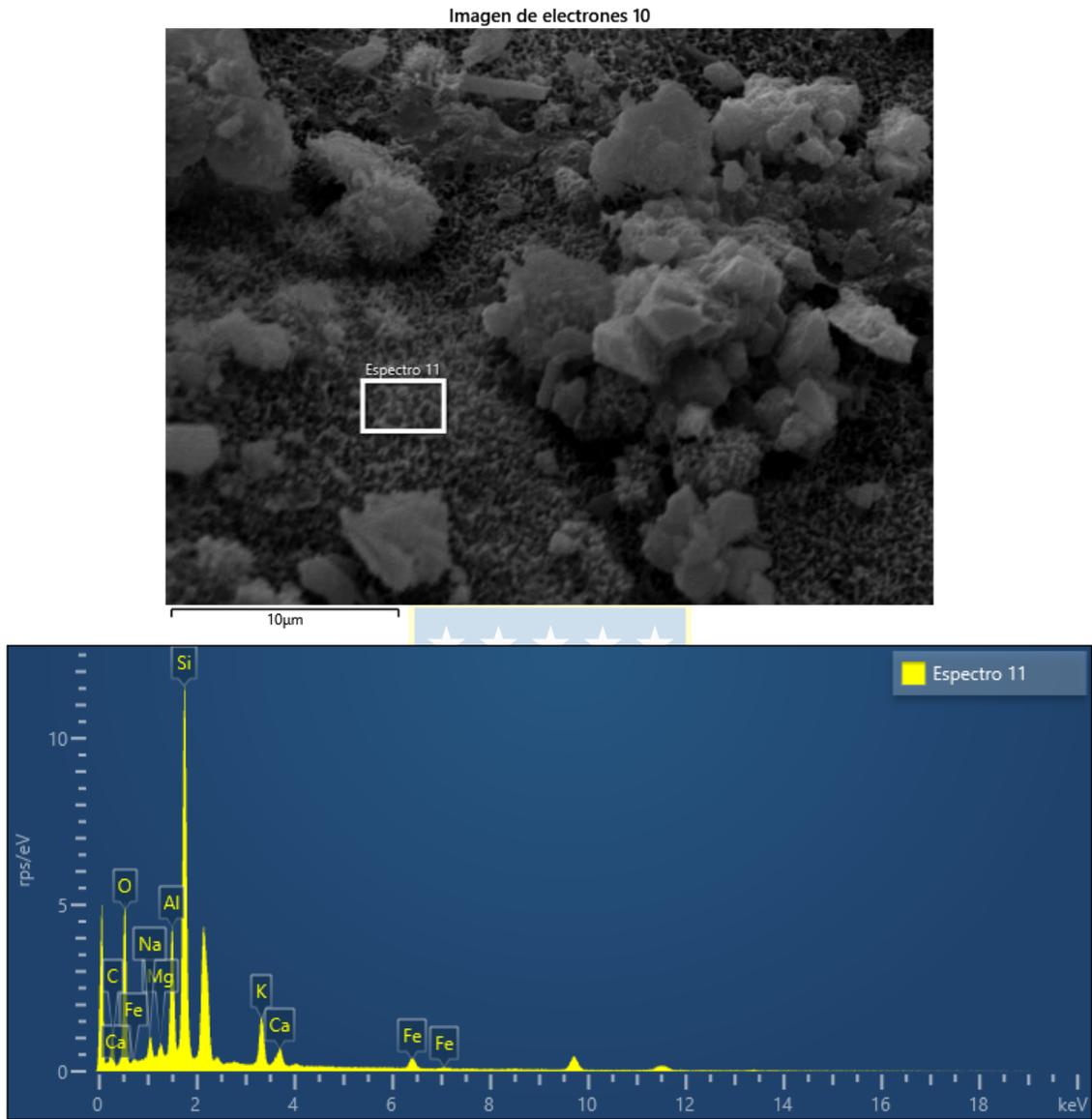


Figura A4.7. Imagen SEM de la microestructura de S2-2 y EDS asociado a CSH

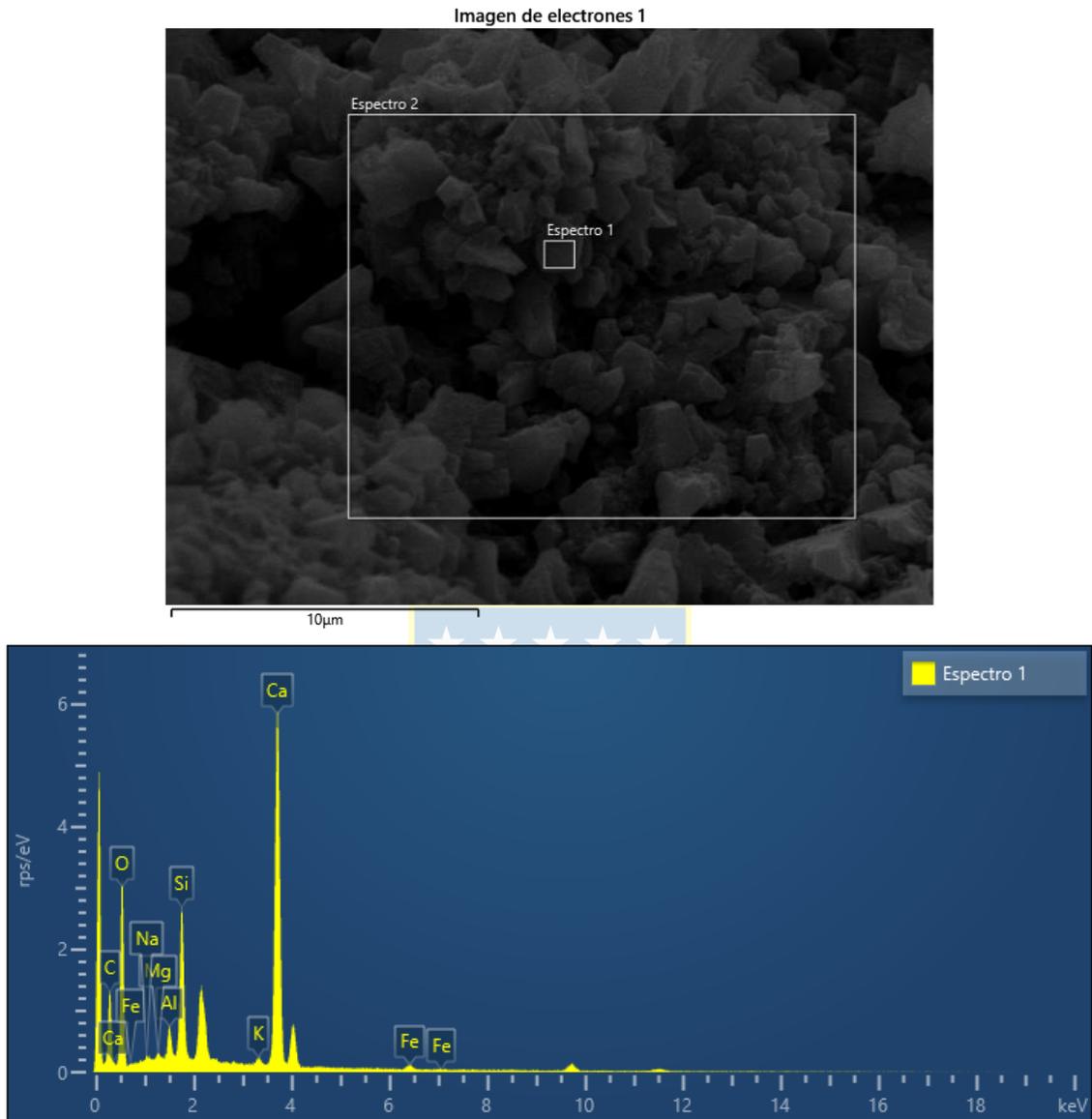


Figura A4.8. Imagen SEM de la microestructura de S2-3 y EDS asociado a CH

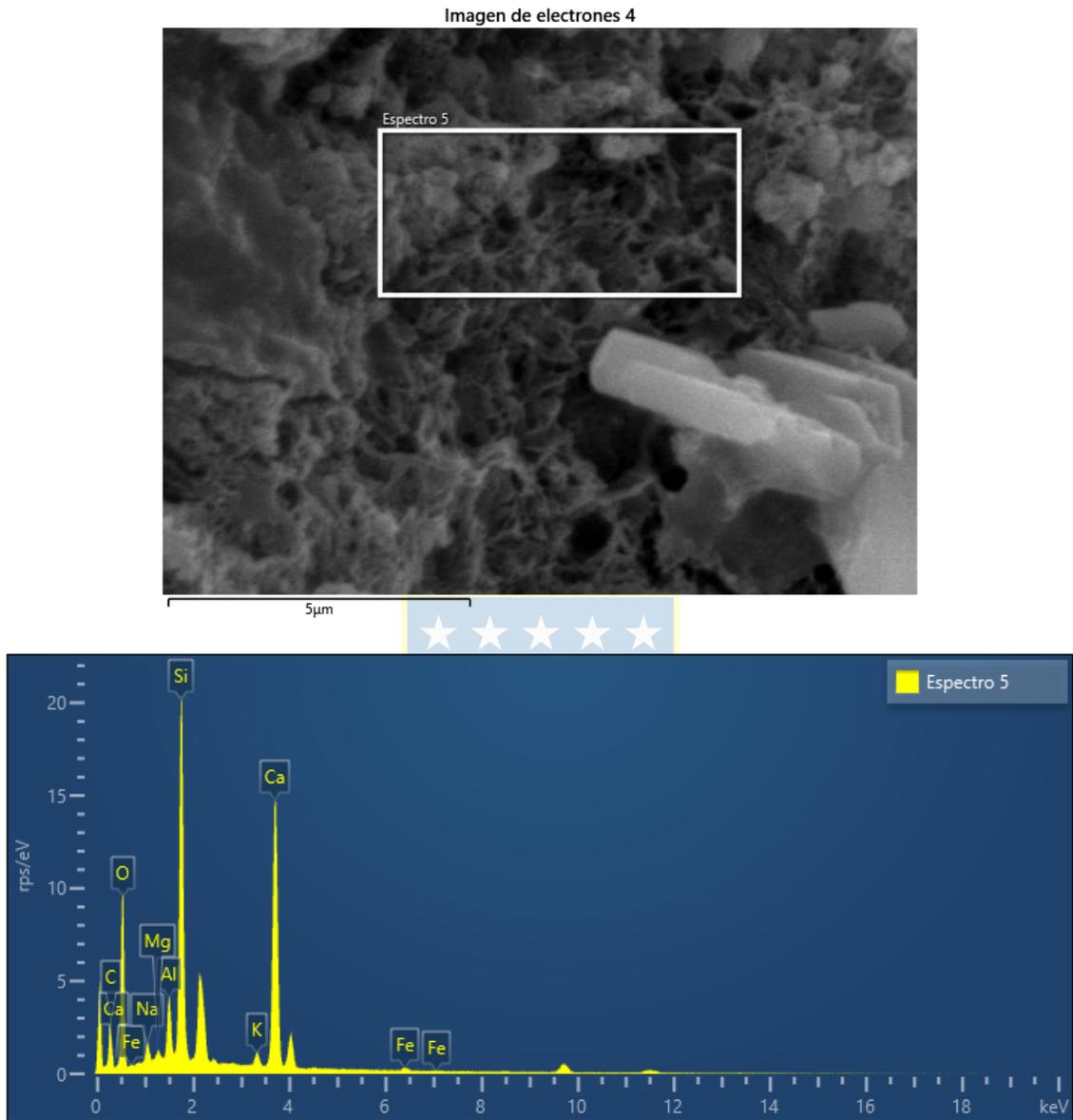


Figura A4.9. Imagen SEM de la microestructura de S2-3 y EDS asociado a CSH