



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería

**EVALUACIÓN DE HORMIGONES PERMEABLES CON ZEOLITA O
POMACITA COMO MATERIAL DE REEMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO**

**(Evaluation of pervious concretes with zeolite or pumicite as a partial
replacement material of cement)**



POR

IGNACIO JAVIER OVIEDO QUINTEROS

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería para optar al grado de Magíster en
Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil

Profesor Guía: Dr. Mauricio Alejandro Pradena Miquel

octubre, 2022
Concepción, Chile

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





A toda mi familia y amigos...

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 para llevar a cabo la investigación.

Agradezco al Laboratorio de Hormigones del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción por permitir el uso de sus instalaciones y a su personal por el apoyo y soporte en la etapa de investigación.

Agradezco de forma especial al profesor Cristian Melipichún por su disposición y ayuda para el tratamiento de minerales y permitir el uso de las dependencias del Laboratorio de Procesamiento de Minerales de Metalurgia de la Universidad de Concepción.

Quisiera agradecer de forma especial al Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción (GEA) y a su director, profesor Óscar Jerez, por su disposición y apoyo en la investigación.

Quisiera agradecer al Centro de Espectroscopía y Microscopía (CESMI) de la universidad de Concepción y a su personal encargado, por proveer a la investigación con imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de muestras y minerales utilizados.

Finalmente, agradezco al profesor guía de esta investigación, Mauricio Pradena, por su interés, disposición y apoyo a lo largo de todo el trabajo, y a mi comisión, profesor Óscar Link por su disposición y recomendaciones para el correcto desarrollo y término de la investigación.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivo general.....	2
1.4. Objetivos específicos	3
1.5. Metodología	3
1.6. Estructura de la tesis	4
CAPÍTULO 2: HORMIGÓN PERMEABLE Y PUZOLANAS NATURALES.....	5
2.1. Introducción	5
2.2. Hormigones permeables.....	5
2.3. Pozolanas naturales como reemplazo parcial del cemento	7
2.4. Utilización de aditivos	9
2.5. Conclusiones	10
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODO	11
3.1. Introducción	11
3.2. Materiales	11
3.2.1. Agua.....	11
3.2.2. Cemento.....	11
3.2.3. Árido fino	12
3.2.4. Árido grueso.....	13
3.2.5. Zeolita	14
3.2.6. Pomacita	15

3.2.7. Aditivo	16
3.3. Variables para caracterizar hormigones permeables.....	17
3.3.1. Trabajabilidad.....	17
3.3.2. Resistencia a compresión	19
3.3.3. Resistencia a flexotracción.....	20
3.3.4. Permeabilidad	21
3.3.5. Porosidad	23
3.3.6. Microanálisis	23
3.4. Series experimentales	24
3.5. Experimentación	25
3.5.1. Dosificaciones de diseño de hormigones permeables	26
3.5.2. Procedimiento de confección de muestras.....	28
3.6. Conclusiones	30
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	31
4.1. Introducción	31
4.2. Serie 0: Resultados previos con método de diseño.....	31
4.3. Serie 1: Selección de mejores muestra de referencia	34
4.3.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas	34
4.4. Serie 2: Efectos de incorporar zeolita o pomacita.....	37
4.4.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas con zeolita	37
4.4.2. Propiedades mecánicas e hidráulicas con pomacita.....	39
4.4.3. Análisis microscópico por SEM	42
4.5. Serie 3: Efectos de incorporación de aditivo junto con puzolana.....	45
4.5.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas	45

4.6. Conclusiones	48
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	50
5.1. Discusión	50
5.2. Conclusiones	52
REFERENCIAS	55
ANEXO 3.1: Distribuciones granulométricas de áridos	65
ANEXO 3.2: Detalles del método de diseño para dosificaciones	66
ANEXO 4.1: Propiedades de muestras en Serie 0	71
ANEXO 4.2: Propiedades de muestras en Serie 1	75
ANEXO 4.3: Propiedades de muestras en Serie 2 con zeolita	79
ANEXO 4.4: Propiedades de muestras en Serie 2 con pomacita	83
ANEXO 4.5: Imágenes complementarias SEM	87
ANEXO 4.6: Propiedades de muestras en Serie 3 con aditivo	89

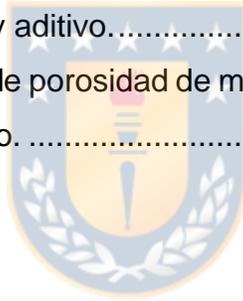
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Características del cemento.....	12
Tabla 3.2. Propiedades de árido fino y árido grueso.....	13
Tabla 3.3. Series experimentales y características.....	25
Tabla 3.4. Dosificaciones de mezclas para experimentación en kg/m ³	27
Tabla A.3.1.1. Distribución granulométrica de árido grueso.	65
Tabla A.3.1.2 Distribución granulométrica de árido fino.....	65
Tabla A.3.2.1. Datos de entrada en método de diseño Nguyen (2014) para muestras con relación A/C de 0,39.	69
Tabla A.3.2.2. Datos de entrada en método de diseño Nguyen (2014) para muestras con relación A/C de 0,35.	70
Tabla A.4.1.1. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,39-10 en Serie 0.	71
Tabla A.4.1.2. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,39-15 en Serie 0.	71
Tabla A.4.1.3. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,39-20 en Serie 0.	71
Tabla A.4.1.4. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,35-10 en Serie 0.	72
Tabla A.4.1.5. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,35-15 en Serie 0.	72
Tabla A.4.1.6. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,35-20 en Serie 0.	72
Tabla A.4.1.7. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,39-10 en Serie 0.	73
Tabla A.4.1.8. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,39-15 en Serie 0.	73

Tabla A.4.1.9. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,39-20 en Serie 0.	73
Tabla A.4.1.10. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,35-10 en Serie 0.....	74
Tabla A.4.1.11. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,35-15 en Serie 0.....	74
Tabla A.4.1.12. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,35-20 en Serie 0.....	74
Tabla A.4.2.1. Resultados resistencia a compresión de muestra patrón PC-0,39-15.....	75
Tabla A.4.2.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra patrón PC-0,39-15.....	75
Tabla A.4.2.3. Resultados de permeabilidad de muestra patrón PC-0,39-15.	76
Tabla A.4.2.4. Resultados de porosidad de muestra patrón PC-0,39-15.....	76
Tabla A.4.2.5. Resultados resistencia a compresión de muestra patrón PC-0,35-20.....	76
Tabla A.4.2.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra patrón PC-0,35-20.....	77
Tabla A.4.2.7. Resultados de permeabilidad de muestra patrón PC-0,35-20.	78
Tabla A.4.2.8. Resultados de porosidad de muestra patrón PC-0,35-20.....	78
Tabla A.4.3.1. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.	79
Tabla A.4.3.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.	79
Tabla A.4.3.3. Resultados de permeabilidad de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.	80

Tabla A.4.3.4. Resultados de porosidad de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.....	80
Tabla A.4.3.5. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.	80
Tabla A.4.3.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.	81
Tabla A.4.3.7. Resultados de permeabilidad de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.	81
Tabla A.4.3.8. Resultados de porosidad de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.....	82
Tabla A.4.4.1. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.....	83
Tabla A.4.4.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.....	83
Tabla A.4.4.3. Resultados de permeabilidad de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.....	84
Tabla A.4.4.4. Resultados de porosidad de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.	84
Tabla A.4.4.5. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.....	84
Tabla A.4.4.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.....	85
Tabla A.4.4.7. Resultados de permeabilidad de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.....	85
Tabla A.4.4.8. Resultados de porosidad de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.	86
Tabla A.4.6.1. Resultados resistencia a compresión de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.....	89

Tabla A.4.6.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.....	89
Tabla A.4.6.3. Resultados de permeabilidad de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.....	90
Tabla A.4.6.4. Resultados de porosidad de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.....	90
Tabla A.4.6.5. Resultados resistencia a compresión de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.....	90
Tabla A.4.6.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.....	91
Tabla A.4.6.7. Resultados de permeabilidad de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.....	92
Tabla A.4.6.8. Resultados de porosidad de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.....	92



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sección transversal típica de un pavimento de hormigón permeable. En subrasantes niveladas, el almacenamiento de aguas pluviales es proporcionado por la capa de superficie de hormigón permeable, por la subbase y por encima de la superficie hasta la altura de la solera. (Adaptado de Tennis et al., 2004)	6
Figura 3.1. Distribución granulométrica de árido fino y árido grueso.	14
Figura 3.2. Zeolita molida.	15
Figura 3.3. Pomacita molida.	16
Figura 3.4. Posibles resultados de trabajabilidad: (a) Cono cero; (b) Cono colapsado; (c) Esfera estable; (d) Esfera inestable.....	18
Figura 3.5. Probeta ensayada a resistencia a compresión en máquina universal.	19
Figura 3.6. Probeta ensayada a resistencia a flexotracción en máquina universal.	20
Figura 3.7. Permeámetro de carga variable utilizado en la investigación: (a) Permeámetro desmontado, sección graduada y receptor de probeta; (b) Preparación previa de probeta cilíndrica; (c) Colocación de probeta en receptor; (d) Montaje listo para comenzar ensayo.	22
Figura 3.8. Preparación y curado de muestras: (a) Betonera de volteo y moldes cilíndricos; (b) Moldes prismáticos; (c) Probetas cilíndricas en cámara de curado; (d) Probetas prismáticas en cámara de curado.....	29
Figura 4.1. Resistencia a compresión de muestras evaluadas en Serie 0.....	33
Figura 4.2. Permeabilidad de muestras evaluadas en Serie 0.....	33
Figura 4.3. Propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras patrones de hormigón permeable sin aditivo: (a) Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a 7 y 28 días; (c) Permeabilidad a 28 días; (d) Porosidad a 28 días.	35

Figura 4.4. Propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras de hormigón permeable reemplazando cemento por zeolita: (a) Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a 28 días; (c) Permeabilidad a 28 días; (d) Porosidad a 28 días.	38
Figura 4.5 Propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras de hormigón permeable reemplazando cemento por pomacita: (a) Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a 28 días; (c) Permeabilidad a 28 días; (d) Porosidad a 28 días.	40
Figura 4.6. Microestructura de la muestra de referencia por imágenes SEM: (a) Vista de los cristales de C-H en matriz de cemento; (b) Gel C-S-H en matriz de cemento.	43
Figura 4.7. Microestructura de las muestras con un 20 % de zeolita reemplazando el cemento, por imágenes SEM: (a) Vista de la matriz de cemento y superficies C-H; (b) Vista de superficies C-H y cristales de etringita.	44
Figura 4.8. Microestructura de las muestras con un 20 % de pomacita reemplazando el cemento, por imágenes SEM: (a) Vista de la matriz de cemento y cristales de C-H; (b) Gel C-S-H en matriz de cemento.	44
Figura 4.9. Propiedades mecánicas e hidráulicas de la muestra combinada de hormigón permeable reemplazando cemento por 10 % de pomacita y aditivo en comparación con sus respectivas muestras de referencia: (a) Resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a los 7 y 28 días; (c) Permeabilidad a los 28 días; (d) Porosidad a los 28 días.	46
Figura A.4.5.1. Imágenes SEM complementarias de microestructura de la muestra de referencia: (a) Vista de cristales hexagonales de C-H en matriz de cemento; (b) Gel C-S-H en matriz de cemento.	87
Figura A.4.5.2. Imágenes SEM complementarias de microestructura de las muestras con un 20 % de zeolita reemplazando el cemento: (a) Vista de la	

matriz de cemento y superficies de C-H; (b) Aumento a matriz de cemento, vista de cristales de etringita.....	87
Figura A.4.5.3. Imágenes SEM complementarias de microestructura de las muestras con un 20 % de pomacita reemplazando el cemento: (a) Vista de la matriz de cemento y cristales de C-H; (b) Cristales y superficies de C-H en matriz de cemento.	88



RESUMEN

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo. Asociado a la expansión urbana, los pavimentos de hormigón aumentan las superficies impermeables que afectan el ciclo hidrológico y generan islas de calor urbanas. El cemento es uno de los principales componentes del hormigón, y su producción es una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ a nivel mundial. Hormigones permeables con reemplazo parcial del cemento representan una alternativa más sustentable. En esta investigación el uso de puzolanas naturales: zeolita y pomacita, como materiales de reemplazo parcial del cemento en mezclas de hormigón permeable son analizadas. Las propiedades mecánicas e hidráulicas de hormigones permeables utilizando diferentes porcentajes de pomacita y zeolita en reemplazo del cemento (0 % a 20 %) se evaluaron mediante una serie de ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexotracción, permeabilidad, porosidad y un microanálisis por SEM de las muestras. Además, se realizaron experimentos con aditivo plastificante como reductor de agua. Los resultados muestran que las mezclas con relación A/C de 0,35 presentan mejores propiedades mecánicas e hidráulicas; la pomacita mostró un mejor desempeño que la zeolita, con las mejores propiedades obtenidas con un 10 % de reemplazo por cemento; y la incorporación de plastificante aumentó las resistencias finales. Se recomienda sustituir parcialmente el cemento añadiendo un 10 % de pomacita y considerar usar 0,7 % de plastificante.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used construction materials all around the globe. Associated with urban expansion, concrete pavements increase the impermeable surfaces that affect the hydrological cycle and generate urban heat islands. Cement is one of the main components of concrete, and its production is one of the main sources of worldwide CO₂ emissions. Pervious concrete with partial replacement of cement represents a more sustainable alternative. In this research, the use of natural pozzolans: zeolite and pumicite, as partial cement replacement materials in pervious concrete mixtures, is analyzed. The mechanical and hydraulic properties of pervious concretes using different percentages of pumicite and zeolite to replace cement (0 % to 20 %) were evaluated by a series of test on compressive strength, flexural strength, permeability, porosity, and a microanalysis by SEM for the samples. Additionally, experiments with a plasticizer additive as water reducer were conducted. The results show that mixtures with 0.35 W/C ratio present better mechanical and hydraulic properties; pumicite shows a better performance than zeolite, with the better properties achieved at 10 % cement replacement; and the addition of plasticizer increased final strengths. It is recommended to partially replace cement by adding 10 % of pumicite and to consider using 0.7 % of plasticizer.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El creciente uso de pavimentos de hormigón, asociado a la expansión urbana incrementa las superficies impermeables que afectan el ciclo hidrológico, especialmente aumentando la escorrentía superficial, y generando islas de calor urbano en el entorno circundante (Andrés-Valeri *et al.*, 2016; Yang y Jiang, 2003; Takebayashi y Moriyama, 2012).

Por ello, los hormigones permeables adquieren especial relevancia en lugar de los hormigones tradicionales para reducir los efectos negativos de la urbanización sobre la hidrología y el comportamiento térmico de las ciudades (Bonicelli *et al.*, 2015), ya que su principal característica es permitir la infiltración directa del agua al suelo a través del pavimento.

Por otra parte, el alto consumo de recursos naturales y emisiones de CO₂ por la industria del cemento que alcanza entre el 8 % y el 9 % de las emisiones antropogénicas globales (Monteiro *et al.*, 2017), además de la creciente preocupación por el cuidado medioambiental durante los últimos años, ha llevado a la industria del cemento a considerar materiales suplementarios, naturales, residuales o subproductos industriales como alternativas para la fabricación de hormigón.

Por lo anterior, la zeolita y la pomacita permitirían reemplazar parcialmente el cemento y con ello reducir su utilización ya que, dada su estructura química, son consideradas como puzolanas naturales, es decir, no poseen propiedades conglomerantes por sí solas, pero combinadas con cal, molidas, a temperatura

ambiente y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio formando compuestos insolubles y estables con propiedades conglomerantes (Raggiotti *et al.*, 2018). Representan una alternativa idónea ya que no provienen de residuos de procesos industriales, están presentes en la naturaleza y son abundantes localmente en Chile.

Existen diversas investigaciones en las que se ha utilizado la zeolita y la pomacita como reemplazo parcial del cemento en hormigones tradicionales, y pocas investigaciones en hormigones permeables, por lo que, además, considerando que el hormigón es geo-dependiente, es necesario evaluar su comportamiento en hormigones permeables utilizando cementos nacionales, áridos locales y materiales primas locales debido a su alta sensibilidad e influencia sobre los hormigones permeables fabricados.



1.2. Hipótesis

Existen porcentajes óptimos de reemplazo de cemento por zeolita o pomacita que permiten generar hormigones permeables sustentables con desempeños equiparables a hormigones permeables tradicionales.

1.3. Objetivo general

Evaluar el uso de zeolita y pomacita en hormigones permeables como material de reemplazo parcial del cemento.

1.4. Objetivos específicos

En función del objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos:

- a) Caracterizar la zeolita y la pomacita para su utilización como material cementicio suplementario.
- b) Determinar experimentalmente el efecto de la incorporación de zeolita o pomacita en las propiedades mecánicas y el efecto en la microestructura de hormigones permeables.
- c) Determinar experimentalmente propiedades hidráulicas en estado endurecido de hormigones permeables con zeolita o pomacita.



1.5. Metodología

La investigación buscó evaluar propiedades de hormigones permeables con incorporación de zeolita o pomacita en distintos porcentajes de reemplazo del cemento, y poder efectuar comparaciones en referencia a propiedades mecánicas e hidráulicas de una muestra de referencia, verificando la efectividad de las nuevas propuestas.

El estudio se dividió en 4 etapas principales, la primera consistió en una etapa previa de validación del método de diseño; la segunda para seleccionar la muestra de referencia a utilizar para posteriormente reemplazar parcialmente el cemento por una puzolana natural con la mezcla de mejor desempeño. La tercera correspondió a los reemplazos parciales de cemento por zeolita o pomacita y la

cuarta y última permitió evaluar el comportamiento en conjunto de la puzolana natural de mejor desempeño con aditivo plastificante como reductor de agua.

Se realizaron ensayos de laboratorio correspondientes a docilidad para hormigón fresco, resistencia a compresión, resistencia flexotracción, permeabilidad y porosidad para hormigones permeables en estado endurecido, según sus normativas vigentes.

Lo anterior con el objetivo de determinar los porcentajes óptimos de reemplazo de cemento por zeolita o pomacita, de manera de obtener hormigones permeables con propiedades equiparables a hormigones permeables tradicionales, con tal de justificar su implementación como una alternativa ecológica.



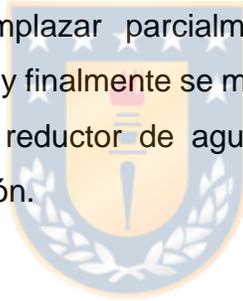
1.6. Estructura de la tesis

El trabajo está organizado en 5 capítulos principales. Se comienza con una breve introducción en la cual se presenta el problema de investigación, el estado del arte, mencionando el principal objetivo de la investigación y el aporte a los estudios actuales. Luego se especifican los materiales utilizados y se detalla la metodología junto al plan experimental. Posteriormente, se presentan, analizan y discuten los resultados obtenidos en la investigación para finalmente presentar las principales conclusiones de la tesis.

CAPÍTULO 2: HORMIGÓN PERMEABLE Y PUZOLANAS NATURALES

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el estado del arte con respecto a investigaciones de características y propiedades de hormigones permeables y la utilización de puzolanas naturales en cualquier tipo hormigón, enfocado en zeolita o pomacita. Se presentan las características de estos tipos de hormigones y se mencionan los distintos métodos de diseño de mezclas para hormigón poroso en la actualidad. Se describe la utilización de distintos materiales cementicios suplementarios para reemplazar parcialmente al cemento en hormigones tradicionales y permeables y finalmente se mencionan estudios que han utilizado aditivo plastificante como reductor de agua en hormigones para evaluar su utilización en la investigación.



2.2. Hormigones permeables

Actualmente, el hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo debido a su precio asequible, propiedades mecánicas y durabilidad (Najimi *et al.*, 2012; Divyah *et al.*, 2022; Prakash *et al.*, 2022). Asociado con la expansión urbana, el uso del hormigón aumenta las superficies impermeables que afectan el ciclo hidrológico, especialmente aumentando la escorrentía superficial, y generando islas de calor urbano en el entorno circundante (Andrés-Valeri *et al.*, 2016; Yang y Jiang, 2003; Takebayashi y Moriyama, 2012).

Los hormigones permeables se han utilizado en lugar de los hormigones tradicionales para reducir los efectos negativos de la urbanización sobre la hidrología y el comportamiento térmico de las ciudades (Bonicelli *et al.*, 2015). Consisten en hormigones con ausencia o poca presencia de áridos finos que generan una red de poros interconectados que permiten la infiltración del agua de lluvia a través de su estructura llegando eventualmente al suelo (Chandrappa y Biligiri, 2016; Nazeer *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2018).

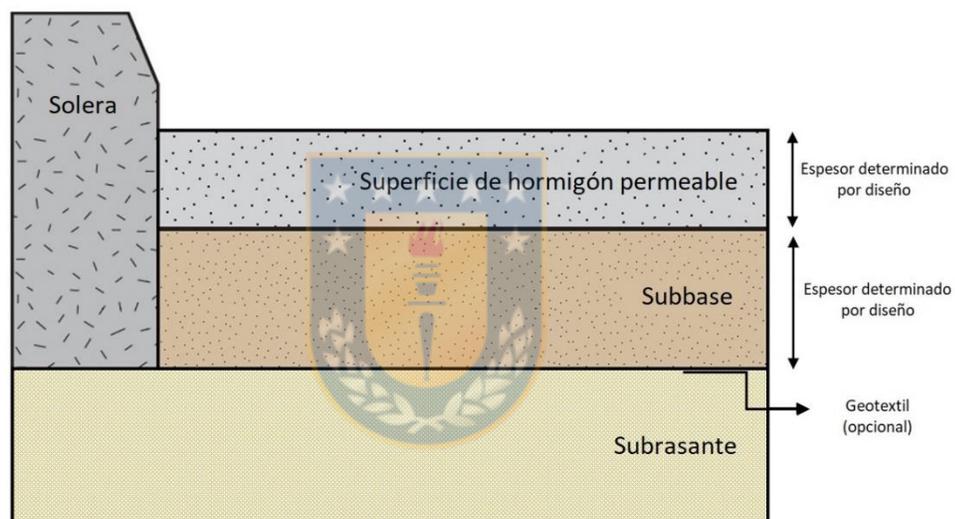


Figura 2.1. Sección transversal típica de un pavimento de hormigón permeable.

En subrasantes niveladas, el almacenamiento de aguas pluviales es proporcionado por la capa de superficie de hormigón permeable, por la subbase y por encima de la superficie hasta la altura de la solera. (Adaptado de Tennis *et al.*, 2004)

Además de las propiedades mecánicas clásicas evaluadas para la caracterización de hormigones tradicionales, las propiedades hidráulicas como la capacidad de infiltración y la porosidad también se evalúan en hormigones permeables y se consideran en sus distintos métodos de diseño (ACI *Committe* 522, 2010; Nguyen *et al.*, 2014; Fernández *et al.*, 1998; NRMCA, 2009). Debido

a la relación inversa entre las propiedades mecánicas e hidráulicas, una pregunta abierta es: ¿Cómo maximizar la resistencia del hormigón permeable sin reducir significativamente su capacidad de infiltración? (Sahdeo *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020).

Al mismo tiempo, uno de los principales componentes del hormigón es el cemento, con una demanda creciente a nivel mundial (FICEM e ICH, 2019; Federación Interamericana del Cemento, 2020). Desafortunadamente, la industria del cemento emite gases de efecto invernadero a la atmósfera y consume grandes cantidades de energía, alcanzando entre el 8 % y el 9 % de las emisiones antropogénicas globales de CO₂ (Monteiro *et al.*, 2017). Por lo tanto, existe la necesidad de encontrar materiales que puedan reemplazar al cemento para reducir los impactos ambientales.



2.3. Puzolanas naturales como reemplazo parcial del cemento

A lo largo de la historia del hormigón, la adición de minerales se ha utilizado con diferentes propósitos, principalmente relacionados con economía, ecología y tecnología. En particular, las puzolanas naturales representan una buena alternativa para reemplazar parcialmente el cemento en hormigones (Raggiot *et al.*, 2015). Además de la alternativa de reemplazar cemento por otros minerales, existen diversas alternativas ecológicas, como reemplazar parcial o totalmente los agregados por áridos reciclados de distinta naturaleza.

Las puzolanas naturales, como la zeolita y la pomacita, por sí solas no tienen propiedades conglomerantes, pero combinadas con cal, molidas, a temperatura ambiente y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio formando

compuestos insolubles y estables con propiedades conglomerantes (Raggiotti *et al.*, 2018).

La zeolita forma parte del grupo de los minerales aluminosilicatos microporosos, con unos 50 tipos de zeolitas naturales y 150 sintéticas conocidas actualmente (Ahmadi y Shekarchi, 2010), mientras que la pomacita es un mineral de origen volcánico que se crea tras la solidificación del magma, siendo el dióxido de silicio y el trióxido de aluminio predominantes en su composición química.

Existen diversas investigaciones que demuestran que es posible sustituir parte del cemento por zeolita (Najimi *et al.*, 2012; Raggiotti *et al.*, 2015; Raggiotti *et al.*, 2018; Ahmadi y Shekarchi, 2010; Tran *et al.*, 2019; Emam y Yehia, 2017) o pomacita (Kabay *et al.*, 2015; Hossain, 2004) obteniendo propiedades mecánicas similares a las de los hormigones tradicionales. Y menos investigaciones para mezclas de hormigones permeables con zeolita (Pachideh *et al.*, 2020; Pachideh *et al.*, 2019; Joshaghani, 2016) o pomacita (Azad *et al.*, 2020) reemplazando hasta un 40 % del cemento en ambos tipos de hormigones.

Existen investigaciones con otros materiales cementicios suplementarios, los más utilizados corresponden a escorias de alto horno, cenizas volantes y puzolanas naturales (Juenger *et al.*, 2019). Existen otros materiales también utilizados en sustitución del cemento tales como cenizas de biomasa, escorias siderúrgicas, calizas, residuos de vidrio, entre otros, donde los métodos de obtención, propiedades y desempeños son diferentes entre sí. (Juenger *et al.*, 2019; Suraneni *et al.*, 2019; Carsana *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2022). El enfoque en las puzolanas naturales como la zeolita y la pomacita se debe principalmente a que no provienen de residuos de procesos industriales, están presentes en la naturaleza y son abundantes localmente en Chile.

Es importante evaluar el comportamiento de estos minerales en hormigones permeables, ya que existe una menor cantidad de investigaciones al respecto, y la mezcla, tanto en diseño como en comportamiento, es diferente al hormigón tradicional (no se encuentra estandarizada) y las propiedades mecánicas e hidráulicas de los hormigones resultantes dependen de la composición química tanto de la puzolana como del cemento, con el objetivo principal de obtener hormigones permeables con propiedades similares a las de una muestra de referencia pero utilizando menor cantidad de cemento.

El objetivo principal de la investigación consistió en explorar el uso de la zeolita y la pomacita para reemplazar parcialmente el cemento en hormigones permeables para su uso en urbanización, contribuyendo a una expansión urbana más sostenible a nivel mundial.



2.4. Utilización de aditivos

Los aditivos plastificantes como reductores de agua se han utilizado en hormigones con el fin de obtener mayores resistencias mecánicas, permitiendo disminuir la relación agua-cemento para un mismo nivel de trabajabilidad. Sin embargo, su comportamiento está altamente influenciado por el tipo de cemento, el tipo de aditivo, la dosis utilizada y el tipo de materiales cementicios suplementarios empleados (Mishra y Tamrakar, 2013; Khan y Ali, 2018; Malagavelli y Paturu, 2012; Elkady *et al.*, 2013; Topçu y Ateşin, 2016; Nagrockiene *et al.*, 2013).

Además, en hormigones permeables, a diferencia de hormigones tradicionales, es necesario tener en consideración que las propiedades hidráulicas no se vean

significativamente afectadas por el uso de altas dosis de aditivo con respecto al peso del cemento (Elizondo-Martínez *et al.*, 2020).

2.5. Conclusiones

En este capítulo se presentó el estado del arte, inicialmente introduciendo el problema de investigación y describiendo los hormigones permeables, sus características, beneficios, métodos de diseño y desafíos. Luego se procedió a describir los minerales puzolánicos (zeolita y pomacita), orígenes, cualidades e investigaciones previas sobre su utilización como materiales cementicios suplementarios tanto en hormigones tradicionales como en hormigones permeables, justificando su utilización para el problema de investigación. Finalmente se mencionan investigaciones previas sobre la utilización y consideraciones al utilizar distintos tipos de aditivos plastificantes de diversos tipos para distinguir su esquema de funcionamiento y desempeño en hormigones tradicionales, para poder aplicarlos a mezclas de hormigones permeables.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODO

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los materiales, las variables o propiedades para caracterizar el hormigón permeable, el procedimiento normativo para realizar los ensayos, el plan experimental detallado en series, las dosificaciones según el método de diseño seleccionado y el procedimiento para la preparación, confección, compactación y curado de las muestras hasta su edad respectiva de ensayo.



3.2. Materiales

3.2.1. Agua

El agua utilizada procede del suministro público que cumple con la NCh 1498 (Instituto Nacional de Normalización, 2012) y no estaba contaminada antes de su uso.

3.2.2. Cemento

En esta investigación se consideró cemento típicamente utilizado por la industria de la construcción en Chile, correspondiente a la marca Biobío Especial. De acuerdo con la norma NCh 148 (Instituto Nacional de Normalización, 1968), basada en la norma ASTM C150 (*American Society for Testing and Materials*,

2020) se clasifica como cemento puzolánico grado corriente. Las propiedades del cemento se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del cemento.

Propiedades		Cemento Biobío	Requerido NCh 148
Peso específico (g/cm ³)		2,8	-
Expansión en autoclave (%)		0,1	<1,0
Fraguado inicial (h:m)		02:40	>1:00
Fraguado final (h:m)		03:40	<12:00
Resistencia a compresión (kg/cm ²)	7 días	320	>180
	28 días	410	>250

3.2.3. Árido fino

La arena consiste en un material pétreo compuesto por partículas duras con forma y tamaño estables que pasan a través del tamiz de 4,75 mm de apertura y se retienen en el tamiz de 0,075 mm según NCh 163 (Instituto Nacional de Normalización, 1979). En esta investigación se utilizó arena Biobío por ser el árido fino típico para la elaboración de hormigón de forma local. Las propiedades según la normativa NCh 1239 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) con base en ASTM C128 (*American Society for Testing and Materials*, 2001), y la distribución granulométrica según NCh 165 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) con base en ASTM C136 (*American Society for Testing and Materials*, 2006) de esta arena se indican en la Tabla 3.2 y Figura 3.1 respectivamente. La distribución granulométrica detallada se indica en Anexo 3.1.

3.2.4. Árido grueso

La gravilla consiste en un material pétreo compuesto por partículas duras con forma y tamaño estables que se retienen en el tamiz de apertura de 4,75 mm con tolerancias establecidas según NCh 163 (Instituto Nacional de Normalización, 1979). El árido grueso utilizado en esta investigación corresponde a gravilla de 3/8" obtenida localmente en Concepción, Chile, y su extracción procede de la ribera del río Ñuble. Las propiedades según norma NCh 1117 (Instituto Nacional de Normalización, 2010) con base en ASTM C127 (*American Society for Testing and Materials*, 2007), y la distribución granulométrica según NCh 165 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) con base en ASTM C136 (*American Society for Testing and Materials*, 2006) de esta gravilla se indican en la Tabla 3.2 y Figura 3.1 respectivamente. La distribución granulométrica detallada se indica en Anexo 3.1.

Tabla 3.2. Propiedades de árido fino y árido grueso.

Propiedades	Árido fino	Árido grueso
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2682	2643
Densidad real árido saturado superficialmente seco (SSD) (kg/m ³)	2729	2683
Densidad neta (kg/m ³)	2814	2752
Densidad aparente compactada (kg/m ³)	1635	1500
Absorción de agua (%)	1,75	1,49
Partículas finas menores a tamiz #200 (%)	0,59	0,05
Módulo de finura	2,53	8,89

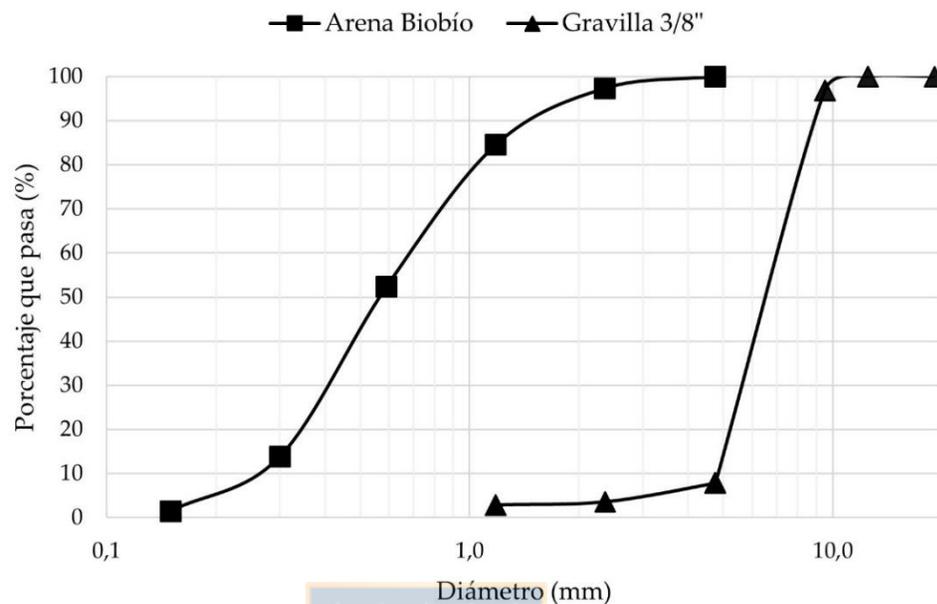


Figura 3.1. Distribución granulométrica de árido fino y árido grueso.

3.2.5. Zeolita

La zeolita utilizada en esta investigación corresponde al tipo clinoptilolita-mordenita, obtenida en yacimientos locales de la región del Maule, Chile. Cumple con la normativa ASTM C618 (*American Society for Testing and Materials*, 2019) como puzolana natural clase N.

El proceso de tratamiento de la zeolita consiste únicamente en la trituración o molienda, cuyo objetivo principal consiste obtener que como máximo el 34 % del mineral sea retenido por el tamiz #325, según la normativa internacional ASTM C618 (*American Society for Testing and Materials*, 2019).

El proceso de trituración se realizó en un molino de bolas, y se mantuvo en funcionamiento por entre 2 a 3 horas con 8 kg de carga en el molino, para obtener la granulometría deseada. La Figura 3.2 muestra el mineral ya procesado y preparado para su utilización como reemplazo del cemento.



Figura 3.2. Zeolita molida.

3.2.6. Pomacita

La pomacita utilizada se obtuvo de un yacimiento de la región metropolitana de Santiago de Chile y, al igual que la zeolita, cumple con la normativa ASTM C618 (*American Society for Testing and Materials*, 2019) como puzolana natural clase N.

El proceso de tratamiento de la pomacita consiste únicamente en la trituración o molienda, cuyo objetivo principal consiste en obtener que como máximo el 34 % del

mineral sea retenido por el tamiz #325, según la normativa internacional ASTM C618 (*American Society for Testing and Materials*, 2019).

El proceso de trituración se realizó en un molino de bolas, y se mantuvo en funcionamiento por entre 1 a 2 horas con 8 kg de carga en el molino, para obtener la granulometría deseada. La Figura 3.3 muestra el mineral ya procesado y preparado para su utilización como reemplazo del cemento.



Figura 3.3. Pomacita molida.

3.2.7. Aditivo

El aditivo utilizado se clasifica como tipo D según la norma NCh 2128 (Instituto Nacional de Normalización, 1995) con base en la norma ASTM C494 (*American Society for Testing and Materials*, 2004) como aditivo plastificante retardador de fraguado, siendo utilizado como reductor de agua.

El aditivo corresponde a Sika Plastocrete® HP-450, utilizado como aditivo retardador y reductor de agua de alto desempeño, con dosis indicadas por el fabricante entre 0,4 % y 0,7 % y reducción del agua de amasado de hasta un 15 % para hormigones tradicionales.

3.3. Variables para caracterizar hormigones permeables

3.3.1. Trabajabilidad

En las tres etapas se evaluó la trabajabilidad de cada mezcla según la norma NCh 1019 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) con base en la norma ASTM C143 (*American Society for Testing and Materials*, 2010), utilizando el ensayo de cono de asentamiento.

Asimismo, se consideró otro método complementario, que consiste en evaluar la capacidad del hormigón permeable en estado fresco para formar una esfera en una mano (Tennis *et al.*, 2004) para verificar su cohesión.

Los posibles resultados a obtener de trabajabilidad se indican en Figura 3.4, tanto como indicadores del cono de Abrams (cono de asentamiento) y ensayo de esfera.



Figura 3.4. Posibles resultados de trabajabilidad: (a) Cono cero; (b) Cono colapsado; (c) Esfera estable; (d) Esfera inestable.

3.3.2. Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión se evaluó según la norma NCh 1037 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) basada en la norma ASTM C39 (*American Society for Testing and Materials*, 2005), utilizando moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Se evaluó a los 7, 14 y 28 días para registrar la evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo (Nazeer *et al.*, 2020; Raggiotti *et al.*, 2018; Emam y Yehia, 2017; Kabay *et al.*, 2015; Hossain, 2004; Pachideh *et al.*, 2020; Pachideh *et al.*, 2019; Joshaghani, 2016). Los resultados consisten en el promedio simple de 5 repeticiones de muestras ensayadas (En Serie 0, corresponde al promedio de 3 repeticiones). La Figura 3.5 muestra un ensayo a compresión típico en una máquina de ensayos universal.



Figura 3.5. Probeta ensayada a resistencia a compresión en máquina universal.

3.3.3. Resistencia a flexotracción

La resistencia a la flexotracción se evaluó según la norma NCh 1038 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) basada en la norma ASTM C78 (American Society for Testing and Materials, 2018), utilizando moldes prismáticos de 55 cm x 15 cm x 15 cm. Se realizaron cinco repeticiones por cada experimento. La resistencia a la flexotracción se midió después de 28 días para todos los experimentos como la edad típica de ensayo (Yang y Jiang, 2003; Huang et al., 2020). Adicionalmente, se midió a los 7 días en los hormigones permeables de referencia, es decir, sin pomacita ni zeolita, y en los hormigones con aditivo. La Figura 3.6 muestra un ensayo a flexotracción típico en una máquina de ensayos universal.



Figura 3.6. Probeta ensayada a resistencia a flexotracción en máquina universal.

3.3.4. Permeabilidad

Para la medición de la permeabilidad se utilizó un permeámetro de carga variable especificado por el comité 522 del ACI (2010). Para realizar esta prueba se consideró un solo espécimen, y la medición se repitió tres veces sobre él para determinar el tiempo que tarda el agua en descender entre alturas conocidas. La Ecuación 3.1 indica cómo calcular el coeficiente de permeabilidad según este método.

$$k \left(\frac{cm}{s} \right) = \frac{a \times L}{A \times t} \times \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.1)$$

Donde “ a ” es el área de la sección transversal del tubo de admisión vertical en cm^2 , cuyo valor es conocido (diámetro del tubo circular de admisión es de 10,5 cm); “ L ” es la longitud de la muestra en cm; “ A ” es el área de la sección transversal de la muestra en cm^2 ; “ t ” es el tiempo registrado desde h_1 a h_2 en s, “ h_1 ” es el nivel de agua inicial, igual a 40 cm y “ h_2 ” es el nivel de agua final, igual a 20 cm.

Para realizar la medición de la permeabilidad, inicialmente las probetas deben ser preparadas, de forma tal que el agua fluya únicamente en sentido vertical, por lo que el área lateral de los cilindros se recubre con film plástico y se fija con adhesivo para evitar pérdidas. Por otra parte, una vez colocada la probeta en el permeámetro se debe asegurar el correcto sellado en la parte superior, de manera que se mantenga lo más hermético posible y, además, mediante alambres cruzando el cilindro para que posterior a la realización del ensayo, la probeta pueda ser retirada con facilidad. La Figura 3.7 muestra el permeámetro en el cual se realizaron las mediciones y el proceso de preparación de las probetas cilíndricas antes del ensayo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.7. Permeámetro de carga variable utilizado en la investigación: (a) Permeámetro desmontado, sección graduada y receptor de probeta; (b) Preparación previa de probeta cilíndrica; (c) Colocación de probeta en receptor; (d) Montaje listo para comenzar ensayo.

3.3.5. Porosidad

El ensayo de porosidad se realizó de acuerdo con la norma ASTM C1754 (American Society for Testing and Materials, 2012) y la Ecuación 3.2 indica cómo calcular el porcentaje de vacíos en la muestra seleccionada. Para este ensayo se consideró el promedio simple entre 3 muestras.

$$\text{Porosidad (\%)} = \left[1 - \left(\frac{M_d - M_s}{\rho_w \times V} \right) \right] \times 100 \quad (3.2)$$

Donde “ M_d ” es la masa seca del espécimen en kg, “ M_s ” es la masa sumergida del espécimen en kg, “ ρ_w ” es la densidad del agua en kg/m³ y “ V ” es el volumen del espécimen en m³.



3.3.6. Microanálisis

Además de la caracterización a nivel macro de las muestras, como sus propiedades mecánicas en estado endurecido, se realizó un análisis a nivel microscópico del comportamiento de las puzolanas naturales mediante análisis de imágenes por microscopía electrónica de barrido (MEB) o por su sigla en inglés SEM (*Scanning Electron Microscopy*), comparando una muestra de referencia (sin minerales) con muestras con zeolita o pomacita reemplazando el 20 % del cemento. El objetivo de este enfoque es lograr una comprensión más profunda del comportamiento a nivel macro de las muestras de hormigón permeable con y sin zeolita o pomacita.

3.4. Series experimentales

La Serie 0 corresponde a una etapa previa y tuvo como objetivo validar el método de diseño en mezclas de hormigón permeable, en base a los resultados de la investigación de Cires (2021). Las variables en esta serie fueron la relación A/C (0,39 y 0,35) y la cantidad de árido fino sobre árido grueso (10 % al 20 %). Se determina la mejor muestra por cada relación A/C con el porcentaje de árido fino de mejor desempeño. En esta serie, solo se evalúa resistencia a compresión a 28 días y permeabilidad a 28 días por el hecho de corresponder únicamente a una etapa previa de investigación.

La Serie 1 tuvo como objetivo la determinación de la mejor muestra de referencia de hormigón permeable y se compone de dos experimentos con una relación agua/cemento de 0,35 y 0,39 con un 15 % y un 20 % de árido fino/grueso respectivamente.

La Serie 2 tuvo como objetivo evaluar el efecto del contenido de pomacita y zeolita en las propiedades del hormigón permeable. Se realizaron dos experimentos con 10 % y 20 % de pomacita y dos experimentos con 10 % y 20 % de zeolita reemplazando parcialmente el cemento.

La serie 3 tuvo como objetivo evaluar los efectos del aditivo en las mezclas de concreto permeable sin y con pomacita. Constó de dos experimentos con 0,7 % de aditivo con relación al peso de cemento.

La Tabla 3.3 muestra las series experimentales. “S” designa a la serie, “E” corresponde a los experimentos, “A/C” es la relación agua a material cementicio, “AF/AG” es el porcentaje de árido fino sobre árido grueso, “Z” es el porcentaje de

zeolita a reemplazar, “P” es el porcentaje de pomacita a reemplazar, “A” es la dosis de aditivo a utilizar, indicada como porcentaje con respecto al peso del cemento. Las propiedades para evaluar se definen de la siguiente manera: “P1” corresponde a la resistencia a la compresión, “P2” a la resistencia a la flexotracción, “P3” a la permeabilidad y “P4” a la porosidad. Se indican también, las edades de evaluación (días) de cada propiedad para cada experimento.

Tabla 3.3. Series experimentales y características.

S	E	A/C	AF/AG	Z	P	A	P1	P2	P3	P4
0	1	0,39	10	0	0	0	28	-	28	-
	2	0,39	15	0	0	0	28	-	28	-
	3	0,39	20	0	0	0	28	-	28	-
	4	0,35	10	0	0	0	28	-	28	-
	5	0,35	15	0	0	0	28	-	28	-
	6	0,35	20	0	0	0	28	-	28	-
1	1	0,39	15	0	0	0	7-14-28	7-28	28	28
	2	0,35	20	0	0	0	7-14-28	7-28	28	28
2	1	0,35	20	10	0	0	7-14-28	28	28	28
	2	0,35	20	20	0	0	7-14-28	28	28	28
	3	0,35	20	0	10	0	7-14-28	28	28	28
	4	0,35	20	0	20	0	7-14-28	28	28	28
3	1	0,35	20	0	0	0,7	7-14-28	7-28	28	28
	2	0,35	20	0	10	0,7	7-14-28	7-28	28	28

3.5. Experimentación

3.5.1. Dosificaciones de diseño de hormigones permeables

Se utilizó el método propuesto por Nguyen *et al.* (2014) para la dosificación de las mezclas de hormigón permeable debido a que presenta una base teórica/matemática más detallada que lo propuesto por el comité 522 del ACI (2010), el ICPA o Instituto del Cemento Portland Argentino (Fernández *et al.*, 2011) y la Asociación Nacional de Concreto Premezclado o NRMCA por su sigla en inglés (*National Ready Mixed Concrete Association*, 2009).

La porosidad objetivo se fijó en 15 % y la cantidad de agregado fino sobre agregado grueso se consideró en el rango de 15 % y 20 % según Cires (2021). La cantidad de agregado grueso se consideró entre 1325 kg/m³ y 1365 kg/m³, debido a una indicación del método ICPA (Fernández *et al.*, 2011) para el tamaño específico del agregado grueso utilizado en la investigación y para mantener la cantidad de agregado fino dentro de los rangos deseados.

Las relaciones de agua a materiales cementicios utilizadas son 0,35 y 0,39, de acuerdo con el rango típico de valores utilizados en hormigones permeables según el comité 522 del ACI (2010). No se recomiendan valores más altos porque si la relación A/C de la mezcla es más alta, las propiedades mecánicas podrían ser más bajas y la pasta de cemento se podría asentar en el fondo de los moldes o en el terreno, comprometiendo la permeabilidad al generar una capa impermeable (Kováč y Sičáková, 2018; Deo y Neithalath, 2011).

Las dosificaciones de diseño para cada mezcla se presentan en la Tabla 3.6, en orden: la selección de la muestra control o de referencia, los reemplazos parciales del cemento por puzolanas naturales y finalmente el proceso de combinación con aditivo. El método de dosificación detallado y los parámetros de diseño utilizados se encuentran en Anexo 3.2.

La nomenclatura utilizada en la Serie 0 y Serie 1 corresponde a “PC-XX-YY”, donde “PC” es hormigón permeable (*pervious concrete*), “XX” es la relación A/C de la mezcla y “YY” es el porcentaje de árido fino sobre agregado grueso. La nomenclatura utilizada en la Serie 2 corresponde a “PC-II-JJ”, donde “PC” es hormigón permeable (*pervious concrete*), “II” indica si el reemplazo corresponde a zeolita o pomacita y “JJ” es el porcentaje de cemento a reemplazar. En la Serie 3, “PL” indica el uso de aditivo plastificante y la dosis se indica como porcentaje con respecto al peso del cemento. En Tabla 3.4, la nomenclatura “ID” corresponde al nombre e identificación de la mezcla en la experimentación, “Z” corresponde a zeolita, “P” a pomacita y “A” a aditivo.

Tabla 3.4. Dosificaciones de mezclas para experimentación en kg/m³.

S	E	ID	Gravilla	Arena	Cemento	Agua	Z	P	A
0	1	PC-0,39-10	1365,4	136,6	368,5	143,7	-	-	-
	2	PC-0,39-15	1345,7	201,9	345,4	134,7	-	-	-
	3	PC-0,39-20	1325,5	265,2	323,5	126,2	-	-	-
	4	PC-0,35-10	1365,4	136,6	389,3	136,3	-	-	-
	5	PC-0,35-15	1345,7	201,9	364,9	127,7	-	-	-
	6	PC-0,35-20	1325,5	265,2	341,8	119,6	-	-	-
1	1	PC-0,39-15	1345,2	201,7	345,3	134,7	-	-	-
	2	PC-0,35-20	1325,5	265,2	341,8	119,6	-	-	-
2	1	PC-Z-10	1325,5	265,2	310,7	119,6	31,1	-	-
	2	PC-Z-20	1325,5	265,2	284,8	119,6	57,0	-	-
	3	PC-P-10	1325,5	265,2	310,7	119,6	-	31,1	-
	4	PC-P-20	1325,5	265,2	284,8	119,6	-	57,0	-
3	1	PC-0,35-20-PL	1325,5	265,2	341,8	101,7	-	-	0,7
	2	PC-P-10-PL	1325,5	265,2	310,7	101,7	-	31,1	0,7

3.5.2. Procedimiento de confección de muestras

La preparación y curado de las probetas se realizó de acuerdo con la norma NCh 1017 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) basada en la norma ASTM C31 (American Society for Testing and Materials, 2009). El desmolde de probetas cilíndricas se realizó a las 24 horas, mientras que para las probetas prismáticas fue a las 48 horas según la normativa. En el caso de las mezclas en las que se utilizó el aditivo, se les concedieron 24 horas adicionales para el desmolde.

La compactación, se realizó de acuerdo con la norma NCh 1017 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) basada en la norma ASTM C31 (American Society for Testing and Materials, 2009). Para los moldes cilíndricos la compactación consistió en tres capas de igual volumen con veinticinco golpes repartidos en el área con una varilla pisón y cinco golpes laterales al molde por cada capa de hormigón compactada, mientras que, para los moldes prismáticos consistió en dos capas de igual volumen con ocho golpes por cada 100 cm² de superficie y cinco golpes en los extremos del molde, por cada capa compactada.

Después del desmolde, las probetas se mantienen en una cámara de curado, con una humedad superior al 95 % y una temperatura constante de 23 °C. Los especímenes se mantienen en la cámara hasta su correspondiente edad de ensayo. Figura 3.8 muestra la betonera de volteo en la que se realizaron las confecciones, los moldes, y los especímenes guardados en la cámara de curado hasta su edad de ensayo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.8. Preparación y curado de muestras: (a) Betonera de volteo y moldes cilíndricos; (b) Moldes prismáticos; (c) Probetas cilíndricas en cámara de curado; (d) Probetas prismáticas en cámara de curado.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los materiales utilizados en la investigación, sus características, propiedades y obtención. Se identificaron las variables y propiedades de análisis de los hormigones permeables y la metodología utilizada para obtener los resultados. Principalmente se detallaron las series experimentales planteadas, sus objetivos y las dosificaciones respectivas según el método de diseño seleccionado, para cada mezcla/experimento realizado. Finalmente, se presenta y explica el procedimiento utilizado desde la preparación, confección, compactación y hasta el curado de una probeta de hormigón permeable.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en base a la metodología indicada en el Capítulo 3. Los resultados corresponden a trabajabilidad, resistencia a compresión, resistencia a flexotracción, permeabilidad y porosidad, para Serie 1, Serie 2 y Serie 3, resultados que serán comparados entre distintas muestras y discutidos en esta sección. El capítulo se divide en 4 secciones principales: La Serie 0, correspondiente a una etapa previa para validación del método de diseño utilizado y selección de mejores muestras con relaciones A/C distintas para la etapa siguiente; la Serie 1, en la que se selecciona la muestra de mejor desempeño que será utilizada en la serie siguiente; la Serie 2, en la que se evalúa el efecto de los minerales puzolánicos al reemplazar el cemento por ellos y finalmente la Serie 3, donde se evalúan conjuntamente los mejores resultados de la serie anterior junto a la utilización de aditivo plastificante como reductor de agua.

4.2. Serie 0: Resultados previos con método de diseño

Los resultados obtenidos por Cires (2021) indican que los mejores resultados se obtuvieron mediante el método de diseño propuesto por Nguyen *et al.* (2014), comparándolos entre los métodos propuestos por el comité 522 del ACI (2010), el ICPA o Instituto del Cemento Portland Argentino (Fernández et al., 2011) y la Asociación Nacional de Concreto Premezclado o NRMCA por su sigla en inglés (*National Ready Mixed Concrete Association*, 2009).

Es importante notar que en su investigación se realizaron experimentos exclusivamente de resistencia a compresión y permeabilidad, con los 4 métodos de diseño y con dos tipos de cementos distintos, dando como resultado que el cemento que permitió obtener las mejores propiedades mecánicas de las muestras de hormigón permeables fue el puzolánico (Biobío Especial), en comparación al cemento Polpaico (Cires, 2021).

Los resultados obtenidos por Cires (2021) indican que el mejor desempeño de las muestras de hormigón permeable se obtuvo cuando la cantidad de árido grueso de diseño estuviese cercana a 1345 kg/m^3 , haciendo referencia a una indicación del método ICPA (Fernández *et al*, 2011) considerada en el método Nguyen *et al*. (2014). Además, se debe considerar que la cantidad de árido fino sea igual o superior al 12 % en el diseño de las mezclas. Otras consideraciones y relaciones importantes entre áridos y cemento se indican en Anexo 3.2.

Tomando lo anterior como base, se consideró un rango de cantidad de árido grueso a obtener en el diseño (entre 1325 kg/m^3 y 1365 kg/m^3) y variando la cantidad de árido fino (entre 10 % a 20 %), para dos relaciones A/C distintas y fijas para cada parámetro a evaluar (0,39 y 0,35). Lo anterior, para determinar el comportamiento e influencia de los parámetros relevantes en las muestras resultantes y mejorar los resultados obtenidos por Cires (2021).

La Figura 4.1 Indica los resultados de resistencia a compresión de las muestras de hormigón permeable variando la cantidad de árido fino sobre árido grueso (10 % al 20 %) para dos relaciones A/C distintas (0,39 y 0,35). La muestra "PC-REF" corresponde a la muestra de mejor desempeño obtenida por Cires (2021).

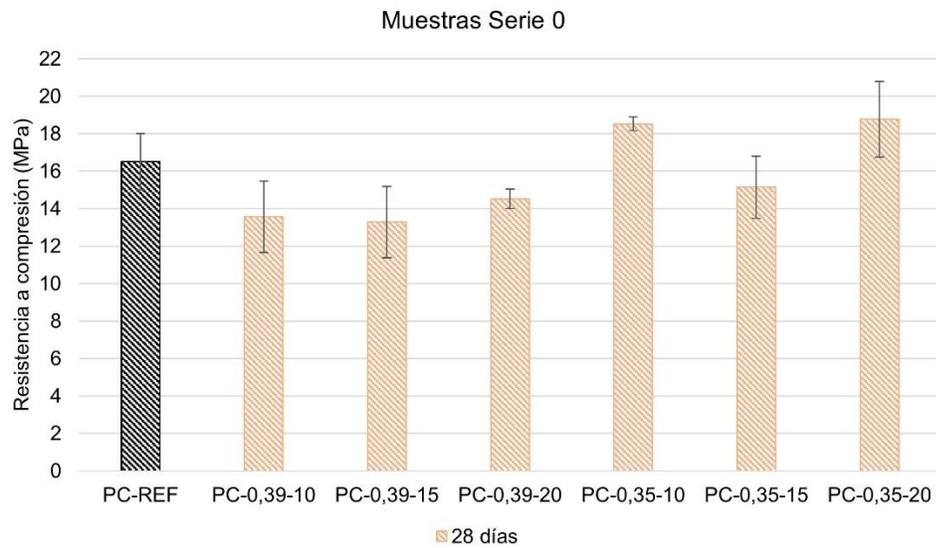


Figura 4.1. Resistencia a compresión de muestras evaluadas en Serie 0.

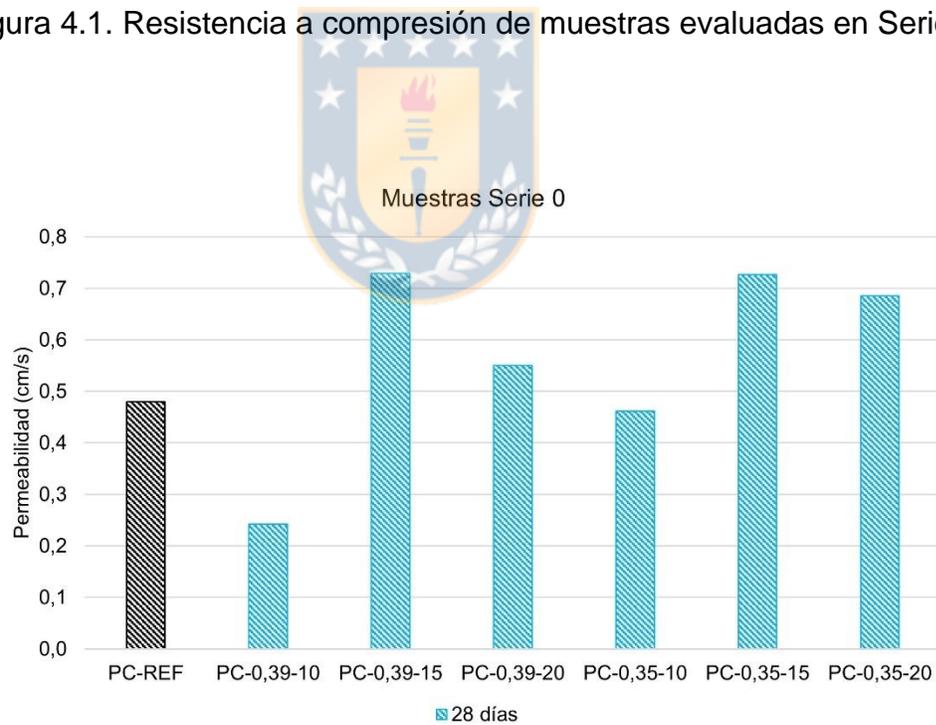


Figura 4.2. Permeabilidad de muestras evaluadas en Serie 0.

Los resultados obtenidos indican que para una relación A/C de 0,39 la muestra que presenta un mejor desempeño y balance entre sus propiedades mecánicas e hidráulicas corresponde a la PC-0,39-15, debido principalmente a que presentó

valores más elevados de permeabilidad (en comparación a las muestras con misma relación A/C) y con un 15 % de árido fino. Para esta muestra, los resultados de resistencia a compresión se encuentran en valores similares considerando las dos muestras con distinta cantidad de árido fino con igual relación A/C.

Para la relación A/C de 0,35, la muestra que presenta un mejor desempeño y balance entre sus propiedades mecánicas e hidráulicas corresponde a la PC-0,35-20, principalmente debido a que en esta etapa presentó los valores más elevados en resistencia a compresión y su valor de permeabilidad, si bien es menor a la muestra PC-0,35-15, esta muestra presenta menor resistencia promedio a compresión.

Por lo tanto, debido al desempeño obtenido en esta etapa previa, se consideraron las mejores muestras de cada relación A/C, la muestra PC-0,39-15 y PC-0,35-20 para su evaluación completa en la serie siguiente.

4.3. Serie 1: Selección de mejores muestra de referencia

4.3.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas

Los resultados de las propiedades mecánicas e hidráulicas para las muestras patrones sin aditivo se presentan en la Figura 4.3. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones de las muestras para cada edad de ensayo. Para resultados y valores detallados ver Anexo 4.2.

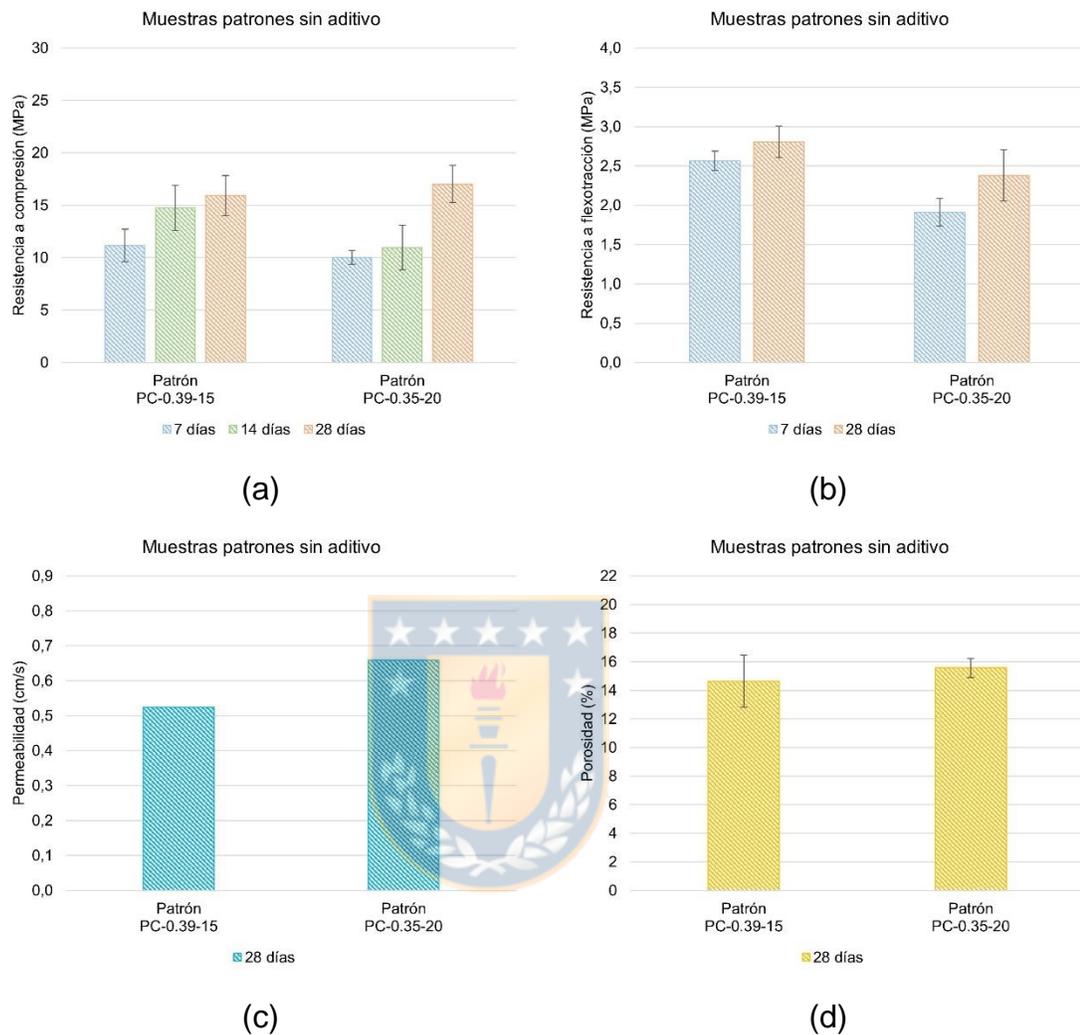


Figura 4.3. Propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras patrones de hormigón permeable sin aditivo: (a) Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a 7 y 28 días; (c) Permeabilidad a 28 días; (d) Porosidad a 28 días.

La trabajabilidad de la mezcla patrón PC-0,39-15 obtuvo como resultado un cono de asentamiento colapsado y una esfera inestable. Por otra parte, la muestra PC-0,35-20 obtuvo un cono de asentamiento cero y esfera estable. Esto se debe principalmente a la mayor relación A/C de la muestra patrón PC-0,39-15, sin

embargo, en ambas muestras no se generó sedimentación de material en el fondo de los moldes.

En resistencia a compresión (Figura 4.3a), si bien las resistencias a 7 y 14 días son mayores en la muestra PC-0,39-15, la resistencia a compresión a 28 días de la muestra PC-0,35-20 es en promedio un 7 % mayor que la muestra PC-0,39-15. Sin embargo, los resultados están dentro del rango de la desviación estándar.

La resistencia a flexotracción de la muestra PC-0,39-15 es mayor que la muestra PC-0,35-20 a los 7 y 28 días en un 35 % y un 18 % respectivamente (Figura 4.3b). Sin embargo, a los 28 días los resultados son comparables entre ellos y están dentro de la desviación estándar.

Se observó que la permeabilidad de todas las muestras patrones (Figura 4.3c) se encuentran en el rango establecido por el comité 522 del ACI (2010) correspondiente a 0.135 cm/s, lo que permitiría su utilización con fines de pavimentación. Por otro lado, las porosidades obtenidas están entre 14 % y 16 % (Figura 4.3d), mientras que la porosidad de diseño fue de 15 %. Existe una variación inherente debido a la compactación de cada probeta para el análisis de permeabilidad, mientras que para el análisis de porosidad el ensayo proporciona la porosidad total (poros interconectados y cavidades que no contribuyen a la permeabilidad).

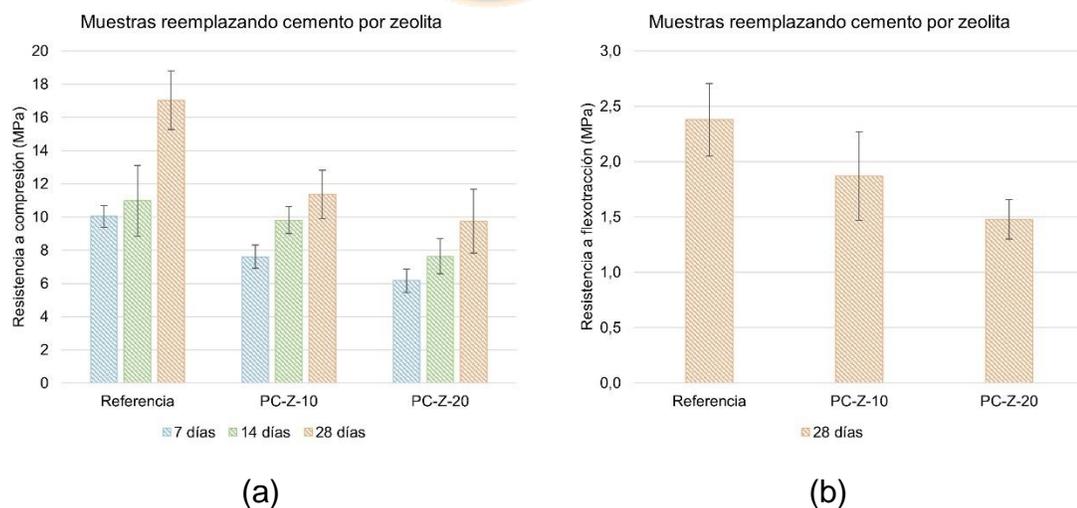
Existe una relación directa entre la porosidad y la permeabilidad, y la muestra de referencia PC-0,35-20 es en promedio un 27 % más permeable que la muestra PC-0,39-15. Esto puede deberse a que la muestra PC-0,39-15, que tiene una relación A/C más alta, el exceso de pasta de cemento podría contribuir a la obstrucción de los poros interconectados a medida que se desarrolla la resistencia del hormigón.

Considerando los resultados anteriores, la muestra PC-0,35-20 es apta para ser utilizada como muestra de referencia para la Serie 2 debido a sus aceptables resultados obtenidos para resistencia a compresión y flexotracción, y principalmente, debido a que su permeabilidad es mayor que la muestra PC-0,39-15.

4.4. Serie 2: Efectos de incorporar zeolita o pomacita

4.4.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas con zeolita

Los resultados de las propiedades mecánicas e hidráulicas para las muestras con zeolita en comparación con la muestra de referencia se presentan en la Figura 4.4. Para resultados y valores detallados ver Anexo 4.3.



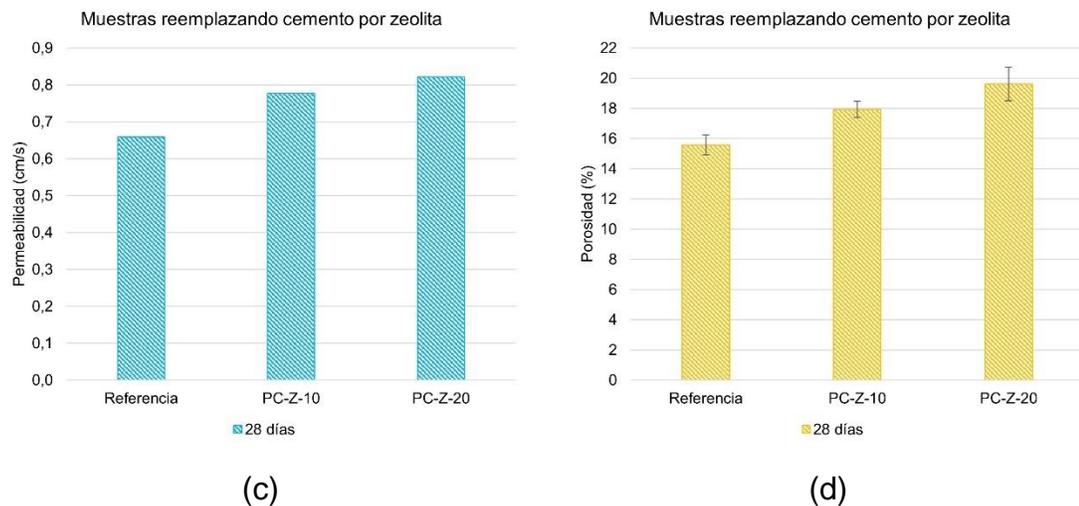


Figura 4.4. Propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras de hormigón permeable reemplazando cemento por zeolita: (a) Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a 28 días; (c) Permeabilidad a 28 días; (d) Porosidad a 28 días.

La trabajabilidad de todas las mezclas con zeolita (PC-Z-10 y PC-Z-20) obtuvieron como resultado un cono de asentamiento cero y una esfera estable. Esto se debe principalmente a que la muestra de referencia fue la PC-0,35-20 que obtuvo los mismos resultados de trabajabilidad. Adicionalmente en ninguna muestra se generó sedimentación de material en el fondo de los moldes.

Con respecto a la muestra de referencia, la resistencia a la compresión de la muestra PC-Z-10 (Figura 4.4a) disminuye en promedio en un 22 %, 11 % y 33 % a los 7, 14 y 28 días, respectivamente. En el caso de la muestra PC-Z-20 las diferencias son mayores, la resistencia a la compresión disminuye en promedio en un 38 %, 30 % y 43 % a los 7, 14 y 28 días, respectivamente.

La resistencia a flexotracción de la muestra PC-Z-10 a los 28 días (Figura 4.4b) disminuye un 21 % con respecto a la muestra de referencia, mientras que para la muestra PC-Z-20 disminuye un 38 %.

Se observó que la permeabilidad de todas las muestras (Figura 4.4c) se encuentran en el rango establecido por el comité 522 del ACI (2010), lo que permitiría su uso con fines de pavimentación. Por otro lado, las porosidades obtenidas se encuentran entre un 14 % y un 20 % (Figura 4.4d), mientras que la porosidad de diseño fue de 15 %.

Se observa que al sustituir el cemento por zeolita aumenta la porosidad, lo que provoca que la permeabilidad aumente de la misma forma. Existen investigaciones en las que el uso de zeolita aumenta las propiedades mecánicas hasta con un 10 % de reemplazo (Ahmadi y Shekarchi, 2010; Tran *et al.*, 2019; Emam y Yehia, 2017), sin embargo, en estas investigaciones se utiliza cemento Portland puro y otros tipos de zeolitas, además, se enfocan en hormigones tradicionales, no en hormigones permeables. Existen otros casos en los que la incorporación de zeolita disminuye o mantiene estables las propiedades mecánicas (Najimi *et al.*, 2012; Raggiot *et al.*, 2015; Raggiotti *et al.*, 2018; Pachideh *et al.*, 2019; Joshaghani, 2016; Azad *et al.*, 2020), resultados similares a los obtenidos en esta investigación.

4.4.2. Propiedades mecánicas e hidráulicas con pomacita

Los resultados de las propiedades mecánicas e hidráulicas para las muestras con pomacita en comparación con la muestra de referencia se presentan en la Figura 4.5. Para resultados y valores detallados ver Anexo 4.4.

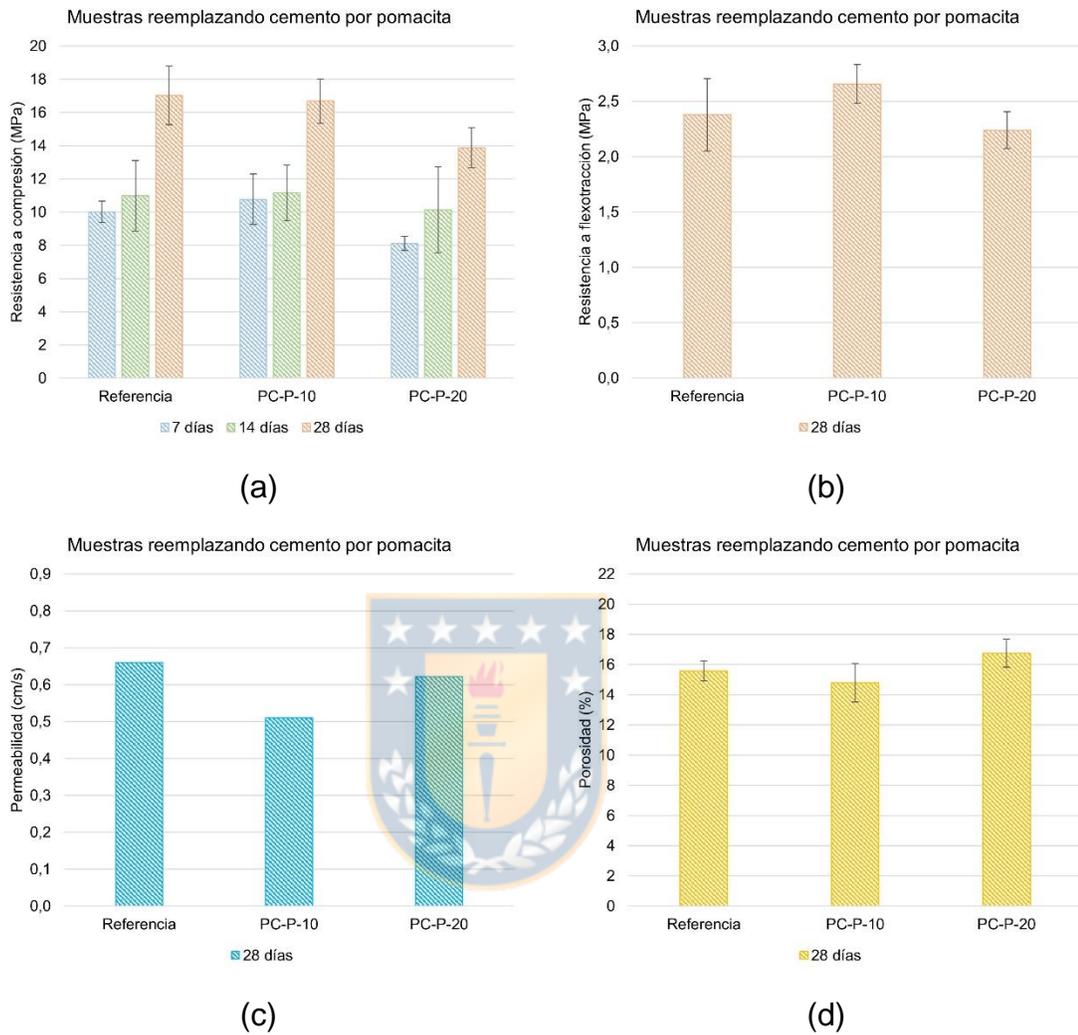


Figura 4.5 Propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras de hormigón permeable reemplazando cemento por pomacita: (a) Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a 28 días; (c) Permeabilidad a 28 días; (d) Porosidad a 28 días.

La trabajabilidad de todas las mezclas con pomacita (PC-P-10 y PC-P-20) obtuvieron como resultado un cono de asentamiento cero y una esfera estable. Esto se debe principalmente a que la muestra de referencia fue la PC-0,35-20

que obtuvo los mismos resultados de trabajabilidad. Adicionalmente en ninguna muestra se generó sedimentación de material en el fondo de los moldes.

Con respecto a la muestra de referencia, la resistencia a la compresión de la muestra de PC-P-10 (Figura 4.5a) aumenta en promedio a los 7 y 14 días en un 7 % y 2 % respectivamente, mientras que a los 28 días disminuye en un 2 %. En el caso de la muestra PC-P-20, la resistencia a la compresión disminuye en un 19 %, 8 % y 21 % a los 7, 14 y 28 días respectivamente. Se observa que las muestras con pomacita presentan resultados comparables a la muestra de referencia, ya que se encuentran en el rango de desviación estándar establecido.

La resistencia a flexotracción de la muestra de PC-P-10 a los 28 días (Figura 4.5b) aumenta en promedio en un 12 % con respecto a la muestra de referencia, mientras que para la muestra PC-P-20 disminuye en promedio en un 6 %. Se observa que los resultados con pomacita son comparables a la muestra de referencia e incluso reemplazando el 10 % del cemento se obtienen mayores resistencias.

Se observó que la permeabilidad de todas las muestras (Figura 4.5c) se encuentran en el rango establecido por el comité 522 del ACI (2010), lo que permitiría su uso con fines de pavimentación. Por otro lado, las porosidades obtenidas están entre un 14 % y un 18 % (Figura 4.5d), mientras que la porosidad de diseño fue de 15 %.

Se observa que al reemplazar el cemento por zeolita aumenta la porosidad, lo que provoca que la permeabilidad aumente de la misma manera, mientras que, en el caso de la pomacita, al reemplazar el 10 % de cemento, la permeabilidad y la porosidad disminuyen, y al reemplazar el 20 % los resultados de propiedades hidráulicas son similares a la muestra de referencia.

Existen investigaciones en las que el uso de pomacita disminuye las propiedades mecánicas hasta en un 20 % de reemplazo (Kabay *et al.*, 2015; Hossain, 2004), sin embargo, en estas investigaciones se utiliza cemento Portland puro, y se enfocan en hormigones tradicionales, hormigón liviano o morteros, y no en hormigón permeable. Existen pocas investigaciones en hormigones porosos donde la incorporación de pomacita aumenta las propiedades mecánicas del hormigón hasta en un 10 % de reemplazo (Azad *et al.*, 2020), resultados similares a los obtenidos en esta investigación.

Considerando los resultados anteriores, el mineral puzolánico que obtuvo el mejor desempeño fue la pomacita, siendo posible obtener resistencias similares a la muestra de referencia con hasta un 20 % de reemplazo, sin embargo, el mejor porcentaje de reemplazo de cemento por pomacita es del 10 %, con el cual incluso aumentó la resistencia (con respecto a la muestra de referencia) sin afectar significativamente la permeabilidad.

4.4.3. Análisis microscópico por SEM

La Figura 4.6 muestra la microestructura de la muestra de referencia, mientras que la microestructura de las muestras con zeolita o pomacita (como reemplazo del cemento en un 20 %) se muestran en la Figura 4.7 y Figura 4.8 respectivamente. Las muestras se analizaron alrededor de los 70 días para asegurar que la reacción puzolánica con el cemento se estabilizara y poder hacer comparaciones entre ellas. Para imágenes complementarias de microscopía electrónica de barrido (MEB) o SEM por su sigla en inglés (*Scanning Electron Microscopy*) ver Anexo 4.5.

Los principales componentes que se pueden identificar en las imágenes son:

- Silicato de calcio hidratado (o gel C-S-H): Es el principal producto de la hidratación del cemento Portland.
- Hidróxido de calcio: Los cristales de C-H son grandes cristales prismáticos de hidróxido de calcio y superficies de C-H pueden ser identificadas.
- Etringita: Es el resultado de la reacción del aluminato de calcio (C_3A) con el sulfato de calcio.

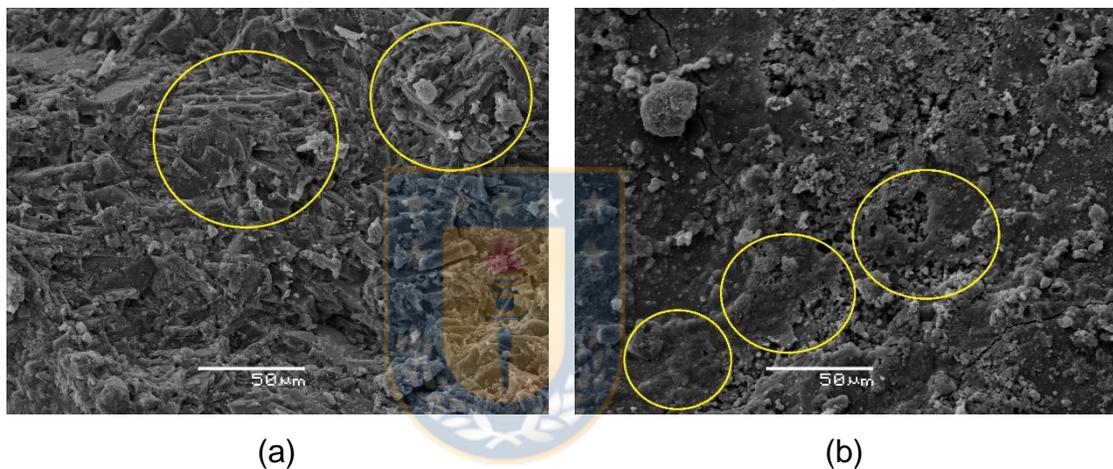


Figura 4.6. Microestructura de la muestra de referencia por imágenes SEM: (a) Vista de los cristales de C-H en matriz de cemento; (b) Gel C-S-H en matriz de cemento.

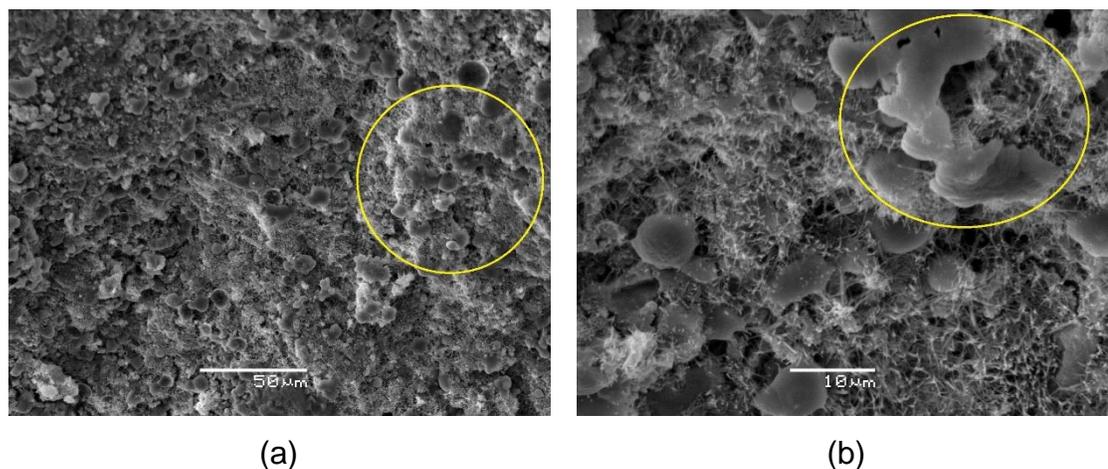


Figura 4.7. Microestructura de las muestras con un 20 % de zeolita reemplazando el cemento, por imágenes SEM: (a) Vista de la matriz de cemento y superficies C-H; (b) Vista de superficies C-H y cristales de etringita.

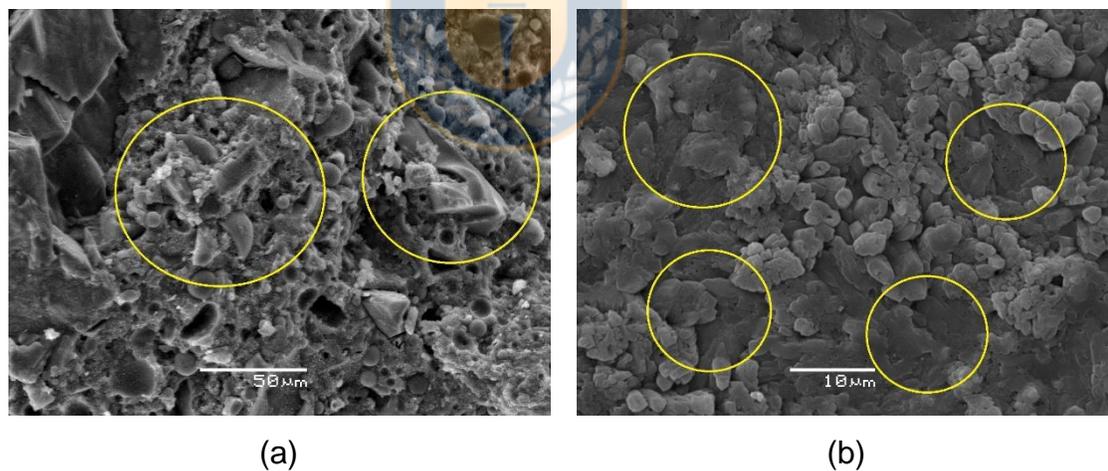


Figura 4.8. Microestructura de las muestras con un 20 % de pomacita reemplazando el cemento, por imágenes SEM: (a) Vista de la matriz de cemento y cristales de C-H; (b) Gel C-S-H en matriz de cemento.

Se observa que la muestra de referencia presenta una gran cantidad de cristales hexagonales de C-H (Figura 4.6a), y la matriz de gel C-S-H es más densa que la

muestra con zeolita, además, presenta grandes superficies de C-H (Figura 4.6b). La muestra con zeolita muestra una reducción en la cantidad de cristales hexagonales de C-H, a diferencia de la muestra de referencia, y presenta algunas pequeñas superficies de C-H (Figura 4.7a). Asimismo, se observa que (Figura 4.7b) existe una alta presencia de cristales de etringita. La muestra con pomacita muestra una fuerte presencia de cristales hexagonales de C-H (Figura 4.8a), una matriz microporosa más densa con grandes superficies de gel C-S-H (Figura 4.8b). Finalmente, la sustitución del cemento por este tipo de zeolita conduce a una reducción de la cantidad de cristales de C-H y reduce el tamaño de las superficies de C-H, lo cual es concordante con los resultados de otros autores (Ramezaniapour *et al.*, 2015).

Es importante señalar que, dado que la muestra con zeolita tiene una gran cantidad de cristales cortos de etringita, menos cristales de hidróxido de calcio y la matriz de cemento es más porosa, es posible que las muestras tiendan al agrietamiento temprano y por lo tanto se obtengan menores resistencias mecánicas y mayores propiedades hidráulicas (Colleparidi, 2003).

En el caso de la pomacita, se observa que la presencia del gel C-S-H en la matriz de cemento es más densa que en la muestra de referencia, y esto podría resultar en la obtención de mayores propiedades mecánicas y menores propiedades hidráulicas, ya que el gel C-S-H es el principal producto de hidratación del cemento y su principal fuente de resistencia (Kunther *et al.*, 2017).

4.5. Serie 3: Efectos de incorporación de aditivo junto con puzolana

4.5.1. Propiedades mecánicas e hidráulicas

Las propiedades mecánicas e hidráulicas de la muestra combinada con un 10 % de pomacita y aditivo en comparación con sus respectivas muestras de referencia se presentan en la Figura 4.9. Para resultados y valores detallados ver Anexo 4.6.

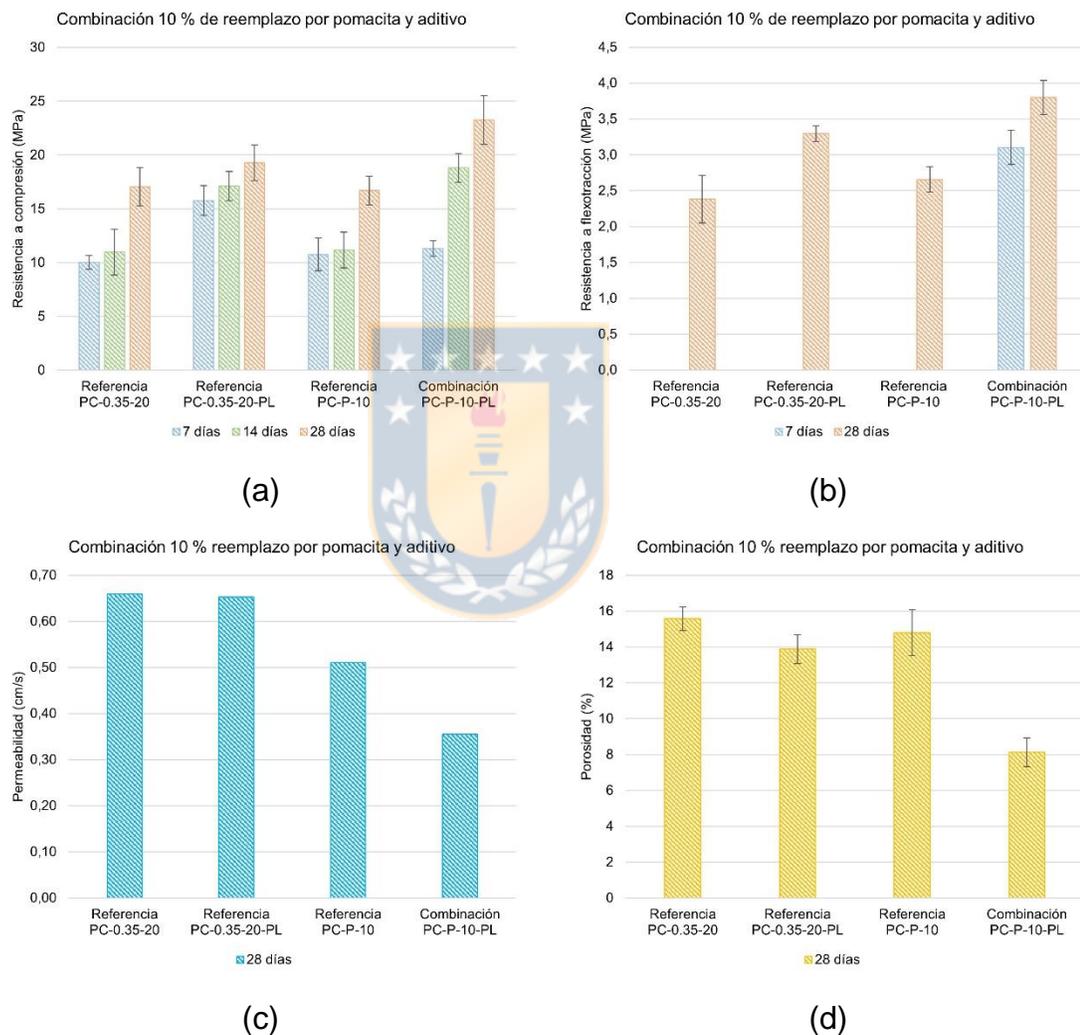


Figura 4.9. Propiedades mecánicas e hidráulicas de la muestra combinada de hormigón permeable reemplazando cemento por 10 % de pomacita y aditivo en comparación con sus respectivas muestras de referencia: (a) Resistencia a la

compresión a los 7, 14 y 28 días; (b) Resistencia a flexotracción a los 7 y 28 días; (c) Permeabilidad a los 28 días; (d) Porosidad a los 28 días.

La trabajabilidad de la mezcla de referencia PC-0,35-20-PL y la muestra combinada PC-P-10-PL obtuvieron como resultado un cono de asentamiento colapsado y una esfera inestable. Esto se debe principalmente al efecto innato del aditivo plastificante en estado fresco, sin embargo, en ambas muestras no se generó sedimentación de material en el fondo de los moldes.

Para la muestra PC-0,35-20, la incorporación de plastificante incrementó la resistencia promedio a los 7, 14 y 28 días en un 57 %, 56 % y 13 % respectivamente con respecto a la muestra sin aditivo. Este aumento de resistencia se debe al efecto innato del aditivo, que repele los granos de cemento, por lo que, utilizado como reductor de agua, permite disminuir la relación A/C de la mezcla para la misma trabajabilidad. A los 7 días, la resistencia a compresión de la muestra combinada (PC-P-10-PL) aumenta en promedio un 12 % y un 5 % con respecto a las muestras de referencia PC-0,35-20 y PC-P-10 respectivamente (Figura 4.9a), sin embargo, a esta edad, la resistencia a compresión de la muestra de referencia con aditivo (PC-0,35-20-PL) es superior en un 39 %. A los 14 días, mientras aumenta la diferencia de resistencia a compresión entre las muestras de referencia sin aditivo, los resultados con respecto a la muestra de referencia con aditivo son mayores. En específico, la resistencia a compresión de la muestra combinada aumenta en promedio en un 71 %, 10 % y 68 % con respecto a las muestras de referencia PC-0,35-20, PC-0,35-20-PL y PC-P-10 respectivamente. A los 28 días, los resultados de la muestra combinada son notablemente superiores a todas las muestras de referencia, específicamente, la resistencia a compresión aumenta en promedio en un 36 %, 20 % y 39 % con respecto a las muestras de referencia PC-0,35-20,

PC-0,35- 20-PL, y PC-P-10 respectivamente, lo que permite validar el uso simultáneo de la pomacita con aditivo.

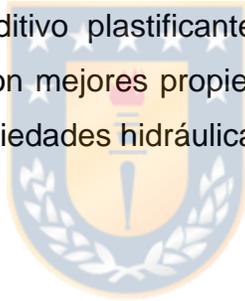
La resistencia a flexotracción de la muestra combinada (Figura 4.9b) a los 7 días superó la resistencia de las muestras de referencia a los 28 días excepto en el caso de la muestra PC-0,35-20-PL. A los 28 días, la resistencia a flexotracción de la muestra combinada aumentó en un 59 %, 15 % y 43 % en comparación con las muestras de referencia PC-0,35-20, PC-0,35-20-PL y PC-P-10 respectivamente. La incorporación simultánea de aditivo con pomacita permite mejorar considerablemente la resistencia a flexotracción, obteniendo mejores resultados que todas las muestras de referencia.

Se observó que la permeabilidad de todas las muestras (Figura 4.9c) se encuentran en el rango establecido por el comité 522 del ACI (2010), lo que permitiría su uso con fines de pavimentación, sin embargo, la permeabilidad de la muestra combinada disminuye en promedio un 91 %, 90 % y 49 % en comparación con las muestras de referencia PC-0,35-20, PC-0,35-20-PL y PC-P-10, respectivamente. Por otro lado, las porosidades obtenidas para la muestra combinada se encuentran entre un 7 % y un 9 % (Figura 4.9d), mientras que la porosidad de diseño fue de 15 %, y es inferior a las muestras de referencia. Esto es esperable debido a las altas propiedades mecánicas obtenidas y debido a la disminución de la porosidad inherente al uso de la pomacita investigada en la serie anterior.

4.6. Conclusiones

En este capítulo se detallaron y analizaron los resultados obtenidos en la Serie 0 o etapa previa y en las 3 series experimentales para las propiedades mecánicas

e hidráulicas de las distintas mezclas de hormigones permeables. En la Serie 0, se determinaron las mejores mezclas para dos relaciones A/C distintas, variando la cantidad de árido fino sobre árido grueso. En la Serie 1 se determinó la mejor mezcla sin aditivo para ser utilizada como muestra patrón para reemplazar parcialmente el cemento por zeolita o pomacita. En la Serie 2 se obtuvo que el mineral puzolánico que presenta mejor desempeño corresponde a la pomacita reemplazando un 10 % del cemento. En esta sección, análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) o SEM por su sigla en inglés (*Scanning Electron Microscopy*) permitió identificar diferencias entre muestra patrón y con reemplazos puzolánicos a nivel microscópico y explicar los resultados obtenidos. Finalmente, en la Serie 3, se concluye que la muestra combinada con un 10 % de pomacita junto con aditivo plastificante como reductor de agua genera hormigones permeables con mejores propiedades mecánicas sin comprometer significativamente sus propiedades hidráulicas.



CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Discusión

Es posible reducir la cantidad de cemento reemplazándolo parcialmente por un mineral puzolánico, obteniendo resultados equiparables o mejores en términos de resistencia y adecuados en términos de permeabilidad para mezclas de hormigón permeable.

El estudio se enfoca en las propiedades mecánicas e hidráulicas de los hormigones permeables con zeolita o pomacita como reemplazo parcial del cemento, específicamente en la evaluación de la trabajabilidad, resistencia a la compresión, resistencia a flexotracción, permeabilidad y porosidad.

Los resultados indican que existe un porcentaje óptimo de sustitución del cemento por un mineral puzolánico (10 % de pomacita) que permite obtener propiedades mecánicas comparables o mejores que el hormigón permeable de referencia, sin afectar significativamente sus propiedades hidráulicas.

Si bien los reportes indican que la incorporación de zeolita o pomacita podrían ocasionar un incremento en la resistencia del hormigón (Tran *et al.*, 2019; Emam y Yehia, 2017; Hossain, 2004; Pachideh *et al.*, 2020; Pachideh *et al.*, 2019), este no es el caso considerando solo la zeolita. La explicación está relacionada con el hecho de que los resultados obtenidos por otros autores corresponden en su mayoría a mezclas de hormigones tradicionales (Tran *et al.*, 2019; Emam y Yehia, 2017; Kabay *et al.*, 2015; Hossain, 2004; Joshaghani, 2016), por lo que el efecto del uso de minerales puzolánicos en mezclas de hormigón permeable, en adición a las demás variables, formó parte de la investigación y se debe considerar el

efecto de los diferentes métodos de diseño y el equilibrio entre resistencia y permeabilidad.

Otra consideración importante es que el hormigón y los minerales son geodependientes, es decir, sus características y propiedades dependen de una serie de factores ambientales y geográficos que influyen en las propiedades de los materiales. Por ejemplo, existen diferentes tipos de zeolitas con diferentes composiciones químicas y mineralógicas, por lo tanto, algunos minerales podrían ser más reactivos con el cemento dependiendo de su estructura química. Otro factor es el tipo de cemento utilizado. En Chile, el cemento más común es el tipo puzolánico, el mismo utilizado en la investigación, por lo que este efecto debe ser considerado en investigaciones donde se utilice cemento Portland puro.

Por lo tanto, los resultados de esta investigación son útiles para los casos en que la zeolita, la pomacita y/o el cemento utilizado sean similares a los utilizados en este estudio.

La viabilidad de utilizar el mineral depende de los aspectos técnicos y económicos. En el caso de ambos minerales, se debe evaluar su desempeño en pavimentos de hormigón y su viabilidad económica, considerando que tanto la zeolita como la pomacita son más económicas que el cemento, de acuerdo con el *Mineral Commodity Summaries (U.S. Geological Survey, 2021)*.

Los prometedores resultados obtenidos en esta investigación pueden contribuir a reducir hasta en un 20 % el cemento utilizado en hormigones permeables, reemplazándolo por minerales puzolánicos, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono generada por la industria del cemento y permitiendo el uso de minerales disponibles localmente para su uso en pavimentos permeables.

Esto es importante porque, dadas las altas resistencias obtenidas, normalmente entre el rango de 1.0 MPa a 3.8 MPa en la resistencia a flexotracción (Tennis *et al.*, 2004), el uso de pavimentos permeables puede extenderse a ciclovías, estacionamientos, caminos peatonales o lugares donde las sollicitaciones sobre el pavimento no sean extremadamente altas.

La presente investigación se centró en la evaluación de las propiedades principales y fundamentales de los hormigones permeables, sin embargo, considerando los diferentes beneficios de sustituir el cemento por pomacita, se recomienda en futuras investigaciones evaluar diferentes características o propiedades como la resistencia a la abrasión/ desgaste, resistencia a la tracción indirecta, durabilidad y resistencia a los ciclos de hielo/deshielo.

Finalmente, es importante resaltar la importancia de esta fase de investigación, ya que, si bien, en diferentes porcentajes de reemplazo por cemento, se puede incorporar zeolita o pomacita, se ha demostrado que existe un porcentaje óptimo de sustitución con uno de los dos minerales (10 % pomacita) que no reduce significativamente las propiedades del hormigón y, por el contrario, las mejora, siendo equiparables a las propiedades del hormigón de referencia.

5.2. Conclusiones

Considerando la incorporación de zeolita como reemplazo del cemento, se encontró que, a cualquier porcentaje de reemplazo, la resistencia a la compresión y la resistencia a flexotracción disminuyen. Por otro lado, a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, aumenta tanto la permeabilidad como la porosidad de las muestras.

Considerando la incorporación de pomacita como reemplazo del cemento, los hallazgos más importantes son los relacionados con la resistencia a la compresión y a la flexotracción. Se observa que con una sustitución del 10 % de cemento por pomacita se obtienen mayores resistencias a la compresión y a la flexotracción que la muestra de referencia, mientras que la permeabilidad disminuye, pero no significativamente. Al 20 % de reemplazo, las resistencias disminuyen, pero aún son comparables a la muestra de referencia, ya que están dentro del rango de desviación estándar, y la permeabilidad es similar a la muestra de referencia para este porcentaje.

La incorporación de aditivo plastificante como reductor de agua permite mejorar en todos los casos la resistencia a la compresión y a la flexotracción, sin afectar significativamente la permeabilidad o porosidad de las muestras. Sin embargo, es necesario considerar que, en el caso de hormigones permeables, el tipo de aditivo a utilizar y su dosificación debe investigarse previamente en laboratorio para evitar la sedimentación de la pasta de cemento de la mezcla para evitar la generación de una capa impermeable en el fondo de los moldes de las muestras.

La diferencia entre las resistencias obtenidas al reemplazar el cemento por zeolita o pomacita se explica interpretando las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM por su sigla en inglés), que indican que existen diversas diferencias entre las muestras con puzolanas y con respecto a la muestra de referencia. Las muestras con zeolita presentan menos cristales hexagonales de hidróxido de calcio C-H, las superficies C-H son más pequeñas, hay mayor presencia de etringita y la matriz C-S-H es menos densa que la muestra de referencia. Las muestras con pomacita, por el contrario, muestran una matriz microporosa densa similar a la muestra de referencia, la matriz C-S-H es más densa que la muestra de referencia y se observa una gran cantidad de cristales hexagonales de C-H.

Los prometedores resultados obtenidos en resistencia a flexotracción y permeabilidad al reemplazar el cemento con un 10 % de pomacita e incorporarle simultáneamente aditivo, lo hacen ideal para su uso en pavimentos permeables, ya que un requisito fundamental para su diseño es la resistencia a flexotracción.

Finalmente, poder reemplazar un 10 % o un 20 % del cemento con minerales puzolánicos obtenidos localmente, desde un punto de vista sustentable, contribuye a la reducción de la huella de carbono de la industria del cemento y promueve el uso de materiales cementicios suplementarios en países donde su uso aún no se ha generalizado.

El trabajo presentado intenta contribuir a la reducción del uso de cemento en estructuras de pavimentos permeables, buscando alternativas de menor impacto ambiental como las puzolanas naturales (zeolita y pomacita) como alternativa a los pavimentos tradicionales.

Se recomienda en futuras investigaciones evaluar distintas características o propiedades no evaluadas en la investigación como la resistencia a la abrasión/desgaste, resistencia a la tracción indirecta, durabilidad, resistencia a ciclos de hielo/deshielo y construcción de tramos de prueba para validar los resultados obtenidos en esta fase investigativa y comparar con resultados obtenidos en terreno.

REFERENCIAS

ACI Committe 522. *522R-10: Report on Pervious Concrete*; Technical Documents; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2010.

Ahmadi, B.; Shekarchi, M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and concrete composites* **2010**, 32, pp. 134-141.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.006>

Andrés-Valeri, V.C.; Marchioni, M.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Giustozzi, F.; Becciu, G. Laboratory Assessment of the Infiltration Capacity Reduction in Clogged Porous Mixture Surfaces. *Sustainability* **2016**, 8, pp. 751.
<https://doi.org/10.3390/su8080751>

ASTM C618-19. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use in Concrete*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019.

ASTM C1754/C1754M-12. *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2012.

Azad, A.; Saeedian, A.; Mousavi, S. F.; Karami, H.; Farzin, S.; Singh, V. P. Effect of zeolite and pumice powders on the environmental and physical characteristics of green concrete filters, *Construction and Building Materials* **2020**, 240.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117931>

Bonicelli, A.; Giustozzi, F.; Crispino, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete, *Construction and Building materials* **2015**, *91*, pp. 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>

Carsana, M.; Frassoni, M.; Bertolini, L. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* **2014**, *45*, pp. 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005>

Chandrappa, A. K.; Biligiri, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review, *Construction and building materials* **2016**, *111*, pp. 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>

Cires, F.A. Propuesta de Método de Diseño de Mezclas de Hormigón Poroso para Pavimentos Permeables. Engineering Thesis, University of Concepción, Concepción, Chile, 2021.

Colleparidi, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and concrete Composites* **2003**, *25*, pp. 401-407. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00080-X)

Costa, F. B. P. D.; Lorenzi, A.; Haselbach, L.; Silva Filho, L. C. P. D. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* **2018**, *11*, pp. 1151-1159. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500013>

Deo, O.; Neithalath, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Construction and Building Materials* **2011**, *25*, pp. 4181-4189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055>

Divyah, N.; Prakash, R.; Srividhya, S.; Sivakumar, A. Parametric study on lightweight concrete-encased short columns under axial compression- Comparison of design codes. *Structural Engineering and Mechanics* **2022**, *83*, pp. 387–400. <https://doi.org/10.12989/SEM.2022.83.3.387>

Elizondo-Martínez, E.-J.; Andrés-Valeri, V.-C.; Rodríguez-Hernández, J.; Sangiorgi, C. Selection of Additives and Fibers for Improving the Mechanical and Safety Properties of Porous Concrete Pavements through Multi-Criteria Decision-Making Analysis. *Sustainability* **2020**, *12*, 2392. <https://doi.org/10.3390/su12062392>

Elkady, H.; Serag, M. I.; Elfeky, M. S. Effect of nano silica de-agglomeration, and methods of adding super-plasticizer on the compressive strength, and workability of nano silica concrete. *Civil and Environmental Research* **2013**, *3*, pp. 21-34.

Emam, E.; Yehia, S. Performance of concrete containing zeolite as a supplementary cementitious material, *International Research Journal of Engineering and Technology* **2017**, *4*, pp. 1619-1625.

Federación Interamericana del Cemento. *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.

Fernández, L.; Vitola, L.; Salminci, P. *Estado del arte en el uso de hormigones porosos, XII congreso de vialidad y tránsito*; Instituto del Cemento Portland Argentino: Buenos Aires, Argentina, 1998, pp. 761-784.

FICEM; ICH. *Hoja de Ruta de la Industria del Cemento en Chile: Hacia una Economía Baja en Carbono*; Federación Interamericana del Cemento e Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile: Chile, 2019.

Hossain, K. M. A. Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, *Cement and concrete research* **2004**, 34, pp. 283-291.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.004>

Huang, J.; Luo, Z.; Khan, M. B. E. Impact of aggregate type and size and mineral admixtures on the properties of pervious concrete: An experimental investigation, *Construction and Building Materials* **2020**, 265.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120759>

INN. *Áridos para morteros y hormigones — Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las arenas*, NCh1239.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.

INN. *Áridos para morteros y hormigones — Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas*, NCh1117.2010; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2010.

INN. *Áridos para morteros y hormigones — Requisitos generales*, NCh163.1979; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1979.

INN. *Áridos para morteros y hormigones — Tamizado y determinación de la granulometría*, NCh165.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.

INN. *Cemento — Terminología, clasificación y especificaciones generales*, NCh148.1968; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1968.

INN. *Hormigón y mortero — Aditivos — Clasificación y requisitos*, NCh2182.1995; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1995.

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 — Determinación de la docilidad — Método del asentamiento del cono de Abrams*, NCh1019.2009; 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.

Jiang, P.; Chen, Y., Wang; W., Yang, J.; Wang, H.; Li, N.; Wang, W. Flexural behavior evaluation and energy dissipation mechanisms of modified iron tailings

powder incorporating cement and fibers subjected to freeze-thaw cycles. *Journal of Cleaner Production* **2022**, 351, 131527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131527>

Joshaghani, A. The Effects of Zeolite as Supplementary Cement Material on Pervious Concrete. 2016 International Concrete Sustainability Conference, Washington D.C., USA, 2016.

Juenger, M. C.; Snellings, R.; Bernal, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research* **2019**, 122, pp. 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>

Kabay, N.; Tufekci, M. M.; Kizilkanat, A. B.; Oktay, D. Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials, *Construction and Building Materials* **2015**, 85, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026>

Khan, M.; Ali, M. Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber. *Construction and Building Materials* **2018**, 182, pp. 703-715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.150>

Kováč, M.; Sičáková, A. Pervious Concrete as an Environmental Solution for Pavements: Focus on Key Properties. *Environments* **2018**, 5, 11. <https://doi.org/10.3390/environments5010011>

Kunther, W.; Ferreira, S.; Skibsted, J. Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders. *Journal*

of *Materials Chemistry A* **2017**, 5, pp. 17401-17412.
<https://doi.org/10.1039/C7TA06104H>

Malagavelli, V.; Paturu, N. R. Strength and Workability Characteristics of Concrete by using Different super plasticizers. *International Journal of Materials Engineering* **2012**, 2, pp. 7-11. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20120201.02>

Mishra, S.; Tamrakar, R. Experimental Studies on Properties of Concrete due to different ingredient based Super Plasticizers. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research* **2013**, 2, pp. 1036-1040.

Monteiro, P. J.; Miller, S. A.; Horvath, A. Towards sustainable concrete, *Nature materials* **2017**, 16, pp. 698-699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>

Nagrockiene, D.; Pundienė, I.; Kicaite, A. The effect of cement type and plasticizer addition on concrete properties. *Construction and building materials* **2013**, 45, pp. 324-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.076>

Najimi, M.; Sobhani, J.; Ahmadi, B.; Shekarchi, M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and building materials* **2012**, 35, pp. 1023-1033. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038>.

Nazeer, M.; Kapoor, K.; Singh, S. P. Pervious concrete: a state-of-the-art review, *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»* **2020**, 7, pp. 417-437.

Nguyen, D. H.; Sebaibi, N.; Boutouil, M.; Leleyter, L.; Baraud, F. A modified method for the design of pervious concrete mix, *Construction and Building*

Materials **2014**, 73, pp. 271-282.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>

NRMCA. *Pervious Concrete: Guideline to Mixture Proportioning and Research Report*, National Ready Mixed Concrete Association: Silver Spring, Maryland, USA, 2009.

Pachideh, G.; Gholhaki, M.; Moshtagh, A. Performance of porous pavement containing different types of pozzolans, *International Journal of Engineering* **2019**, 32, pp. 1277-1283. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.09c.07>

Pachideh, G.; Gholhaki, M.; Moshtagh, A. Experimental study on mechanical strength of porous concrete pavement containing pozzolans, *Advances in Civil Engineering Materials* **2020**, 9, pp. 38-52.
<https://doi.org/10.1520/ACEM20180111>

Prakash, R.; Divyah, N.; Srividhya, S.; Avudaiappan, S.; Amran, M.; Naidu Raman, S.; Guindos, P.; Vatin, N.I.; Fediuk, R. Effect of Steel Fiber on the Strength and Flexural Characteristics of Coconut Shell Concrete Partially Blended with Fly Ash. *Materials* **2022**, 15, 4272. <https://doi.org/10.3390/ma15124272>

Raggiot, B. B.; Positieri, M. J.; Locati, F., Murra, J.; Marfil, S. Zeolite, study of aptitude as a natural pozzolan applied to structural concrete, *Revista de la Construcción, Journal of Construction* **2015**, 14, pp. 14-20.
<http://146.155.94.136/index.php/RDLC/article/view/13302>

Raggiotti, B. B.; Positieri, M. J.; Oshiro, Á. Natural zeolite, a pozzolan for structural concrete, *Procedia Structural Integrity* **2018**, 11, pp. 36-43.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.006>

Ramezaniapour, A. A.; Mousavi, R.; Kalhori, M.; Sobhani, J.; Najimi, M. Micro and macro levels properties of natural zeolite contained concretes. *Construction and Building Materials* **2015**, *101*, pp. 347-358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.101>

Sahdeo, S. K.; Ransinchung, G. D.; Rahul, K. L.; Debbarma, S. Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures, *Construction and Building Materials* **2020**, *255*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119260>

Suraneni, P.; Hajibabae, A.; Ramanathan, S.; Wang, Y.; Weiss, J. New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* **2019**, *103*, pp. 331-338. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017>

Takebayashi, H.; Moriyama, M. Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation, *Advances in Materials Science and Engineering* **2012**, *2012*. <https://doi.org/10.1155/2012/523051>

Tennis, P. D.; Leming, M. L.; Akers, D. J. *Pervious Concrete Pavements*; Portland Cement Association: Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association: Silver Spring, Maryland, USA, 2004.

Topçu, İ. B.; Ateşin, Ö. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. *Construction and Building Materials* **2016**, *120*, pp. 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.112>

Tran, Y. T.; Lee, J.; Kumar, P.; Kim, K. H.; Lee, S. S. Natural zeolite and its application in concrete composite production, *Composites Part B: Engineering* **2019**, 165, pp. 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.084>

U.S. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2021*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2021. <https://doi.org/10.3133/mcs2021>

Yang, J.; Jiang, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cement and concrete research* **2003**, 33, pp. 381-386. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)



ANEXO 3.1: Distribuciones granulométricas de áridos

Tabla A.3.1.1. Distribución granulométrica de árido grueso.

Tamiz	Abertura (mm)	% Retenido	% Que pasa
#3/4	19	0,00	100,00
#1/2	12,5	0,00	100,00
#3/8	9,5	3,20	96,80
#4	4,75	88,97	7,83
#8	2,36	4,27	3,56
#16	1,18	0,71	2,85
Residuo	-	2,85	0,00

Tabla A.3.1.2 Distribución granulométrica de árido fino.

Tamiz	Abertura (mm)	% Retenido	% Que pasa
N°4	4,75	0,50	99,50
N°8	2,36	2,68	96,82
N°16	1,18	12,81	84,01
N°30	0,59	32,17	51,84
N°50	0,30	38,49	13,35
N°100	0,15	12,35	0,99
Residuo	-	0,99	0,00

ANEXO 3.2: Detalles del método de diseño para dosificaciones

El método de dosificación utilizado como base corresponde al método desarrollado por Nguyen *et al.* (2014), teniendo en consideración recomendaciones del método ICPA o Instituto del Cemento Portland Argentino (Fernández *et al.*, 2011) y de Cires (2021) para determinar parámetros de entrada al método. El procedimiento para el diseño de mezclas según este método 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.
- 4) Calcular el volumen de los áridos " V_G " de acuerdo con la Ecuación A.3.2.1.
- 5) Estimar el porcentaje de absorción de los áridos " b " según la proporción de árido fino y árido grueso elegida según la Ecuación A.3.2.2.
- 6) Calcular las cantidades de árido fino " A_f " y árido grueso " A_g " de acuerdo con la proporción elegida según las Ecuaciones A.3.2.3 y A.3.2.4.
- 7) Determinar la razón agua/cemento según la prueba de drenaje del aglomerante, valores generalmente ubicados en el rango entre 0,27 y 0,40.

- 8) Calcular el parámetro " β " según la Ecuación A.3.2.5.
- 9) Calcular el volumen de pasta de cemento " V_p " según la Ecuación A.3.2.6.
- 10) Calcular las cantidades de cemento (" C ") y agua (" A ") según Ecuaciones A.3.2.7 y A.3.2.8 respectivamente.

La recomendación del método ICPA o Instituto del Cemento Portland Argentino (Fernández et al., 2011) es referente a la cantidad de árido grueso como parámetro de entrada, ya que bajo este método y para gravilla 3/8" existe un parámetro de correlación " K " único, de valor 0,9 que se aplica a la densidad aparente compactada del árido grueso para obtener los mejores valores de resistencias mecánicas. Por esto, se estableció un rango entre 1325 Kg/m³ y 1365 kg/m³ como valores a obtener en el diseño final de las mezclas.

La recomendación de Cires (2021) indica que la incorporación de mayor cantidad de árido fino (igual o superior al 12 %) mejora las propiedades mecánicas del hormigón permeable con áridos y cementos locales, por lo que se consideró un rango de salida válido entre 10 % y 20 % de árido fino sobre árido grueso para obtener los mejores resultados. Por otra parte, su investigación sobre métodos de diseño concluyó que los mejores resultados se obtuvieron cuando la relación árido fino a cemento (" AF/C ") era mayor a 0,5 y la relación árido grueso a cemento (" AG/C ") era cercana a 4, por lo que esos factores fueron tomados en consideración.

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

Cálculo del volumen de áridos (“ V_G ”):

$$V_G = \frac{1 - V_v}{a \times (k^3 - 1) + 1 + b} \quad (\text{A.3.2.1})$$

Donde:

“ a ”: Porcentaje de áridos más grandes que 80 μm .

“ b ”: Porcentaje de absorción de los áridos.

“ k ”: Parámetro k determinado.

“ V_v ”: Porosidad de diseño determinada.

Cálculo de porcentaje de absorción de los áridos (“ b ”):

$$b = C_{abs}A_g \times \%A_g + C_{abs}A_f \times \%A_f \quad (\text{A.3.2.2})$$

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 definido.

“ $\%A_f$ ”: Porcentaje de árido fino definido.

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

$$A_f = V_G \times \%A_f \quad (\text{A.3.2.3})$$

$$A_g = V_G \times (1 - \%A_f) \quad (\text{A.3.2.4})$$

Cálculo de parámetro (“ β ”):

$$\beta = \frac{3 x (k - 1)}{a x (k^3 - 1) + 1 + b} x \left(\frac{k + 1}{2} \right)^2 \quad (\text{A.3.2.5})$$

Estimación del volumen de pasta (“ V_P ”):

$$V_P = \beta x (1 - V_V) \quad (\text{A.3.2.6})$$

Estimación de las cantidades de cemento (“ C ”) y agua (“ A ”):

$$C = \frac{V_P}{\left(\frac{1}{\gamma_C} + \frac{w/c}{\gamma_A} \right)} \quad (\text{A.3.2.7})$$

$$A = C x (w/c) \quad (\text{A.3.2.8})$$



Donde:

“ γ_C ”: Peso específico del cemento.

“ γ_A ”: Peso específico del agua.

“ w/c ”: Razón agua cemento.

Tabla A.3.2.1. Datos de entrada en método de diseño Nguyen (2014) para muestras con relación A/C de 0,39.

Parámetros	PC-0,39-10	PC-0,39-15	PC-0,39-20
Densidad cemento (kg/m ³)	2800	2800	2800
Densidad real árido fino (kg/m ³)	2682	2682	2682
Densidad real árido grueso (kg/m ³)	2643	2643	2643

Absorción árido fino (%)	1,75	1,75	1,75
Absorción árido grueso (%)	1,49	1,49	1,49
Parámetro "a" (%)	99,328	99,324	99,320
Parámetro "b" (%)	1,516	1,529	1,542
Porosidad de diseño (%)	15,00	15,00	15,00
Relación A/C	0,39	0,39	0,39
Parámetro de calibración "k"	1,1411	1,1298	1,1195
Proporción AF/AG inicial (%)	8,974	12,881	16,467
Relación AF/AG real	10,00	15,00	20,00
Relación AF/C real	0,371	0,585	0,820
Relación AG/C real	3,705	3,896	4,097

Tabla A.3.2.2. Datos de entrada en método de diseño Nguyen (2014) para muestras con relación A/C de 0,35.

Parámetros	PC-0,35-10	PC-0,35-15	PC-0,35-20
Densidad cemento (kg/m ³)	2800	2800	2800
Densidad real árido fino (kg/m ³)	2682	2682	2682
Densidad real árido grueso (kg/m ³)	2643	2643	2643
Absorción árido fino (%)	1,75	1,75	1,75
Absorción árido grueso (%)	1,49	1,49	1,49
Parámetro "a" (%)	99,328	99,324	99,320
Parámetro "b" (%)	1,516	1,529	1,542
Porosidad de diseño (%)	15,00	15,00	15,00
Relación A/C	0,35	0,35	0,35
Parámetro de calibración "k"	1,1411	1,1298	1,1195
Proporción AF/AG inicial (%)	8,974	12,881	16,467
Relación AF/AG real	10,00	15,00	20,00
Relación AF/C real	0,351	0,553	0,776
Relación AG/C real	3,507	3,687	3,878

ANEXO 4.1: Propiedades de muestras en Serie 0

Tabla A.4.1.1. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,39-10 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	28	206,55	11,90	13,57	1,91
2		276,62	15,65		
3		232,36	13,15		

Tabla A.4.1.2. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,39-15 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	28	244,75	13,85	13,29	1,91
2		262,42	14,85		
3		197,18	11,16		

Tabla A.4.1.3. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,39-20 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	28	250,17	14,16	14,53	0,52
2		267,40	15,13		
3		252,90	14,31		

Tabla A.4.1.4. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,35-10 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	28	325,71	18,43	18,53	0,36
2		321,90	18,22		
3		334,59	18,93		

Tabla A.4.1.5. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,35-15 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	28	300,43	17,00	15,15	1,66
2		258,56	14,63		
3		244,12	13,81		

Tabla A.4.1.6. Resultados resistencia a compresión a 28 días de muestra PC-0,35-20 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	28	291,45	16,49	18,77	2,01
2		358,74	20,30		
3		344,98	19,52		

Tabla A.4.1.7. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,39-10 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
4	28	0,26	0,24
		0,23	
		0,23	

Tabla A.4.1.8. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,39-15 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
4	28	0,71	0,73
		0,74	
		0,74	

Tabla A.4.1.9. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,39-20 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
4	28	0,54	0,55
		0,56	
		0,56	

Tabla A.4.1.10. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,35-10 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
4	28	0,45	0,46
		0,43	
		0,50	

Tabla A.4.1.11. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,35-15 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
4	28	0,69	0,73
		0,75	
		0,75	

Tabla A.4.1.12. Resultados permeabilidad a 28 días de muestra PC-0,35-20 en Serie 0.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
4	28	0,68	0,68
		0,68	
		0,70	

ANEXO 4.2: Propiedades de muestras en Serie 1

Tabla A.4.2.1. Resultados resistencia a compresión de muestra patrón PC-0,39-15.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	201,38	11,40	11,15	1,55
2		207,28	11,73		
3		232,75	13,17		
4		185,08	10,47		
5		158,68	8,98		
6	14	250,32	14,17	14,74	2,16
7		200,11	11,32		
8		280,72	15,89		
9		299,21	16,93		
10		272,27	15,41		
11	28	276,81	15,66	15,92	1,94
12		238,90	13,52		
13		310,63	17,58		
14		259,78	14,70		
15		320,63	18,14		

Tabla A.4.2.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra patrón PC-0,39-15.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	7	21,74	2,52	2,57	0,12
17		20,75	2,51		

18		20,17	2,44		
19		22,56	2,76		
20		21,78	2,60		
21	28	22,60	2,95	2,81	0,20
22		24,77	2,97		
23		23,00	2,76		
24		20,54	2,48		
25		24,19	2,87		

Tabla A.4.2.3. Resultados de permeabilidad de muestra patrón PC-0,39-15.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
26	28	0,50	0,53
		0,54	
		0,53	

Tabla A.4.2.4. Resultados de porosidad de muestra patrón PC-0,39-15.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
27	28	16,62	14,62	1,83
28		14,22		
29		13,02		

Tabla A.4.2.5. Resultados resistencia a compresión de muestra patrón PC-0,35-

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	169,95	9,62	10,02	0,64
2		172,20	9,74		
3		197,47	11,17		
4		172,83	9,78		
5		173,37	9,81		
6	14	226,36	12,81	10,97	2,13
7		187,08	10,59		
8		136,87	7,75		
9		230,12	13,02		
10		188,88	10,69		
11	28	335,81	19,00	17,03	1,76
12		300,72	17,02		
13		279,89	15,84		
14		261,39	14,79		
15		326,73	18,49		

Tabla A.4.2.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra patrón PC-0,35-20.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	7	17,92	2,14	1,91	0,18
17		16,42	1,92		
18		16,92	2,01		
19		15,18	1,79		
20		13,98	1,69		
21	28	16,85	2,20	2,38	0,33
22		23,63	2,84		
23		21,19	2,50		
24		20,32	2,38		

25		16,69	1,97		
----	--	-------	------	--	--

Tabla A.4.2.7. Resultados de permeabilidad de muestra patrón PC-0,35-20.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
26	28	0,62	0,66
		0,66	
		0,70	

Tabla A.4.2.8. Resultados de porosidad de muestra patrón PC-0,35-20.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
27	28	15,05	15,57	0,66
28		16,31		
29		15,35		

ANEXO 4.3: Propiedades de muestras en Serie 2 con zeolita

Tabla A.4.3.1. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	132,72	7,51	7,60	0,71
2		124,87	7,07		
3		139,70	7,91		
4		121,21	6,86		
5		152,43	8,63		
6	14	193,42	10,95	9,80	0,82
7		165,41	9,36		
8		183,27	10,37		
9		159,51	9,03		
10		164,15	9,29		
11	28	192,93	10,92	11,35	1,46
12		186,44	10,55		
13		169,90	9,61		
14		220,11	12,46		
15		233,39	13,21		

Tabla A.4.3.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	28	13,30	1,60	1,87	0,40
17		13,18	1,58		

18		12,97	1,57		
19		18,33	2,17		
20		20,16	2,42		

Tabla A.4.3.3. Resultados de permeabilidad de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
21	28	0,81	0,78
		0,75	
		0,78	

Tabla A.4.3.4. Resultados de porosidad de muestra PC-Z-10 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
22	28	18,19	17,93	0,54
23		18,29		
24		17,31		

Tabla A.4.3.5. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	116,62	6,60	6,16	0,70

2		123,21	6,97		
3		93,73	5,30		
4		98,42	5,57		
5		112,67	6,38		
6	14	132,67	7,51	7,63	1,05
7		133,65	7,56		
8		140,14	7,93		
9		107,79	6,10		
10		159,75	9,04		
11	28	117,06	6,62	9,75	1,92
12		181,03	10,24		
13		166,39	9,42		
14		204,01	11,54		
15		192,84	10,91		

Tabla A.4.3.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	28	10,69	1,27	1,48	0,18
17		11,32	1,36		
18		12,23	1,43		
19		14,08	1,68		
20		13,91	1,64		

Tabla A.4.3.7. Resultados de permeabilidad de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
21	28	0,84	0,82
		0,84	
		0,79	

Tabla A.4.3.8. Resultados de porosidad de muestra PC-Z-20 reemplazando cemento por zeolita.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
22	28	20,70	19,62	1,10
23		19,67		
24		18,49		

ANEXO 4.4: Propiedades de muestras en Serie 2 con pomacita

Tabla A.4.4.1. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	192,06	10,87	10,77	1,51
2		152,14	8,61		
3		182,35	10,32		
4		225,87	12,78		
5		199,03	11,26		
6	14	240,17	13,59	11,17	1,67
7		166,00	9,39		
8		207,48	11,74		
9		174,10	9,85		
10		198,94	11,26		
11	28	322,53	18,25	16,69	1,34
12		290,67	16,45		
13		294,28	16,65		
14		259,05	14,66		
15		308,09	17,43		

Tabla A.4.4.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	28	24,41	2,89	2,66	0,17
17		20,33	2,46		

18		21,18	2,51		
19		22,48	2,68		
20		22,52	2,74		

Tabla A.4.4.3. Resultados de permeabilidad de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
21	28	0,52	0,51
		0,51	
		0,50	

Tabla A.4.4.4. Resultados de porosidad de muestra PC-P-10 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
22	28	15,83	14,79	1,29
23		15,19		
24		13,35		

Tabla A.4.4.5. Resultados resistencia a compresión de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	133,11	7,53	8,11	0,42

2		143,99	8,15		
3		153,36	8,68		
4		145,41	8,23		
5		140,58	7,96		
6	14	185,71	10,51	10,14	2,59
7		114,28	6,47		
8		155,22	8,78		
9		211,96	11,99		
10		228,90	12,95		
11	28	221,09	12,51	13,87	1,20
12		233,63	13,22		
13		271,49	15,36		
14		236,51	13,38		
15		263,15	14,89		

Tabla A.4.4.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	28	16,67	1,99	2,24	0,17
17		20,65	2,46		
18		18,55	2,24		
19		18,79	2,26		
20		18,20	2,24		

Tabla A.4.4.7. Resultados de permeabilidad de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
21	28	0,61	0,62
		0,62	
		0,63	

Tabla A.4.4.8. Resultados de porosidad de muestra PC-P-20 reemplazando cemento por pomacita.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
22	28	16,79	16,74	0,94
23		17,66		
24		15,78		

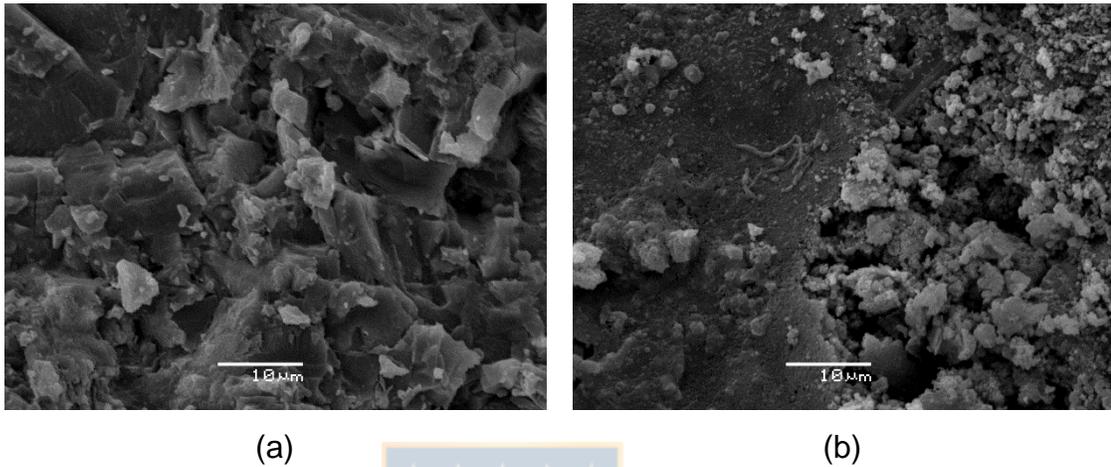
ANEXO 4.5: Imágenes complementarias SEM

Figura A.4.5.1. Imágenes SEM complementarias de microestructura de la muestra de referencia: (a) Vista de cristales hexagonales de C-H en matriz de cemento; (b) Gel C-S-H en matriz de cemento.

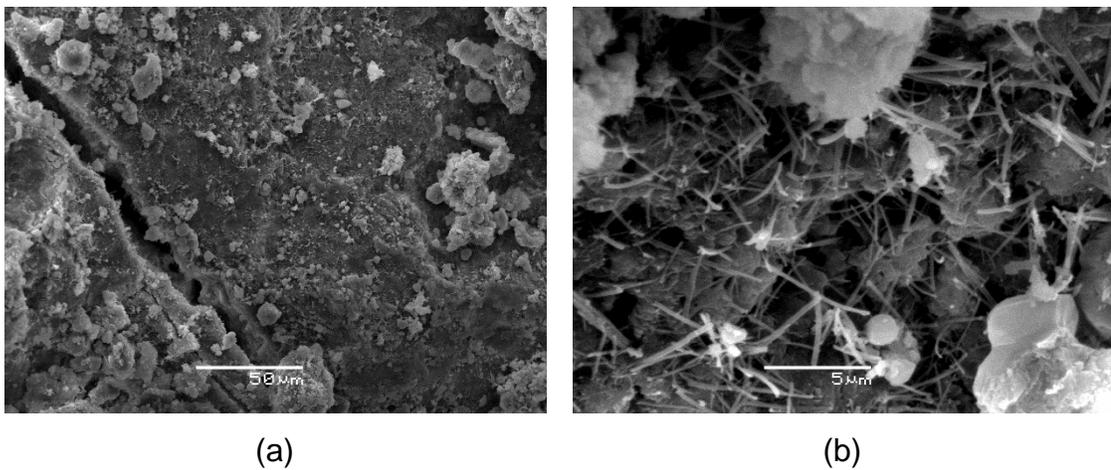


Figura A.4.5.2. Imágenes SEM complementarias de microestructura de las muestras con un 20 % de zeolita reemplazando el cemento: (a) Vista de la

matriz de cemento y superficies de C-H; (b) Aumento a matriz de cemento, vista de cristales de etringita.

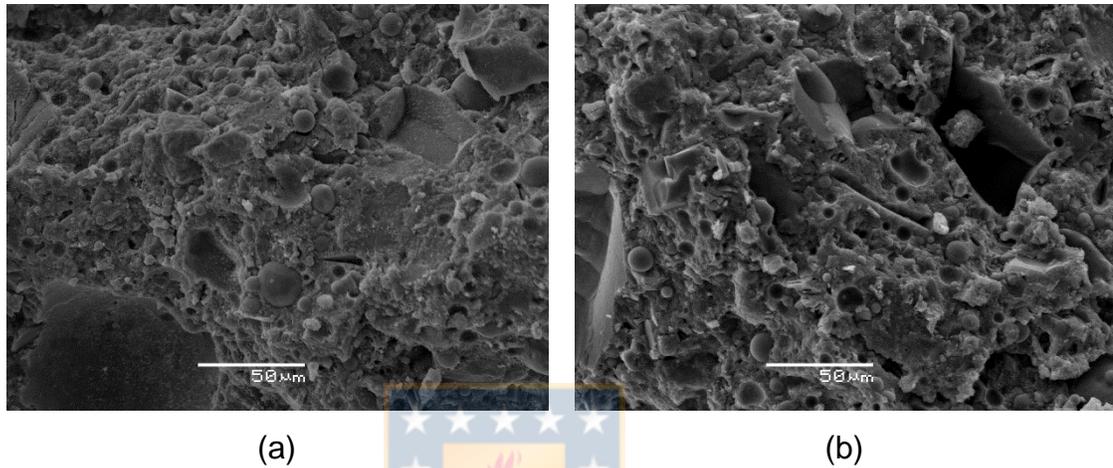


Figura A.4.5.3. Imágenes SEM complementarias de microestructura de las muestras con un 20 % de pomacita reemplazando el cemento: (a) Vista de la matriz de cemento y cristales de C-H; (b) Cristales y superficies de C-H en matriz de cemento.

ANEXO 4.6: Propiedades de muestras en Serie 3 con aditivo

Tabla A.4.6.1. Resultados resistencia a compresión de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.

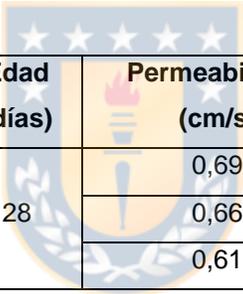
N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	264,96	14,99	15,77	1,41
2		253,73	14,36		
3		268,18	15,18		
4		316,73	17,92		
5		289,45	16,38		
6	14	298,48	16,89	17,11	1,35
7		337,12	19,08		
8		276,37	15,64		
9		286,13	16,19		
10		313,26	17,73		
11	28	371,91	21,05	19,28	1,66
12		346,49	19,61		
13		338,00	19,13		
14		353,86	20,02		
15		293,35	16,60		

Tabla A.4.6.2. Resultados resistencia a flexotracción de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	7	18,67	2,23	2,19	0,25
17		18,78	2,24		

18		21,04	2,51		
19		14,18	1,82		
20		18,08	2,17		
21	28	26,12	3,16	3,30	0,11
22		26,63	3,20		
23		28,15	3,36		
24		28,51	3,40		
25		28,36	3,36		

Tabla A.4.6.3. Resultados de permeabilidad de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.



N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
26	28	0,69	0,65
		0,66	
		0,61	

Tabla A.4.6.4. Resultados de porosidad de muestra patrón con aditivo PC-0,35-20-PL.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
27	28	14,43	13,88	0,81
28		14,26		
29		12,95		

Tabla A.4.6.5. Resultados resistencia a compresión de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (Mpa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	7	188,74	10,68	11,31	0,73
2		211,23	11,95		
3		189,47	10,72		
4		194,11	10,98		
5		216,21	12,23		
6	14	310,43	17,57	18,81	1,33
7		333,27	18,86		
8		371,13	21,00		
9		329,02	18,62		
10		318,04	18,00		
11	28	368,89	20,87	23,23	2,27
12		403,34	22,82		
13		468,53	26,51		
14		431,25	24,40		
15		381,14	21,57		

Tabla A.4.6.6. Resultados resistencia a flexotracción de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.

N° Probeta	Edad (días)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
16	7	28,17	3,45	3,10	0,25
17		24,13	2,88		
18		23,61	2,89		
19		27,04	3,29		
20		25,08	3,01		
21	28	32,40	3,86	3,80	0,24
22		32,22	3,87		
23		28,63	3,53		

24		29,33	3,61		
25		33,97	4,13		

Tabla A.4.6.7. Resultados de permeabilidad de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.

N° Probeta	Edad (días)	Permeabilidad (cm/s)	Promedio (cm/s)
26	28	0,36	0,35
		0,36	
		0,35	

Tabla A.4.6.8. Resultados de porosidad de muestra combinada PC-P-10-PL con 10 % pomacita y aditivo.

N° Probeta	Edad (días)	Porosidad (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
27	28	8,89	8,13	0,80
28		8,22		
29		7,29		