



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

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DE LA LOSA DE  
HORMIGÓN Y CANTIDAD DE FINOS EN LA BASE GRANULAR SOBRE LA  
RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN Y LA PERMEABILIDAD DE UN  
HORMIGÓN POROSO PARA SU USO EN PAVIMENTOS PERMEABLES DE  
ESTACIONAMIENTOS.**

POR

**Javiera Francisca Villar Morales**

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

Profesor Guía  
Oscar Link Lazo

Mayo 2024  
Concepción, Chile

© 2024 Javiera Villar Morales

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

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo está dedicado a mi familia. Especialmente a mis padres, Gloria y Carlos, por su amor y apoyo incondicional. A mi persona especial que ha estado a lo largo de todo este trabajo, por creer en mí y tener palabras de aliento constantes. A mi amiga Nico por su ayuda, paciencia y por las largas conversaciones en la oficina.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Proyecto ANID “Sustainable and eco-efficient Pervious Concrete Pavements for Bikeways, Sidewalks and Parking Lots for mitigating rainwater runoff and heat islands in urban areas”.

Agradezco al profesor guía de esta investigación, Oscar Link, por su apoyo, dedicación y disposición siempre a lo largo de esta investigación. También, al profesor Mauricio Pradena, por guiarme en la investigación.

Agradezco al Laboratorio de hormigones del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, a sus funcionarios por su disposición y apoyo.

Agradezco al Laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, a René Iribarren por su disposición, ayuda y gestión.

## RESUMEN

El constante crecimiento de las ciudades ha llevado a un aumento en las superficies impermeables, provocando problemas de escorrentía superficial y riesgos de inundaciones durante las lluvias. Los pavimentos permeables contribuyen a abordar parte de esta problemática al permitir que el agua se infiltre por su estructura. El desafío de la implementación de estos pavimentos permeables es lograr resistencia y permeabilidad adecuada dependiendo de su aplicación, para esto es importante determinar el nivel de compactación y conocer la interacción hormigón permeable y base granular, aspecto que ha sido poco estudiada en la literatura especializada.

Esta investigación ha demostrado que la compactación de la losa de hormigón y la cantidad de finos en la base granular influyen parcialmente en la resistencia a la flexotracción y la permeabilidad del hormigón poroso para pavimentos permeables. La compactación 0,13 MPa. afecta positivamente la resistencia en un 5,45%, pero reduce la permeabilidad en un 50% en comparación con una compactación menor.

Para la base granular, se ha concluido que no tiene un impacto significativo sobre la permeabilidad del pavimento, siempre y cuando la losa posea una permeabilidad adecuada a nivel internacional. Además, se ha demostrado que una base comercial con un rango de fino inferior a un 7,6% no afecta a la permeabilidad.

Este estudio contribuye al conocimiento al permitir una mayor utilización del hormigón permeable, al optimizar su compactación y permitir el uso bases comerciales sin necesidad de bases especiales.

## **ABSTRACT**

The constant growth of cities has led to an increase in impervious surfaces, causing problems of surface runoff and risks of flooding during rains. Permeable pavements help address part of this problem by allowing water to infiltrate through their structure. The challenge of implementing these permeable pavements is to achieve adequate resistance and permeability depending on their application. For this, it is important to determine the level of compaction and know the interaction of permeable concrete and granular base, an aspect that has been little studied in the specialized literature.

This research has shown that the compaction of the concrete slab and the amount of fines in the granular base partially influence the flexural strength and permeability of porous concrete for permeable pavements. Compaction positively affects strength by 5.45%, but reduces permeability by 50% compared to minor compaction.

For the granular base, it has been concluded that it does not have a significant impact on the permeability of the pavement, as long as the slab has adequate permeability. Furthermore, it has been shown that a commercial base with a fineness range of less than 7.6% does not affect permeability.

This study contributes to knowledge by allowing greater use of permeable concrete, by optimizing its compaction and allowing the use of commercial bases without the need for special bases.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación.....	1
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Metodología de trabajo.....	3
1.5 Principales resultados y conclusiones .....	4
1.6 Organización de la tesis.....	5
<b>CAPÍTULO 2 RESISTENCIA Y PERMEABILIDAD DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PERMEABLE.....</b>	<b>7</b>
2.1 Introducción.....	7
2.2 Hormigón poroso.....	7
2.2.1 Antecedentes.....	7
2.2.2 Resistencia y permeabilidad .....	8
2.3 Diseño de pavimentos de hormigón permeable .....	11
2.3.1 Losa de hormigón poroso .....	12
2.3.2 Base granular .....	14
2.3.3 Constructabilidad.....	15
2.4 Conclusión.....	17
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....</b>	<b>18</b>
3.1 Introducción.....	18
3.2 Materiales .....	18
3.2.1 Agua.....	18

---

3.2.2	Cemento .....	18
3.2.3	Árido fino.....	19
3.2.4	Árido grueso .....	19
3.2.5	Base granular .....	20
3.2.6	Probetas.....	21
3.2.7	Sección de pavimento .....	21
3.3	Experimentación.....	22
3.3.1	Dosificación .....	22
3.3.2	Confección y compactación de loseta.....	22
3.3.3	Confección y compactación de sección de prueba .....	24
3.3.4	Etapas experimentales.....	26
3.4	Ensayos.....	28
3.4.1	Resistencia a flexotracción .....	28
3.4.2	Permeabilidad .....	29
3.4.3	Infiltración .....	30
3.4.4	Simulador de lluvia.....	32
3.4.5	Large scale .....	36
3.4.6	Porosidad .....	38
3.5	Conclusión.....	39
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....</b>		<b>40</b>
4.1	Introducción.....	40
4.2	Loseta de hormigón poroso .....	40
4.2.1	Resistencia a flexotracción .....	40
4.2.2	Permeabilidad .....	41

---

4.2.3 Infiltración .....	42
4.3 Loseta hormigón poroso y base granular.....	43
4.3.1 Permeabilidad .....	43
4.3.2 Infiltración .....	45
4.3.3 Simulador de lluvia.....	46
4.4 Sección de pavimento.....	48
4.4.1 Permeabilidad .....	48
4.4.2 Infiltración .....	49
4.4.3 Large Scale .....	50
4.5 Conclusión.....	54
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO 2.1 : Dosificación Utilizada.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO 3.1 Plano Estacionamiento .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO 4.1: Resultados resistencia a flexotracción .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO 4.2 Resultados Permeabilidad (NCAT).....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO 4.3: Resultados Infiltración (ASTM C1701).....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO 4.4: Resultados Método Large Scale .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO 4.5 Calibración simulador de lluvia .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO 4.6 Resultados porosidad en estacionamiento .....</b>	<b>77</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 Relación de número de pasadas de rodillo con área determinada por Kevern (2009a).....	10
Tabla 2.2 Bases granulares para pavimentos permeables en la literatura .....	15
Tabla 3.1 Propiedades físicas del árido fino .....	19
Tabla 3.2 Propiedades físicas del árido grueso .....	19
Tabla 3.3 Características iniciales simulador de lluvia.....	32
Tabla 3.4 Combinaciones en análisis de simulador de lluvia .....	36
Tabla 4.1 Resultados simulador con compactación 0,06 MPa y base con 5,1% de fino .46	
Tabla 4.2 Resultados simulador con compactación 0,06 MPa y base con 7,6% de fino .46	
Tabla 4.3 Resultados simulador con compactación 0,13 MPa y base con 5,1% de fino .47	
Tabla 4.4 Resultados simulador con compactación 0,13 MPa y base con 7,6% de fino .47	
Tabla A.2.1.1 Dosificación utilizada en investigación .....	66
Tabla A.4.1.1 Resultados de resistencia a flexotracción en losetas con compactación de 0,06 MPa.....	68
Tabla A.4.1.2 Resultados de resistencia a flexotracción en losetas con compactación de 0,13 MPa.....	68
Tabla A.4.2.1 Resultados permeabilidad en losetas.....	69
Tabla A.4.2.2 Resultados permeabilidad en estructura de pavimento .....	69
Tabla A.4.2.3 Resultados permeabilidad en estacionamiento.....	70
Tabla A.4.3.1 Resultados infiltración en losetas.....	71
Tabla A.4.3.2 Resultados infiltración en losetas con %fino en base .....	71
Tabla A.4.3.3 Resultados infiltración en estacionamientos .....	72
Tabla A.4.4.1 Resultados mediciones manuales en dos puntos.....	73

---

Tabla A.4.4.2 Resultados mediciones con cámara en dos puntos.....	73
Tabla A.4.4.3 Resultados mediciones con marcador de nivel en dos puntos .....	74
Tabla A.4.5.1 Calibración 1 simulador de lluvia .....	75
Tabla A.4.5.2 Calibración 2 simulador de lluvia .....	75
Tabla A.4.5.3 Calibración 3 simulador de lluvia .....	76
Tabla A.4.6.1 Resultados porosidad en estacionamiento.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Relación porosidad y resistencia a la flexión .....	9
Figura 2.2	Sección de una estructura de pavimento de hormigón poroso .....	11
Figura 2.3	Variación de esfuerzo máximo dependiendo de variación de espesor en losa corta.....	13
Figura 3.1	Distribución granulométrica de bases utilizadas.....	20
Figura 3.2	a) Loseta b) Viguetas obtenidas de loseta .....	21
Figura 3.3	Preparación y confección de losetas: (a) Betonera (b) Loseta y Contrahuella (c) Retiro de contrahuella (d) Compactación con rodillo.....	23
Figura 3.4	Plano sección de prueba .....	24
Figura 3.5	Construcción sección de prueba: (a) Preparación colocación encofrado (b) Acomodo de la mezcla (c) Compactación (d) Estacionamiento .....	26
Figura 3.6	Descripción plan de trabajo en losetas .....	27
Figura 3.7	Descripción plan de trabajo en losetas y base granular.....	27
Figura 3.8	Descripción plan de trabajo en sección de prueba .....	28
Figura 3.9	Ensayo Flexotracción .....	29
Figura 3.10	Medición permeabilidad (NCAT): Permeabilidad loseta (b) Permeabilidad sección de pavimento .....	(a) 30
Figura 3.11	Medición infiltración (ASTM C1701): (a) Infiltración loseta (b) Infiltración en pavimento.....	31
Figura 3.12	Simulador de lluvia: (a) conectado a bomba peristáltica (b) recolección de agua.....	33
Figura 3.13	Calibración de bomba .....	34
Figura 3.14	Calibración simulador de lluvia .....	35
Figura 3.15	Método large scale .....	37

Figura 3.16 (a) Marcador de nivel (b) Regla y cámara .....37

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

Las ciudades crecen constantemente y con esto las superficies impermeables, aumentando la escorrentía superficial y el riesgo de inundaciones cada vez que llueve. Los pavimentos permeables contribuyen a disminuir este problema, ya que, debido a sus poros interconectados, el agua pasa por su estructura a la siguiente capa del pavimento. Los vacíos dentro del hormigón permeable permiten que las aguas pluviales se filtren hasta la base, reduciendo así las cantidades de escorrentía (Haselbach & Freeman, 2006). La Figura 1.1 muestra una fotografía del hormigón poroso. Se observa que el agua permea a través de la loseta de hormigón poroso.



**Figura 1.1 Hormigón Poroso**

Fuente: Hormigón al día

En el hormigón permeable se debe cumplir con los requisitos de resistencia y de permeabilidad, dependiendo de su utilización. Una dificultad práctica en la fabricación es que la mejora de una de ellas provoca la disminución de la otra (Nguyen et al., 2014). Uno de los aspectos críticos que condiciona la obtención de ambos factores, es la compactación

en terreno de la mezcla. Debido a esto, la obtención de un hormigón permeable adecuado no busca maximizar ninguna magnitud en particular, sino alcanzar un necesario en ambos casos dependiendo de su utilización (Carrasco et al., 2021).

Una vez alcanzados los valores de permeabilidad y resistencia en la mezcla de hormigón, surge la pregunta, cómo afecta la base granular a la estructura de pavimento y al desempeño del hormigón poroso, ya que esta funcionará como soporte y como una estructura temporal de almacenamiento de agua (Balbo, 2020).

Actualmente, la literatura especializada no entrega información suficiente sobre la interacción entre la losa de hormigón permeable y base granular, como una sola estructura. Esta escases de datos impide conocer las interacciones losa-base.

Una forma de distribuir mejor las cargas en un pavimento es a través de la tecnología de losa corta, por lo que es beneficioso aplicarla en hormigón poroso, el que requiere según el manual IOWA Storm Water Management Chapter 8 Permeable Pavement Systems (IOWA Department of Natural Resources, 2019a) un porcentaje de fino controlado menor a 1,5 %. En el caso del hormigón tradicional, para losa corta, se necesitan bases granulares con porcentaje de fino entre 0 y 8 %. Esta variabilidad enfatiza la complejidad en las características y la necesidad de analizar estas especificaciones.

## **1.2 Hipótesis**

La compactación de la losa de hormigón y la cantidad de finos de la base granular afectan la resistencia a la flexotracción y la permeabilidad de un hormigón poroso para su uso en pavimentos permeables de estacionamientos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar el efecto de la compactación de la losa de hormigón y cantidad de finos en la base granular sobre la resistencia a la flexotracción y la permeabilidad de un hormigón poroso para su uso en pavimentos permeables de estacionamientos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Evaluar y analizar el efecto de la compactación sobre la resistencia y permeabilidad de losetas de hormigón permeable
2. Evaluar y analizar el efecto del porcentaje de fino en la base granular, sobre la permeabilidad en una estructura de pavimento
3. Evaluar y analizar el efecto del porcentaje de fino en la base granular, sobre la permeabilidad de una sección de pavimento permeable correspondiente a un estacionamiento

## **1.4 Metodología de trabajo**

La investigación tiene 2 etapas, donde la primera y parte de la segunda se realizan en el laboratorio de hormigones y posteriormente en terreno. La primera etapa, corresponde a la construcción del diseño optimizado de loseta con dosificación estudiada previamente en la Memoria de Título “Análisis de desempeño estructural y constructabilidad de pavimentos de hormigón permeable para su uso en estacionamientos” (Villar, 2022) considerando una variación en la estrategia de compactación con rodillo pesado. Se

analiza el comportamiento mecánico a través de flexotracción a los 7 y 28 días y se realizan ensayos de permeabilidad con dos tipos de instrumentos (NCAT y ASTM C1701). Con los resultados de las pruebas, se analizan las mezclas con ambas compactaciones para verificar cual es la óptima en comportamiento mecánico e hidráulico.

En una segunda etapa se analizó la permeabilidad de la estructura de pavimento con una variación en el porcentaje de fino en la base granular. Los métodos utilizados para medir la permeabilidad son NCAT, ASTM C1701 y un simulador de lluvia con variación en la intensidad.

Finalmente, en la sección de prueba correspondiente a un estacionamiento, se evaluó la permeabilidad e infiltración a través de los métodos antes mencionados, estableciendo una relación con los resultados de laboratorio y el método large scale.

### **1.5 Principales resultados y conclusiones**

La compactación de la losa de hormigón y la cantidad de finos de la base granular afectan parcialmente la resistencia a la flexotracción y la permeabilidad de un hormigón poroso para su uso en pavimentos permeables de estacionamientos. Lo anterior debido a que la compactación de la losa de hormigón al variar desde un 0,6 a 0,13 MPa. afecta en un aumento del 5,45% de resistencia a la flexotracción, pero influye en una disminución de la permeabilidad en un 50% comparada la compactación menor. A su vez, la base granular comercial utilizada, al variar el porcentaje de fino desde un 5,1 % y un 7,6 % no se concluye que afecten a la permeabilidad de este tipo de pavimento, ya que los resultados fueron variables. Estos resultados son importantes y en la literatura especializada son inexplorados.

Con los estudios realizados a la base granular indican que la cantidad de fino (en el rango del 5,1% al 7,6%) no influye en la permeabilidad de la estructura de pavimento cuando la losa tiene una permeabilidad adecuada. Considerando que, dentro de los resultados obtenidos en el simulador con lluvias de la Ciudad de Concepción, no se generaron escorrentías a pesar de que estas fueron aumentadas en el triple. Esto sugiere que se puedan ocupar bases comerciales, limitando la cantidad de fino en un máximo del 7,6%.

Se puede concluir con esta investigación que, a mayor compactación, la resistencia tiene un impacto relativamente menor, pero afecta a la permeabilidad del hormigón poroso. Además, se ha evidenciado que cuando se cumple con los estándares de permeabilidad establecidos en la literatura, la base granular estudiada no influye en la permeabilidad del pavimento. Esto nos permite contribuir al conocimiento para masificar el hormigón permeable a mayores utilidades con bases comerciales sin necesidad de requerir una especial. Además, hay que considerar que se realizaron estudios correspondientes a la aplicación en estacionamientos siendo posible extender a aplicaciones como ciclovías, en las cuales se necesitan menores resistencias.

## **1.6 Organización de la tesis**

Este documento contiene cinco capítulos. El segundo capítulo contiene principalmente la revisión bibliográfica, donde se presenta el estado del arte sobre hormigón permeable y lo relacionado a antecedentes, diseño de este tipo de pavimentos, resistencia y porosidad, constructabilidad y base granular adecuada para este tipo de pavimentos. En el tercer capítulo se desarrolla la metodología de trabajo se exponen los materiales, y ensayos realizados. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos en esta investigación, principalmente la resistencia de mezcla, los ensayos de permeabilidad e infiltración realizados en laboratorio y en sección de prueba, además del análisis de cada resultado

obtenido. Finalmente, el quinto capítulo presenta las conclusiones importantes de la investigación.

## **CAPÍTULO 2 RESISTENCIA Y PERMEABILIDAD DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PERMEABLE**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se expone sobre hormigón poroso, incluyendo sus características, aplicaciones, las resistencias alcanzadas en la literatura y la disminución de esta asociada al aumento de porosidad, siendo esta característica necesaria para que el agua pase por este hormigón.

Uno de los factores que influye estas propiedades es la compactación, la cual debe ser aplicada con una presión adecuada que permita cumplir con los requisitos dependiendo de su aplicación.

Además, el diseñar estructuralmente la losa de hormigón poroso permite determinar los requisitos dependiendo las aplicaciones, así como la base granular ya que, al no existir información suficiente, no se sabe cómo esta afecta a la permeabilidad de este tipo de pavimentos. Finalmente, la constructabilidad al ser un hormigón distinto al convencional es importante estudiarla.

### **2.2 Hormigón poroso**

#### **2.2.1 Antecedentes**

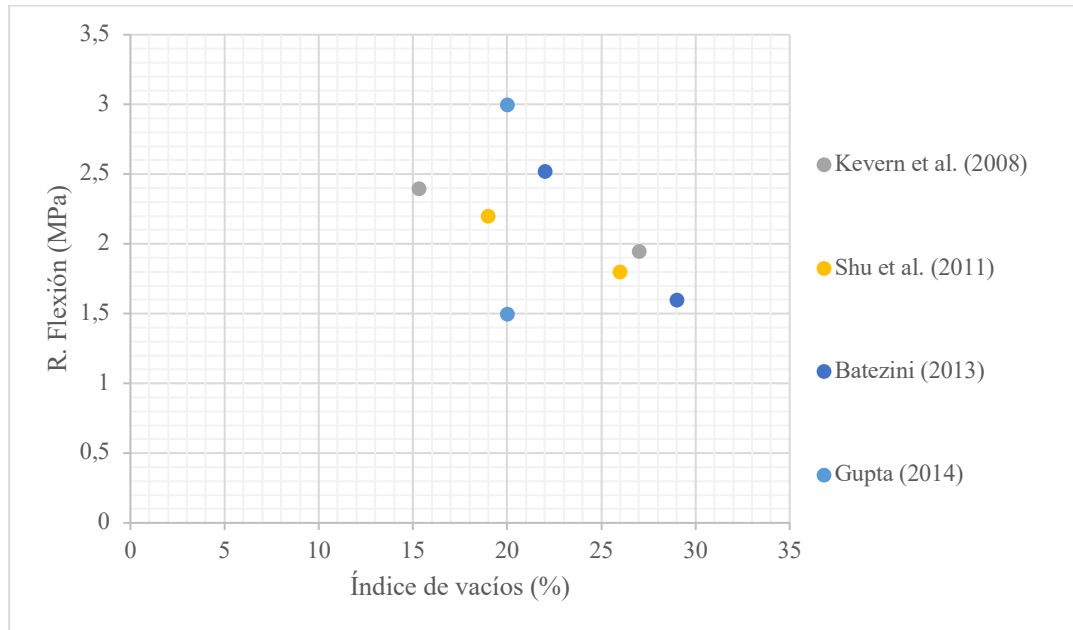
Los pavimentos de hormigón permeable tienen como objetivo capturar el agua lluvia y permitir que este se filtre al suelo, siendo su característica principal, su baja densidad y con esto una alta porosidad que oscila entre el 15% y el 35% (ACI Committee 522. & American Concrete Institute., 2010a; Obla, 2010; Schaefer, 2006). Sus poros

interconectados permiten que el agua atraviese su estructura (Tennis et al., 2004; Wanielista et al., 2007) y con esto dentro de sus beneficios está que disminuya la escorrentía evitando inundaciones y recargando las aguas subterráneas.

El uso del hormigón permeable ha estado enfocado en la construcción de caminos secundarios, estacionamientos, accesos, caminos y aceras, el cual está en aumento ya que ha sido reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU como la mejor solución para las aguas pluviales y un elemento de gran aporte para el desarrollo sostenible (ACI Committee 522. & American Concrete Institute., 2010a; Tennis et al., 2004)

### **2.2.2 Resistencia y permeabilidad**

El American Concrete Institute (ACI Committee 522. & American Concrete Institute., 2010b) define pavimento permeable como, “un pavimento compuesto de material con suficientes vacíos continuos para permitir que el agua pase de la superficie a las capas adyacentes”. Para obtener este tipo de hormigón se necesita cemento, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua, obteniendo así un material endurecido con poros conectados que permitan que el agua pase por su estructura. Esta porosidad varía dependiendo de la mezcla, sus componentes y la forma de construcción afectando a las resistencias de compresión y flexión la cual disminuye en comparación con el hormigón convencional. Los estudios existentes permiten conocer la relación entre la porosidad y las resistencias de compresión y flexotracción.



**Figura 2.1 Relación porosidad y resistencia a la flexión**

Fuente: Villar (2022)

Con la figura 2.3 se puede establecer una relación donde a mayor relación de porosidad, disminuye la resistencia (Batezini, 2013; Gupta, 2014; Kevern et al., 2006; Shu et al., 2011).

### 2.2.3 Compactación

Debido a la variación en el procedimiento y las técnicas empleadas principalmente el método de compactación es importante analizar este aspecto con el fin de lograr porosidad y resistencias deseadas (Ansari & Mahajan, 2020).

A través de la experiencia internacional se establece que es necesaria la compactación del material. Para este proceso se utiliza un rodillo de acero de ancho mayor a la losa a hormigonar (Jahan et al., 2004; Reyes & Torres, 2002) con el fin de alcanzar las presiones requeridas, que permitan obtener la permeabilidad necesaria y las resistencias objetivos.

Estas presiones de acuerdo con las investigaciones sufren variaciones entre 0,06 MPa. y 0,08 MPa. (Balbo, 2020; Castro et al., 2009; Kevern et al., 2009; Servicio de Vivienda y Urbanización, 2006) las cuales se detallan en lo estudiado por Ferrada (2023).

(Kevern et al., 2009) estudió la compactación giratoria, con el fin de caracterizar la trabajabilidad en la mezcla de hormigón permeable. Uno de los métodos de este tipo de compactación es el de tira ascendente, donde el hormigón se coloca aproximadamente hasta una altura adicional llamada contrahuella. Posteriormente, se usa un rodillo pesado para compactar la mezcla hasta la altura final y la presión de compactación alcanzada dependerá del área de contacto del rodillo con la mezcla del hormigón. A mayor número de pasadas del rodillo el área disminuye, aumentando con esto la presión de compactación alcanzada.

**Tabla 2.1 Relación de número de pasadas de rodillo con área determinada por Kevern (2009a)**

Número de pasadas de rodillo	Área de contacto de rodillo con la muestra
1	$\frac{\pi D}{8} L$
2	$\frac{\pi D}{16} L$
3	$\frac{\pi D}{32} L$

En tabla 2.1 se establece que el área de contacto del rodillo con la mezcla, varía con el número de pasadas y estas dependen del valor D, que es el diámetro del rodillo y del valor L, que es el largo.

La compactación en este tipo de hormigón debe ser particular y distinta a un hormigón convencional, por lo que el rodillo pesado afecta y permite producir mejores resistencias,

índices de porosidad, permeabilidad y peso unitario determinado, que permiten cumplir con los estándares asociados a hormigones permeables (Kevern *et al.*, 2009a).

### 2.3 Diseño de pavimentos de hormigón permeable

Una estructura de pavimento permeable consiste en una capa superior de hormigón poroso que se encuentra sobre una capa de agregado correspondiente a la base granular y bajo este una subrasante (Figura 2.1). Existen variaciones en cuanto al número, espesor y composición de cada capa, siendo importante diseñar esta estructura para asegurar el cumplimiento de objetivos (Kia *et al.*, 2017). Se debe considerar que los pavimentos de hormigón permeable deben funcionar como herramienta de gestión de aguas lluvias a través de su permeabilidad, además de servir como pavimento. Por lo tanto, es necesario el diseño de su mezcla para alcanzar el equilibrio entre resistencia y permeabilidad (Modi *et al.*, 2018; Obla, 2010b; Vancura *et al.*, 2011).

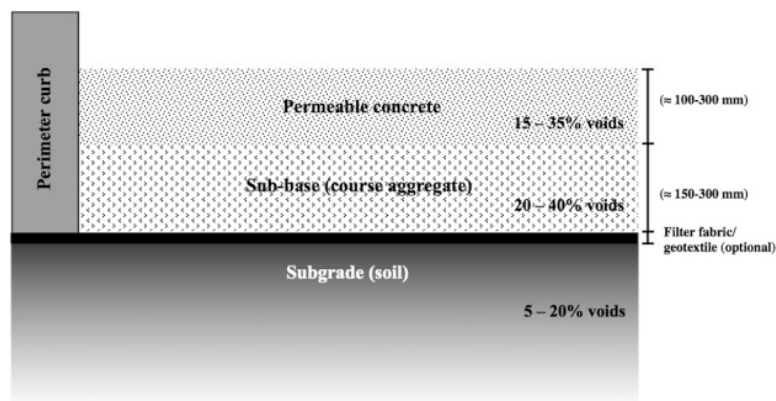
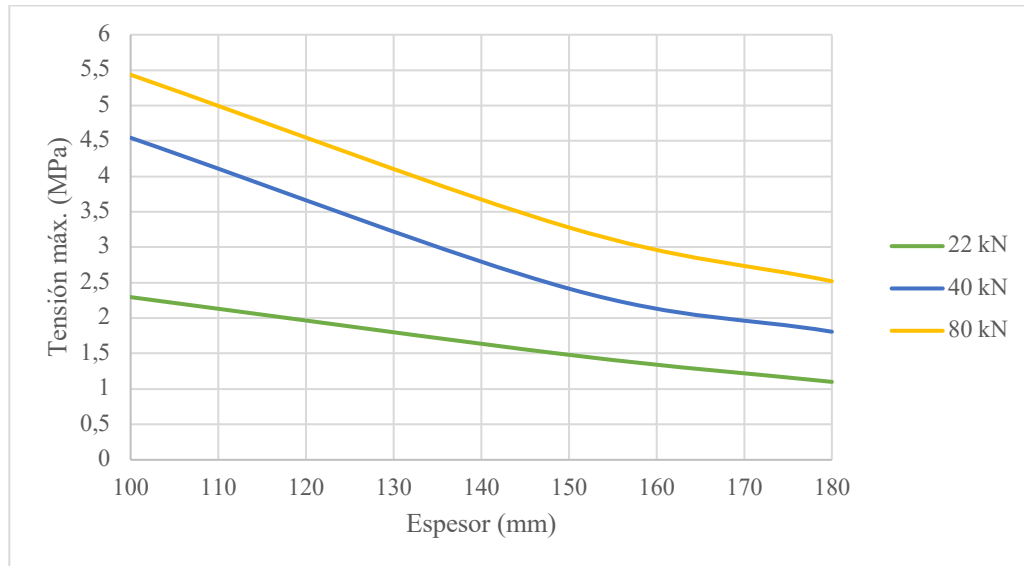


Figura 2.2 Sección de una estructura de pavimento de hormigón poroso  
Fuente: Kia *et al.* 2017

### 2.3.1 Losa de hormigón poroso

El diseño de pavimentos de hormigón poroso requiere análisis estructurales que permitan que el pavimento pueda funcionar de una forma óptima ante los requisitos a los cuales estará expuesto dependiendo de su aplicación y a las cargas a la cual será sometido, permitiendo con esto definir resistencias de la mezcla óptima para su uso. En pavimentos de hormigón convencional se modela clásicamente con la teoría de Weestergaard que consiste en una plaza de espesor medio que descansa sobre una base líquida densa de Winkler (Ioannides, 1991), de acuerdo a lo anterior se realizaron diseños de pavimentos permeables con simulaciones considerando la placa soportada por un modelo de base líquida densa en el Software EverFe, una herramienta de análisis de elementos finitos en 3D que permite simular la respuesta del pavimento sometido a cargas por eje (Batezini et al., 2021).

Debido a las menores resistencias presentadas en los hormigones permeable, se considera como una solución el diseñar los pavimentos la opción de losa corta, también conocidas como losas de geometría optimizada. El beneficio de esta tecnología es que al distribuir las cargas en múltiples losas, se reducen las tensiones de tracción en el hormigón, además del alabeo, esto es beneficioso en la vida útil del pavimento (Pablo Covarrubias & Chile, 2012)



**Figura 2.3 Variación de esfuerzo máximo dependiendo de variación de espesor en losa corta**  
Fuente: Villar (2022)

En la investigación realizada por Villar (2022) se realizó un análisis estructural con el Software EverFe para pavimentos de hormigón permeable, específicamente un estacionamiento con la tecnología de losa corta obteniendo el esfuerzo máximo dependiendo de la variación del espesor de la losa y la carga a la cual será sometida la losa (Figura 2.2). Se debe considerar que el tamaño de losa fue diseñado con el fin que no más de una rueda del vehículo quede sobre esta, con el fin de reducir las tensiones.

Se observa en la figura 2.2 que para un espesor de 150 mm de losa, se tiene una tensión máxima de 1,5 MPa para el eje de 22 kN, aumentando en 37,5 % para el caso de eje de 40 kN y en 54,5 % para el eje de 80 kN.

### **2.3.2 Base granular**

Durante el diseño de pavimento se establece que es importante la selección de los materiales de las capas de pavimento para cumplir con las permeabilidades de un pavimento de hormigón poroso (Fwa et al., 2015).

Para hormigones convencionales de acuerdo con lo establecido en el Manual de Carretera V5 “Especificaciones Técnicas Generales de Construcción”, los materiales para bases granulares deberán ajustarse a los requisitos pertinentes de calidad y graduación, donde el porcentaje de fino puede variar entre 0 y 15 %. Además, para la base granular MC. V5 indica que, en la construcción de cuellos de empalme con caminos secundarios, accesos a predios y otros, que no consulten ningún tipo de revestimiento, se podrá emplear como capa de rodadura material base granular CBR mayor o igual al 80%.

La cantidad de finos en la base granular puede tener un impacto significativo en la permeabilidad del sistema. Cuando el contenido de finos en la base granular es alto, las partículas finas pueden llenar los espacios entre las partículas más grandes, lo que reduce la porosidad y la capacidad de drenaje. Esto significa que el agua no puede infiltrarse de manera efectiva, lo que disminuye la capacidad del pavimento para manejar la escorrentía y puede llevar a problemas de acumulación de agua.

**Tabla 2.2 Bases granulares para pavimentos permeables en la literatura**

<b>Referencia</b>	<b>Tipo de Base</b>	<b>Datos</b>
(Balbo, 2020)	Calzada	Agregado reciclado correspondiente a residuo de construcción. Presenta una granulometría de agregados entre 20-40mm. Sin presencia de fino
(Batezini, 2019)	Ciclovía	Agregado reciclado correspondiente a residuo de construcción. Presenta un porcentaje de fino menor a 1,5%
(Furtado et al., 2021)	Hormigón permeable instalación pequeña en campo	Grava nº1 (de 2 mm a 25,4mm. Porcentaje de fino de 0 %
(IOWA Department of Natural Resources, 2019b)	Recomendaciones de agregados para bases permeables	Manual entrega recomendación para bases en pavimentos permeables, correspondiente a porcentaje de fino menor a 1,5%

En la tabla 2.1 se observa los datos obtenidos en la literatura y como hablan del porcentaje de fino variable de 0 al 1,5 % para pavimentos permeables.

### **2.3.3 Constructabilidad**

La constructabilidad de acuerdo a lo establecido por Construction Industry Institute (CII), corresponde a la óptima utilización del conocimiento de la construcción, desde la planificación, diseño y procedimientos en el campo, con el fin de disminuir errores para alcanzar objetivos establecidos en el proyecto.

Los aspectos constructivos del hormigón permeable no se encuentran definidos actualmente en Chile de forma clara, sino más bien de forma general y esto en la Cartilla

de Especificaciones Técnicas Generales para Obras de Pavimentación en Hormigón Permeable (Servicio de Vivienda y Urbanización, 2006) siendo la única información establecida para la construcción. Internacionalmente en el ACI 522 (2010) se establecen principios de construcción para pavimentos de hormigón permeable con especificaciones más detalladas de los aspectos importantes a considerar.

La construcción de pavimentos de hormigón permeable es diferente a la construcción con hormigón convencional, debido a una serie de requisitos especiales tanto en su colocación, curado e inspección (Tennis et al., 2004). Esto hace que el proceso de construcción tenga puntos críticos a considerar que necesitan de procedimientos estandarizados para asegurar el éxito en la colocación y el cumplimiento de los objetivos de la aplicación.

Considerando que en la actualidad no existe un método específico que permita diseñar las mezclas para hormigón permeable, lo que genera resultados en investigaciones variables y no comparables (Chandrappa & Biligiri, 2016) es importante realizar una planificación óptima de las mezclas y método constructivo a utilizar, que permita reducir incertidumbres y alcanzar los objetivos definidos.

Para la mezcla de hormigón permeable también se deben controlar las proporciones de materiales especialmente el agua y el porcentaje de agregado fino, con el fin de obtener las características necesarias tanto en resistencia como permeabilidad. El transporte de la mezcla debe tener un cuidado especial debido a la poca cantidad de agua presente, con lo que se obtiene una consistencia rígida, lo cual reduce los tiempos de trabajo. Debido a esto, el emplazamiento debe ser adecuado priorizando una buena gestión que permita colocar la mezcla y realizar el control de esta a través de inspecciones visuales que verifiquen la consistencia.

Para prevenir fisuras en el pavimento, se deben realizar juntas de contracción y debido a que el hormigón permeable tiende a tener menor retracción que el convencional, la separación entre juntas es mayor que en pavimentos convencionales (Spalvier et al., 2021).

## **2.4 Conclusión**

Este capítulo permite conocer el hormigón poroso, sus características únicas y sus aplicaciones posibles. La porosidad es la característica principal, la cual permite el paso del agua través de este tipo de hormigón, esta característica influye en la permeabilidad la cual puede aumentar en un hasta en un 56 % su resistencia a menor porosidad.

La compactación en la literatura ha sido estudiada para hormigones porosos a través de la presión de compactación a aplicar, determinando que esta influye tanto en su resistencia como permeabilidad. Este punto es parte de la constructabilidad a estudiar, considerando además la importancia del diseño estructural del pavimento y la base granular a utilizar, teniendo este último tema un déficit en la literatura.

## **CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se expone la metodología que se ocupó a lo largo de la presente investigación. Se detallan los materiales, el proceso experimental, la dosificación y el proceso de preparación, confección, compactación y curado del hormigón poroso en las losetas y en la sección de prueba. Además, se describen los ensayos realizados tanto en resistencia a flexotracción como los distintos métodos utilizados para medir permeabilidad tanto en loseta como en la sección de prueba.

### **3.2 Materiales**

#### **3.2.1 Agua**

El agua utilizada para la mezcla de hormigón poroso en la confección de losetas y de sección de prueba, cumplió con la NCh 1498 (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2012) siendo proporcionada por la red pública de agua potable por la empresa Essbio.

#### **3.2.2 Cemento**

El cemento utilizado en esta investigación corresponde a cemento Bio Bio Especial, que cumplió con los requerimientos de la NCh 148 (INN, 1968) y se clasifica de acuerdo a su composición y resistencia como cemento clase Puzolánico, grado corriente.

### 3.2.3 Árido fino

La arena utilizada correspondió a arena Bio Bío, proporcionada por la empresa Áridos HH en Concepción. En tabla 3.1 se presentan las propiedades físicas.

**Tabla 3.1 Propiedades físicas del árido fino**

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

### 3.2.4 Árido grueso

Los áridos gruesos utilizados corresponden a gravilla 3/8", proporcionado por la empresa Áridos HH en Concepción, cuyo proveedor corresponde a la empresa Áridos Livio Maggi que obtiene los áridos de la ribera del río Ñuble. En tabla 3.2 se presentan las propiedades físicas de los áridos.

**Tabla 3.2 Propiedades físicas del árido grueso**

Propiedades físicas	Valor
Densidad real del árido saturado superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ )	2683
Densidad real árido seco ( $\text{kg/m}^3$ )	2643
Densidad neta ( $\text{kg/m}^3$ )	2752
Absorción de agua (%)	1.48

### 3.2.5 Base granular

La base granular comercial fue proporcionada por Áridos HH, la cual cumplió con lo establecido en el Manual de Carreteras V5 “Especificaciones y Técnicas Generales de Construcción” (MOP-DGOP Dirección de Vialidad, 2021b) alcanzando un poder de soporte de  $CBR \geq 80\%$ . Además, de cumplir con los requisitos pertinentes de calidad y graduación, según lo establecido en Manual de Carreteras V8 “Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control” (MOP-DGOP Dirección de Vialidad, 2021a)

Para la investigación fue necesario tamizar la base, con el fin de controlar el porcentaje de fino, alcanzando los valores de 5,1 % y 7,6 %. En la figura 3.1 se presenta la curva granulométrica de ambas bases utilizadas, siendo evidente la variación en el porcentaje de fino.

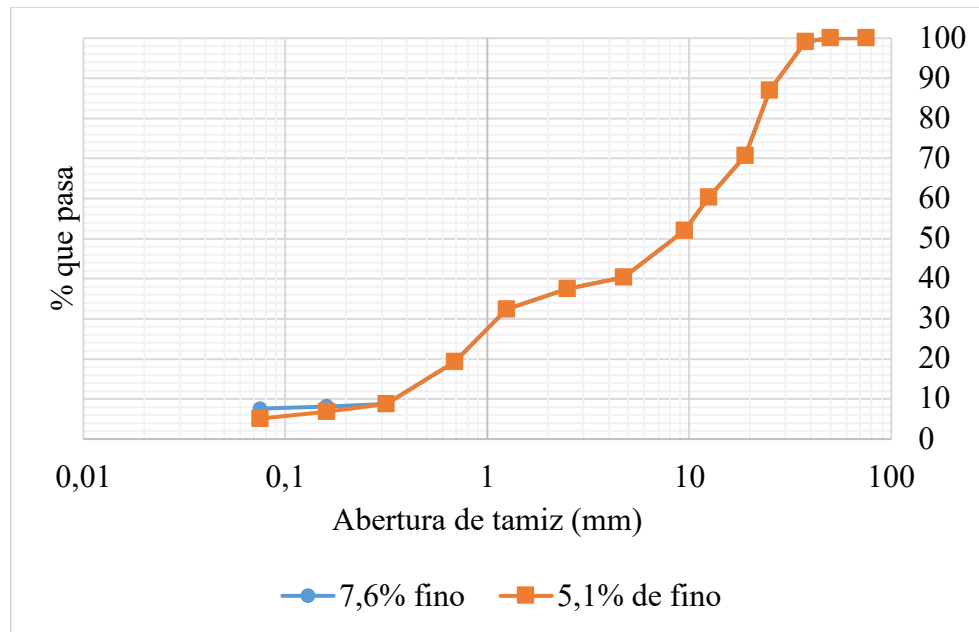


Figura 3.1 Distribución granulométrica de bases utilizadas.

### 3.2.6 Probetas

Las probetas utilizadas corresponden a losetas, las cuales tienen una dimensión de 15x30x56 cm. El criterio para dimensionar las losetas es lo que se recomienda para el tamaño de las probetas en ensayos a flexotracción, según lo establecido en NCh 1017 (INN, 2009a). Las probetas fueron utilizadas sin división para ensayos de permeabilidad y divididas en dos para la utilización de vigas en el ensayo a flexotracción (Figura 3.2 (a) (b)).

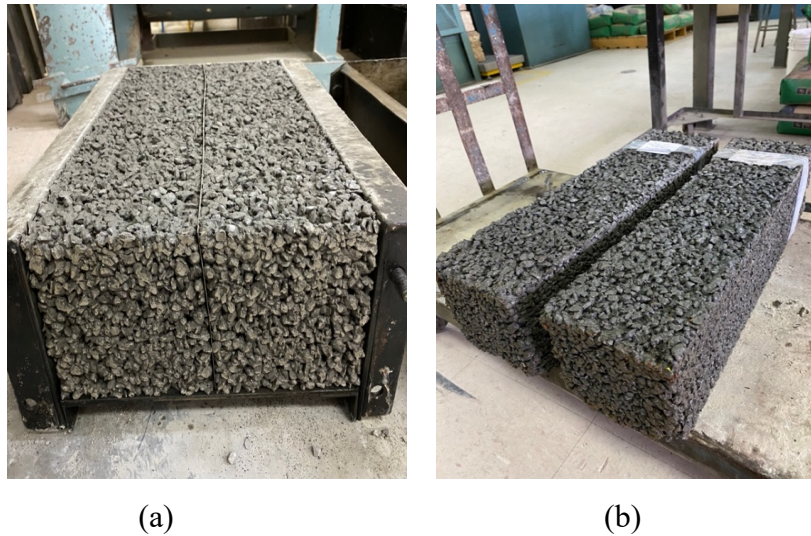


Figura 3.2 a) Loseta b) Viguetas obtenidas de loseta

### 3.2.7 Sección de pavimento

Se construyó una sección de prueba correspondiente a un estacionamiento con dimensión total de 2,50 x 5,00 m., la tecnología utilizada corresponde a losa corta, por lo que se tienen cuatro losas con dimensiones de 1,25 x 2,50 m. y un espesor de 15 cm. Las dosificaciones para cada losa fueron idénticas, aplicándose distinta presión de compactación en cada par, uno con 0,06 MPa. y otro con 0,13 MPa.

### 3.3 Experimentación

#### 3.3.1 Dosificación

La dosificación utilizada (Anexo 3.1) consideró un 39 % de relación agua cemento y un 15 % de agregado fino y corresponde a la establecida como óptima en la Memoria de Título “Análisis de desempeño estructural y constructabilidad de pavimentos de hormigón permeable para su uso en estacionamientos” (Villar, 2022).

#### 3.3.2 Confección y compactación de loseta

Para la confección, primero se establecieron las cantidades y se separó el material a utilizar, seguido del amasado, el cual fue realizado en betonera la que permite trabajar con volúmenes menores, estableciendo un mayor control de la mezcla.

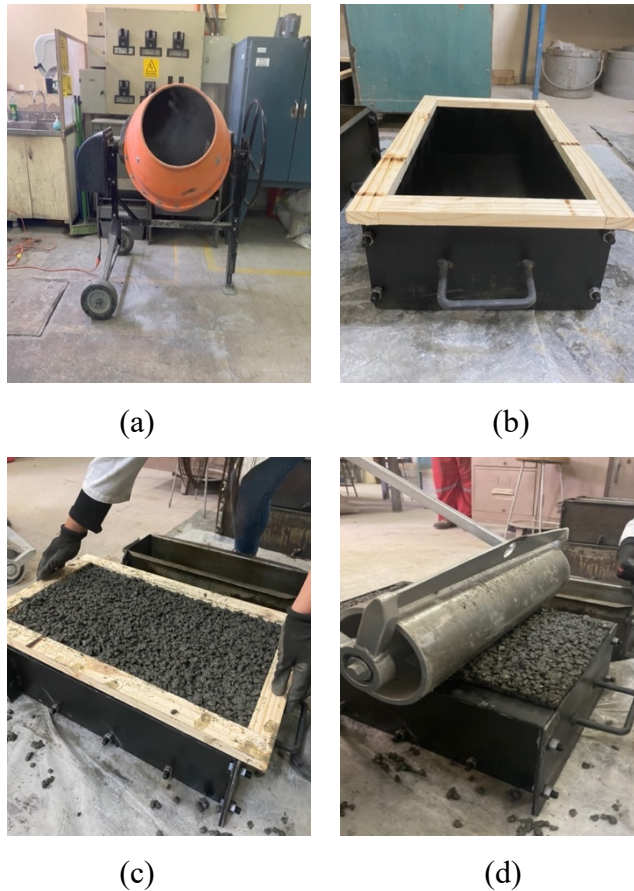
Los materiales fueron incorporados a la betonera (figura 3.3(a)) en el orden de agregados gruesos, agregados finos y cemento. Posteriormente, se mezclaron los materiales, para luego agregar el agua de forma progresiva. Las confecciones realizadas para esta investigación no contienen aditivos que optimicen la mezcla.

Finalizado el amasado, la mezcla fue llevada a los moldes de losetas rápidamente para no afectar la trabajabilidad de esta. Los moldes fueron previamente engrasados para facilitar desmolde posterior. Además, sobre su estructura se posicionó una contrahuella de madera de 19 mm de altura como se observa en la Figura 3.3(b), esto permitió generar una altura inicial de mezcla adicional para su posterior compactación (Kevern et al., 2006)

Luego de retirar la contrahuella, se realizó la compactación con rodillo manual, donde el peso del rodillo y el área de contacto de este con la mezcla alcanzó una presión de compactación de 0,065 MPa. definido por (Ferrada, 2023) y 0,13 MPa. El rodillo se

posicionó al borde del molde y se empujó con velocidad constante, con la precaución de ir retirando la mezcla que quedó en los bordes del molde, ya que esto influye en el área que toca el rodillo a la mezcla. Posterior a la compactación se emparejó la mezcla con platacho en los desniveles.

Finalmente, se taparon los moldes con la mezcla compactada, para su posterior desmolde 48 horas después de la confección, tomando como referencia el tiempo de desmolde en molde prismático, según lo establecido en la NCh 1017 (INN, 2009a). Las losetas, se mantuvieron hasta los ensayos correspondientes, en una cámara con una humedad de 90 % y temperatura entre 17°C y 23°C que presenta condiciones óptimas para el curado.



**Figura 3.3** Preparación y confección de losetas: (a) Betonera (b) Loseta y Contrahuella (c) Retiro de contrahuella (d) Compactación con rodillo

### 3.3.3 Confección y compactación de sección de prueba

Se construyó una sección de prueba correspondiente a un estacionamiento con tecnología de losa corta y un diseño estructural basado en (Villar, 2022). La losa corta permite una mejor distribución de las cargas y una resistencia mínima para la aplicación en estacionamientos de 0,9 MPa., facilitando así que este pavimento pueda tener mayores aplicaciones (Ferrada, 2023). Al usar esta tecnología fue necesario colocar barras de traspaso de carga longitudinales y transversales entre cada losa. El plano de la construcción se presenta en figura 3.4 y con mayores detalles en Anexo 4.2.

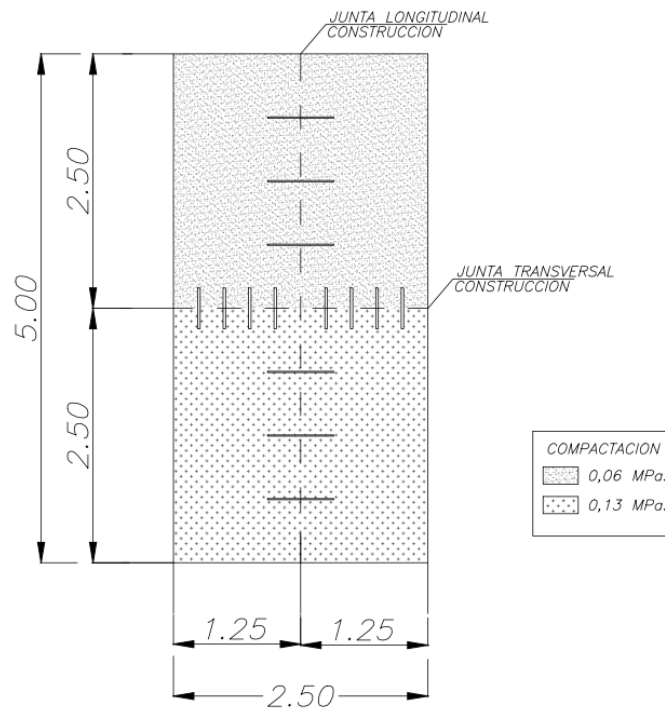


Figura 3.4 Plano sección de prueba

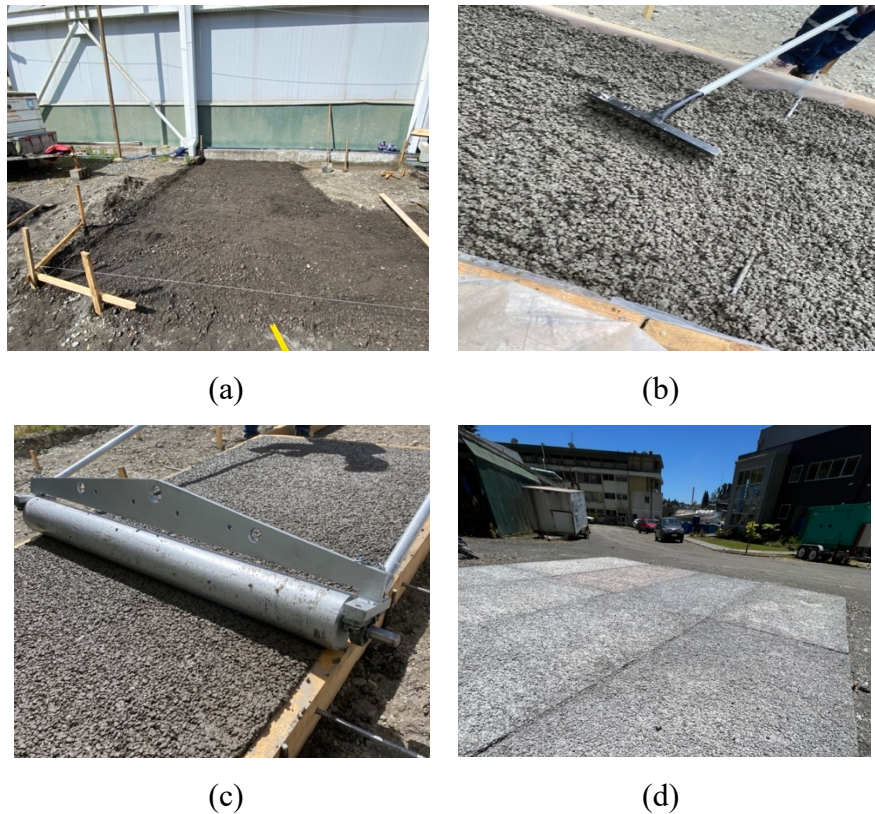
La sección de prueba fue construida siguiendo los procedimientos establecidos en laboratorio a través de las probetas. Se inició la construcción con un emparejamiento del

terreno para colocar sobre este el encofrado y la base granular con 5,1 % de fino y un espesor de 15 cm. (figura 3.5(a)), cabe destacar que esta capa solo se enrasó, teniendo la precaución de no compactar.

Posteriormente, gracias a dos betoneras trabajando simultáneamente, se fue depositando el hormigón poroso sobre la base granular, con la precaución de realizar esta etapa de forma continua y rápida con el fin de evitar la segregación (Figura 3.5(b)). La colocación se realizó considerando un espesor de losa de 15 cm. y una altura adicional correspondiente a la contrahuella de 19 mm. al igual que en la confección de la loseta.

Luego de acomodada la mezcla a la altura de la contrahuella, esta fue retirada para posicionar el rodillo manual haciéndolo girar sobre el encofrado como se observa en figura 3.5(c) a una velocidad constante en un total de 4 y 5 pasadas, alcanzando presiones de compactación de 0,06 MPa. y 0,13 MPa. respectivamente. Es importante que el área que toque el rodillo a la mezcla sea la máxima, por lo que se debe vigilar la acumulación de la mezcla sobre el encofrado. Posterior a la compactación, se enrasó la mezcla con la regla, evitando existencias de desnivel.

El curado del hormigón se realizó inmediatamente después de finalizado el proceso de compactación, cubriendo el total de la superficie con polietileno de alta densidad el cual permaneció por al menos 7 días para luego ser retirado como se observa en figura 3.5(d).



**Figura 3.5 Construcción sección de prueba: (a) Preparación colocación encofrado (b) Acomodo de la mezcla (c) Compactación (d) Estacionamiento**

### 3.3.4 Etapas experimentales

La experimentación realizada tuvo como objetivo analizar, en primer lugar, una loseta representativa del pavimento, con distinta compactación para estudiar la variación de resistencia, permeabilidad e infiltración (Figura 3.6). Posteriormente, a este análisis se le incorporó una base granular para examinar la interacción loseta-base, permitiendo la comparación con la medición anterior (Figura 3.7). Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de permeabilidad e infiltración en una sección completa de pavimento, lo que permitió establecer conexiones con estudios anteriores y analizar un área más extensa (Figura 3.8).

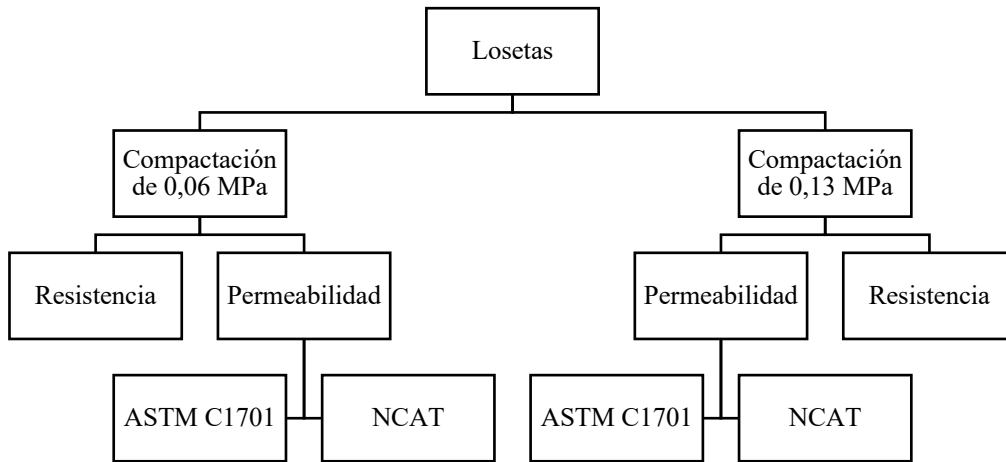


Figura 3.6 Descripción plan de trabajo en losetas

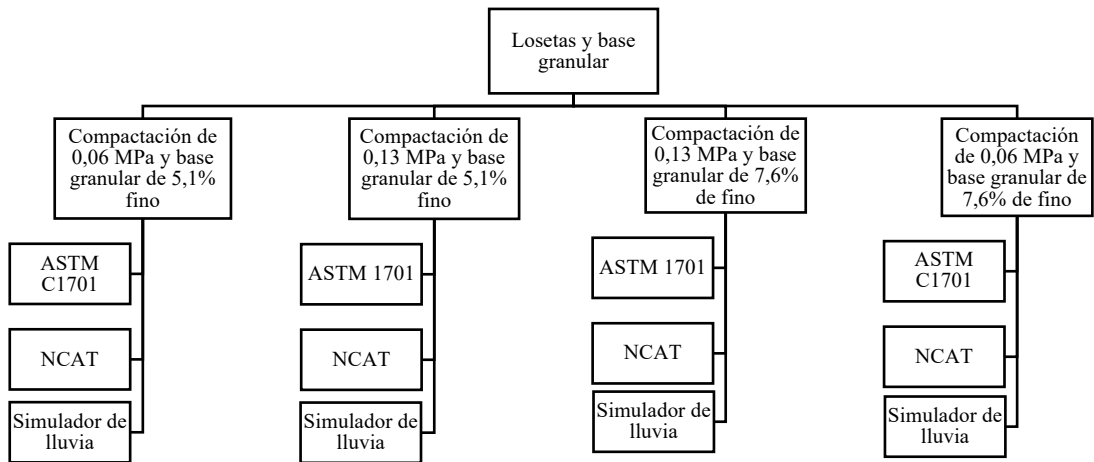


Figura 3.7 Descripción plan de trabajo en losetas y base granular

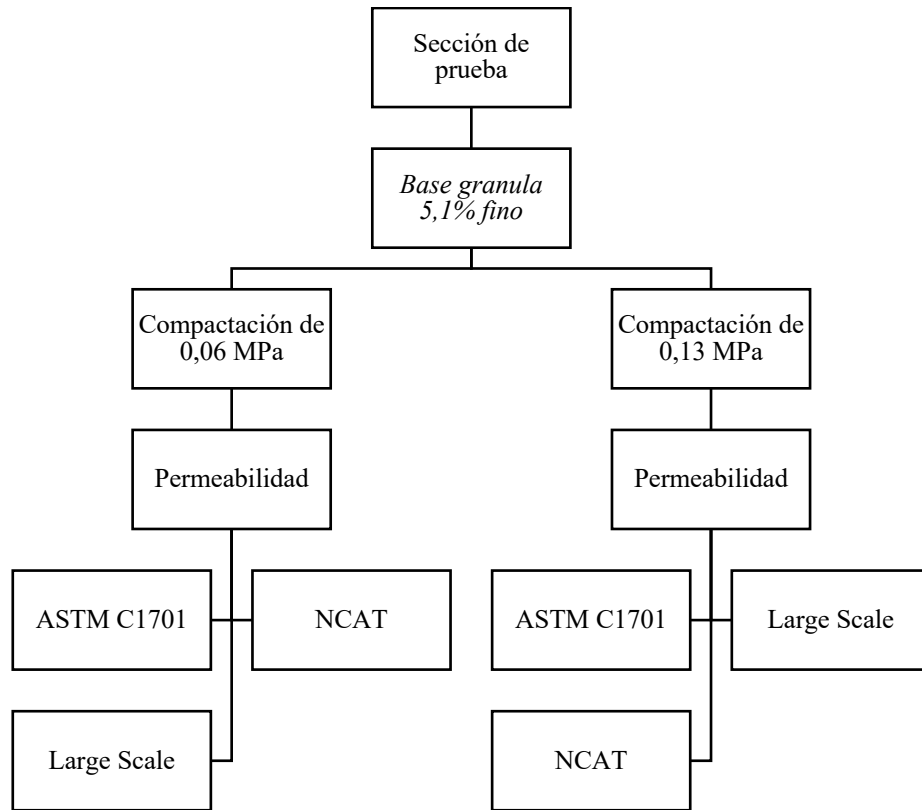


Figura 3.8 Descripción plan de trabajo en sección de prueba

### 3.4 Ensayos

#### 3.4.1 Resistencia a flexotracción

El ensayo de resistencia a flexotracción realizado corresponde a los procedimientos estandarizados para hormigones tradicionales según la NCh 1038 (INN, 2009b).

En la norma se establece que luego de retiradas las probetas del proceso de curado, se midan y registren los datos correspondientes a su masa y dimensiones como ancho, alto y largo. Posteriormente, se lleva a la máquina de ensayo (Figura 3.9) donde se ingresan los datos previamente recolectados y se comienza a cargar en los límites del tercio central de

la luz de ensayo, esto es realizado con una velocidad correspondiente a 0,005 MPa\*s. El ensayo finaliza al momento en que se alcanza la rotura de la probeta.



**Figura 3.9** Ensayo Flexotracción

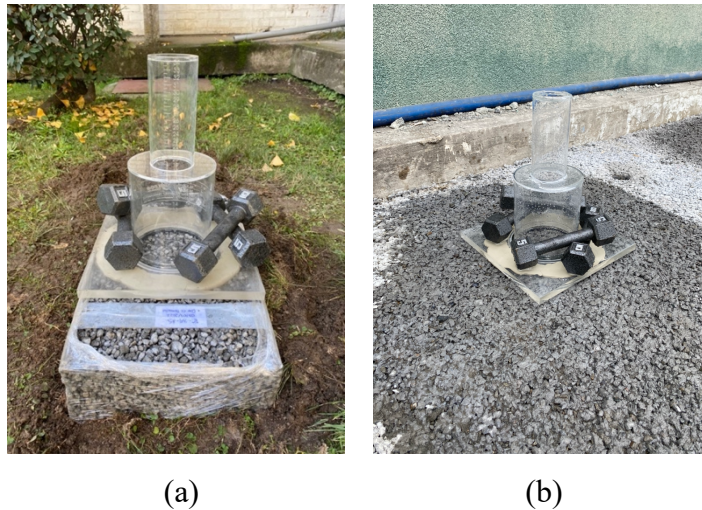
### 3.4.2 Permeabilidad

Se realizó el ensayo de permeabilidad en las losetas y en la sección de pavimento con un permeámetro National Center for Asphalt Technology [NCAT] de carga variable, el cual permite medir la permeabilidad del hormigón *in situ* a través del coeficiente de permeabilidad que se presenta en la ecuación 3.1.

$$k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.1)$$

Donde,  $k$  es el coeficiente de permeabilidad,  $a$  es el área del tubo de admisión,  $L$  es el espesor de la muestra,  $h_1$  es la altura inicial del agua,  $h_2$  es la altura final del agua y  $t$  es el tiempo que demora entre  $h_1$  y  $h_2$ .

Este método fue utilizado para la medición de la infiltración de la loseta, loseta con base y sección de prueba (figuras 3.10). Se vertió un balde de agua hasta alcanzar una altura apta para medir el tiempo de descenso y reemplazar los datos en la ecuación 3.1.



**Figura 3.10 Medición permeabilidad (NCAT):**  
**(a) Permeabilidad loseta (b) Permeabilidad sección de pavimento**

### 3.4.3 Infiltración

Se realizó el ensayo de infiltración en las losetas y la sección de pavimento con el infiltrómetro asociado a la norma de la Sociedad Estadounidense para pruebas de materiales (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2020), el que permite comparar los valores de permeabilidad in situ.

El método basado en la norma ASTM C1701, es de carga constante y permite medir la permeabilidad del hormigón *in situ* a través del coeficiente de infiltración, el cual se observa en la ecuación 3.2.

$$I = \frac{KM}{(D^2 t)} \quad (3.2)$$

Donde, I es el coeficiente de infiltración, M es la masa de agua que se ocupa para realizar el ensayo, D es el diámetro del anillo, t es el tiempo de medición transcurrido y K es un valor constante dado.

Este método fue utilizado para la medición de la infiltración de la loseta, loseta con base y sección de prueba (figuras 3.11). Se utilizó un balde con agua, vertiendo su contenido con la cantidad que indica la norma de acuerdo con su infiltración inicial. Se mantuvo el cuidado de alcanzar la altura entre 10 y 15 mm demarcada en el instrumento.



(a)

(b)

**Figura 3.11 Medición infiltración (ASTM C1701):  
(a) Infiltración loseta (b) Infiltración en pavimento**

### 3.4.4 Simulador de lluvia

Una de las formas de estudiar la funcionalidad de los pavimentos permeables, es a través de simuladores de lluvia, esta tecnología permite analizar la capacidad de infiltración de una forma más precisa y la generación de escorrentía (Rodríguez-Hernandez et al., 2012).

De acuerdo a lo establecido por (López, 2022). Se tienen las siguientes características de la lluvia simulada correspondientes a la más desfavorables en Concepción.

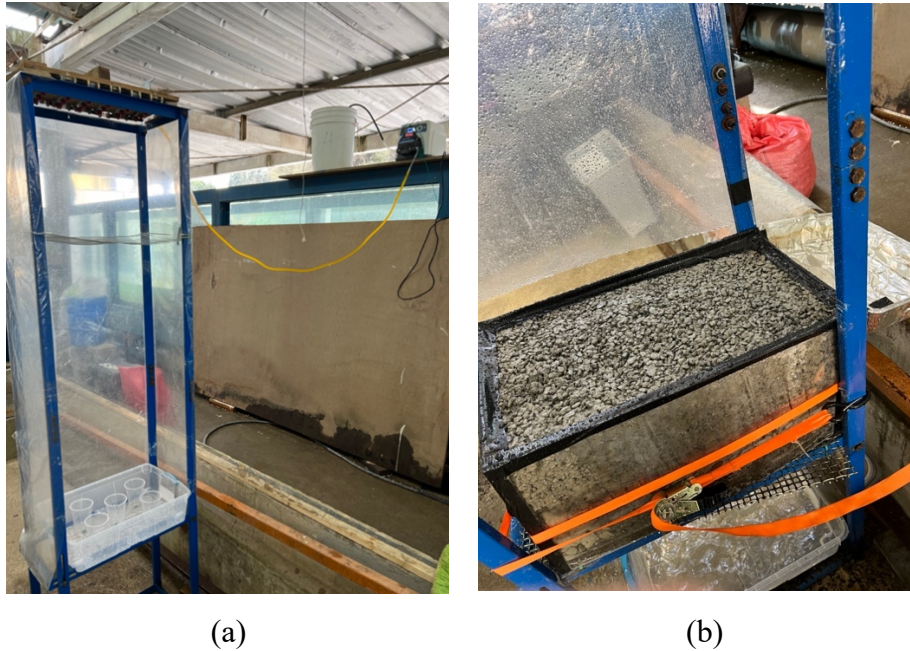
**Tabla 3.3 Características iniciales simulador de lluvia**

<b>Característica</b>	<b>Valor/Comentario</b>	
Tamaño de la gota	2 mm	
Intensidad	T=100 años	0.019 L/s
Inclinación de la loseta	9°	
Duración	1 hora	

El dispositivo utilizado como simulador está construido con acero y su estructura consta de un marco rectangular de 3 metros de altura, de ancho 0,3 mts. y largo 0,56 mts. Las probetas fueron colocadas a 60 centímetros de altura de la superficie, con una inclinación regulable. En este caso se establece que la inclinación debe ser de 9° debido a que, según el estudio de vientos realizado por (López, 2022), la fuerza de estos hace que la lluvia caiga a la superficie con esta inclinación. Además, se utilizó una malla para generar el tamaño de la gota de 2 mm., la cual estaba a 50 cm. de los aspersores.

La simulación de la lluvia se logra gracias a 30 goteros, distribuidos en 6 filas de 5 goteros cada una, equidistantes entre sí, estos están en la parte superior de la estructura cubriendo toda la superficie de prueba. El sistema de goteros se encuentra conectado a una bomba

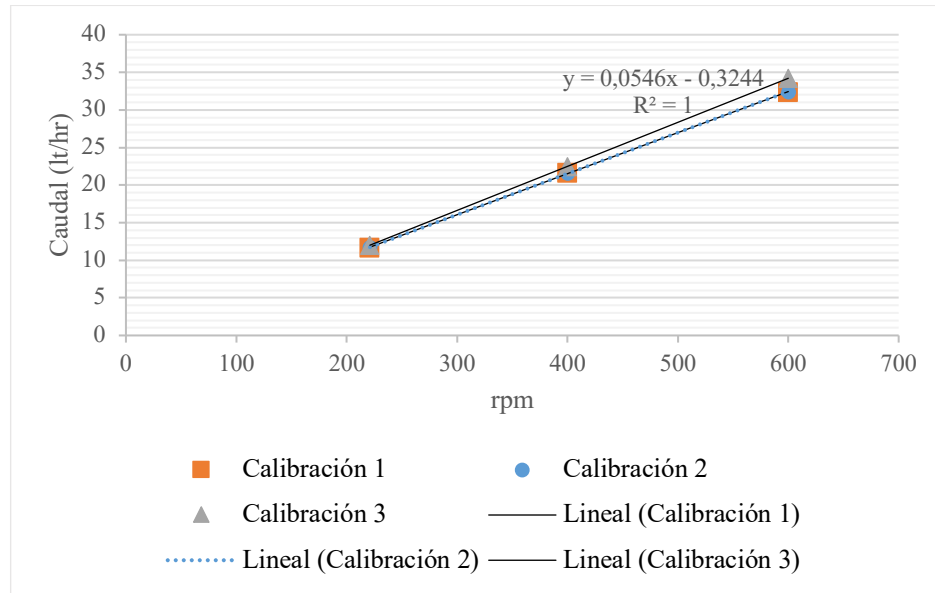
peristáltica que le proporciona el caudal de diseño necesario, esta a su vez está conectada a un balde con agua, el cual siempre se mantiene a la misma altura (Figuras 3.12).



**Figura 3.12** Simulador de lluvia: (a) conectado a bomba peristáltica (b) recolección de agua

Para generar el caudal necesario se utilizó una bomba peristáltica de la marca Masterflex modelo 7528 (1-600 RPM), logrando la intensidad establecida en tabla 3.3 a los 220 RPM, realizando, además, pruebas con 400 RPM y 600 RPM con el fin de estudiar la escorrentía.

Para su utilización, fue necesario calibrar la bomba (figura 3.13) cada vez que fue utilizada, para comprobar la generación del caudal necesario.



**Figura 3.13 Calibración de bomba**

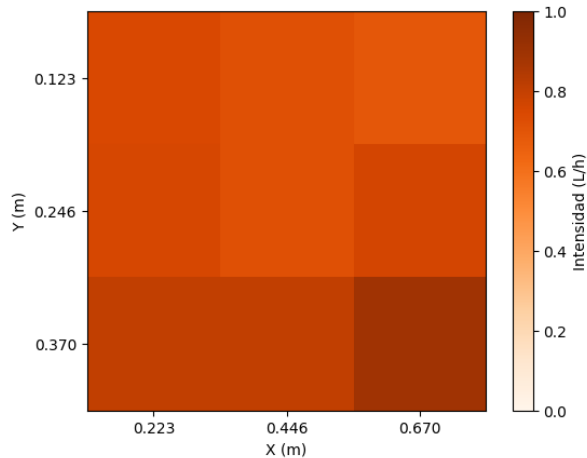
Para evaluar la uniformidad de lluvia caída, se utilizó el coeficiente de uniformidad más usado durante décadas en ensayos y regadío agrícola, que es el coeficiente de uniformidad de Christiansen Cu. (Christiasen, 1942). El valor Cu=100 significa que la irrigación es completamente uniforme; este valor es inalcanzable en la práctica, pero valores sobre Cu=80 son aceptables(Barbosa, 2006; Montebeller et al., 2001).

La calibración consistió en colocar 5 vasos distribuidos en el área correspondiente a 56x30 cm. Luego se debe medir la cantidad de agua acumulada en cada vaso a los 10 min de ensayo.

Para determinar la uniformidad de la lluvia se utiliza la siguiente fórmula.

$$Cu = 100 \left( 1 - \frac{\sum_1^n |\bar{x} - x_i|}{n\bar{x}} \right) \tag{3.3}$$

La uniformidad fue medida y comprobada 3 veces, obteniendo un promedio de 89 %, siendo esto sobre los 80 % necesarios para considerar la lluvia con una uniformidad óptima (figura 3.14).



**Figura 3.14 Calibración simulador de lluvia**

El simulador de lluvia busca evaluar la capacidad de infiltración de un paquete estructural que corresponde a la base y a la losa de hormigón permeable. Para esto se posicionó en una estructura de acrílico la base de 5,1% y 7,6% de fino sin compactar, solo enrasar y sobre esta se colocaron las losetas con las combinaciones de la tabla 3.4. Las mediciones para cada combinación fueron realizadas durante una hora.

Tabla 3.4 Combinaciones en análisis de simulador de lluvia

Compactación Loseta	% fino base	rpm	L/hr
0,09 MPa	5,1%	221	11,1
		400	20,7
		600	30,9
	7,6%	221	11,1
		400	20,7
		600	30,9
0,13 MPa	5,1%	221	11,1
		400	20,7
		600	30,9
	7,6%	221	11,1
		400	20,7
		600	30,9

### 3.4.5 Large scale

El método Large Scale fue medido en terreno en la sección de prueba siguiendo la metodología establecida por Meetprotocol RAAK Waterbergende Weg. Investigadores anteriores demostraron que se puede obtener resultados de infiltración más precisos aumentando significativamente la superficie del pavimento sometido a ensayo. Al inundar un área mucho mayor de pavimento durante las pruebas, se demostró que cualquier variación espacial en la capacidad de infiltración se promedia eficazmente (Boogaard & Lucke, 2019).

Se encerró con sacos de arena un área total de 1,44 m<sup>2</sup> y la pala de un tractor fue llenada con agua para luego vaciar su contenido en el área encerrada (figura 3.15)



Figura 3.15 Método large scale

Para medir el descenso del agua se utilizó un Marcador de nivel marca HOBO modelo U20L-04, el cual tiene un rango de funcionamiento de 0- 4 m. Estos registradores tienen una precisión de nivel de agua de  $\pm 0,4$  cm. (figura 3.16(a)). Además, se utilizó una regla y una cámara marca Ok modelo OXC 3040U- IB (figura 3.16(b)) para evidenciar el desarrollo de este proceso.



(a)



(b)

Figura 3.16 (a) Marcador de nivel (b) Regla y cámara

### 3.4.6 Porosidad

Para realizar ensayos de densidad y porosidad se extrajeron testigos de la sección de pavimento.

Primero se determinaron las dimensiones de los testigos para obtener su volumen y luego se secó la probeta en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas, para obtener la masa constante. Una vez seca la probeta, se debe sumergir en agua, determinando así el volumen sólido de la muestra.

Para calcular la densidad de la probeta se utiliza ecuación 3.4.

$$\text{Densidad} = \frac{K * A}{D^2 * L} \quad (3.4)$$

Donde A, corresponde a la masa seca, D es el diámetro, L es el largo y K es una constante equivalente a 1 273 240 en unidades SI.

Para calcular la porosidad de cada probeta se utiliza ecuación 3.5.

$$\text{Porosidad} = \left[ 1 - \left( \frac{K * (A - B)}{\rho_w * D^2 * L} \right) \right] * 100 \quad (3.5)$$

Donde B es la masa sumergida y  $\rho_w$  es la densidad del agua.

### **3.5 Conclusión**

En este capítulo se presentó una visión detallada de la metodología utilizada en esta investigación. Definiendo los materiales y sus características y normativas a cumplir, además de los pasos necesarios para la confección del hormigón poroso que fue utilizada en probetas y en la construcción de la sección de prueba correspondiente a un estacionamiento. Además, se describieron los ensayos que fueron utilizados, tanto para medir resistencia a flexotracción, como los distintos métodos para medir permeabilidad, destacando la importancia de evaluar ambas características.

Estas metodologías descritas permitieron llevar a cabo los experimentos de forma rigurosa, para obtener resultados confiables y comparables, así cumplir con los objetivos de la investigación.

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo, se detallan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos previamente descritos en el capítulo 3. Estos resultados se organizan en tres etapas correspondientes a las losetas de hormigón poroso, la estructura de pavimento correspondiente a loseta de hormigón poroso y base granular y una sección de prueba correspondiente a un estacionamiento.

Los ensayos realizados permitieron medir resistencia a flexotracción, infiltración y permeabilidad, empleando métodos como NCAT, ASTM C1701, simulador de lluvia y método large scale.

### **4.2 Loseta de hormigón poroso**

#### **4.2.1 Resistencia a flexotracción**

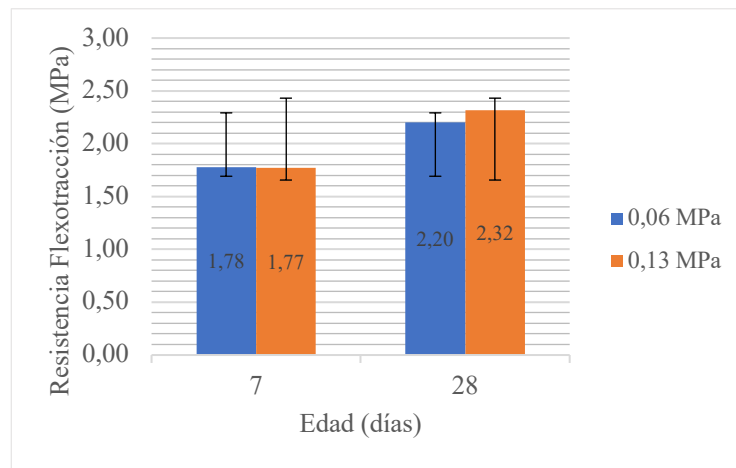
Las resistencias a la flexotracción de las viguetas obtenidas a partir de la confección de losetas corresponden a las entregadas en Figura 4.1 y se obtienen los valores promedio a los 7 días y a los 28 días.

La variación existente corresponde a la compactación de las losetas, ambas fueron compactadas con rodillo pesado con 3 y 4 pasadas de rodillo, alcanzando presiones de compactación equivalentes a 0,06 MPa. y 0,13 MPa. respectivamente.

Para el caso de 3 pasadas de rodillo, se obtiene una resistencia de 2,20 MPa. y para 4 pasadas de rodillo de 2,32 MPa., un 5,45 % más que el primer caso.

El aumento de resistencia entre una loseta y otra es baja, pero a pesar de esto, de acuerdo a lo establecido por Villar (2022), donde se diseñó un estacionamiento con hormigón poroso, se tiene que en ambos casos se superan los 0,9 MPa. mínimos necesarios para el estacionamiento de vehículos livianos.

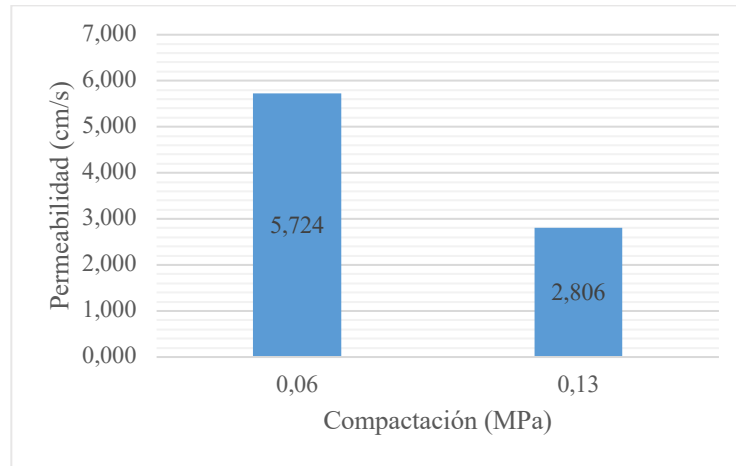
Los resultados obtenidos además coinciden y se encuentran dentro de los rangos obtenidos por (Batezini, 2009; Gupta, 2014; Kevern et al., 2008; Shu et al., 2011) donde las resistencias flexotracción varían entre 1,5 MPa. y 3 MPa.



**Figura 4.1 Resistencia a flexotracción en losetas**

#### 4.2.2 Permeabilidad

La permeabilidad fue medida a cada loseta con el método NCAT y los resultados se muestran en la figura 4.2, donde para cada compactación se obtiene una permeabilidad.



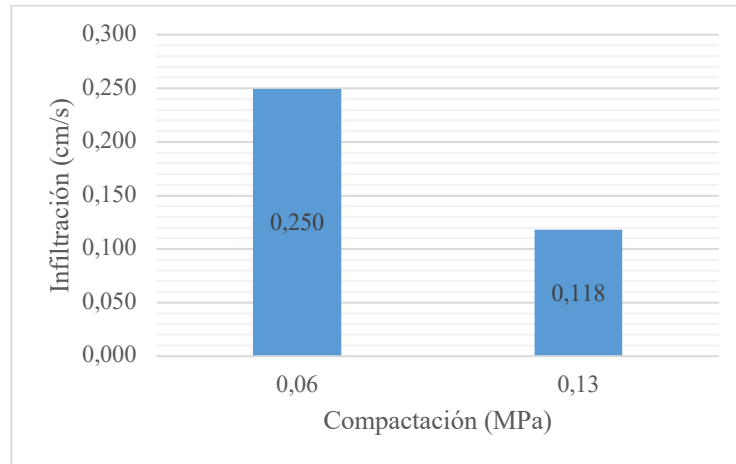
**Figura 4.2 Permeabilidad en losetas con método NCAT**

Al analizar los resultados obtenidos, se visualiza una disminución de permeabilidad de un 51 % a mayor compactación. Concluyendo que la compactación aplicada en la mezcla de hormigón poroso afecta la capacidad de permeabilidad de este tipo de pavimento.

Además, al comparar los resultados con investigaciones como la realizada por Chen, et al. (2019) donde se realizaron mediciones a un pavimento de hormigón poroso con el método NCAT, obteniendo valores entre los 3,9 cm/s a 5,18 cm/s. Para el caso estudiado en esta investigación, la mezcla con mayor compactación se encuentra fuera de estos rangos y la mezcla con menor compactación supera los rangos antes mencionados, siendo esta última la que cumple con los parámetros anteriormente descritos.

### 4.2.3 Infiltración

La infiltración fue medida en las losetas con el método ASTM C1701 y los resultados se muestran en la figura 4.3, donde para cada compactación se obtiene una infiltración.



**Figura 4.3 Infiltración en losetas con método ASTM C1701**

Al analizar los resultados obtenidos se concluye que existe una disminución de la infiltración de un 52,8 % a mayor compactación. Al igual que en el caso de la permeabilidad, la compactación aplicada en la mezcla de hormigón poroso afecta la capacidad de permeabilidad de este tipo de pavimento.

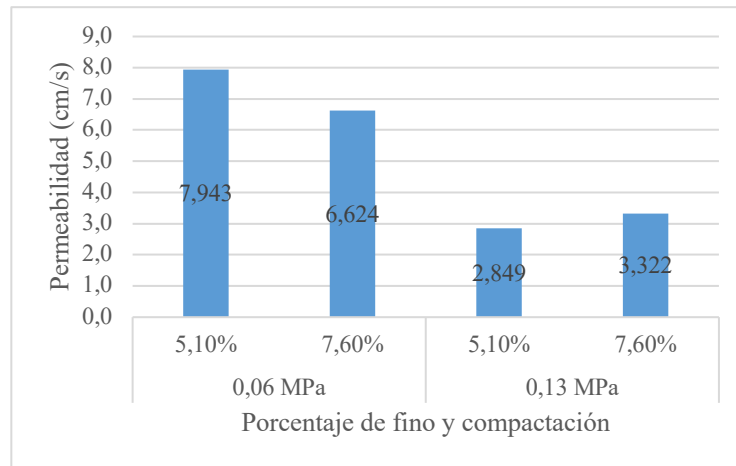
Además, al comparar los resultados con los límites establecidos por la ACI (2010) para hormigón poroso en uso de pavimentos, donde se establece un mínimo de tasa de infiltración de 0,14 cm/s., se tiene que la mezcla con menor compactación cumple y supera en un 78,6 % a lo establecido como mínimo. En cambio para la mezcla con mayor compactación, se tiene que la tasa de infiltración obtenida no supera el mínimo.

### **4.3 Loseta hormigón poroso y base granular**

#### **4.3.1 Permeabilidad**

La permeabilidad en la estructura de pavimento, correspondiente a la loseta de hormigón poroso y la base granular, fue medida a través del método NCAT. Los resultados se

muestran en la figura 4.4, donde para los dos tipos de compactación estudiada se analizan dos distintos tipos de porcentaje de fino en la base.



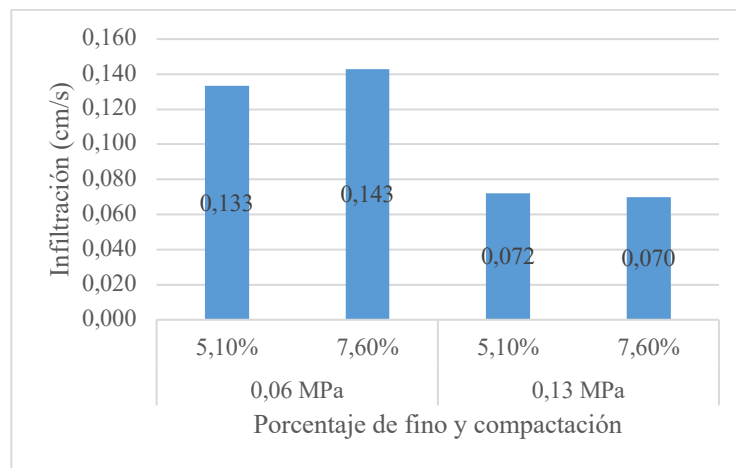
**Figura 4.4** Permeabilidad en loseta y base con método NCAT

Al analizar los resultados obtenidos, existe una mayor permeabilidad para el caso de una mezcla con menor compactación combinado con una base granular con un porcentaje de fino del 5,1 %. A su vez, este valor es 19,9 % mayor que el porcentaje de fino en base correspondiente a 7,6 %, conservando la compactación antes mencionada.

Al analizar la compactación mayor en mezcla, se observa que al variar el porcentaje de fino existente en la base, ocurre el efecto contrario al antes mencionado. La base con 5,1 % de fino presenta una menor permeabilidad en un 14,2 % que aquella de 7,6 % de fino. Este resultado puede deberse a que la base no es influyente en la permeabilidad.

### 4.3.2 Infiltración

La infiltración en la estructura de pavimento, correspondiente a la loseta de hormigón poroso y la base granular, fue medida a través del método ASTM C1701. Los resultados se muestran en la figura 4.5, donde para los dos tipos de compactación estudiada se analizan con dos distintos tipos de porcentaje de fino existente en la base.



**Figura 4.5 Infiltración en loseta y base con método ASTM C1701**

Al analizar los resultados obtenidos, se tiene una mayor infiltración para el caso de una mezcla con menor compactación. Al analizar el porcentaje de fino en la base, no existe una relación evidente, ya que el porcentaje de fino de 7,6 % tiene una mayor infiltración en un 7,5 % que el menor porcentaje de fino existente. A su vez, se tiene que la mezcla con mayor compactación tiene una diferencia entre las dos opciones de fino en la base de 2,6 % siendo poco significativa en la infiltración obtenida. Al igual que en los resultados de permeabilidad, se puede concluir que la base no es influyente en la obtención de resultados.

### 4.3.3 Simulador de lluvia

A la estructura de pavimento se le realizaron pruebas con un simulador de lluvia con el fin de analizar la cantidad de agua infiltrada y si se produce escorrentía al variar las intensidades de lluvia. Las pruebas fueron realizadas por una hora en cada intensidad y con cada combinación de loseta y base granular.

En las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se tiene los resultados de los estudios realizados al simulador de lluvia, donde para cada intensidad medida se tiene el agua infiltrada en la estructura de pavimento, la diferencia sobre el agua real proporcionada que nos permite ver el agua que se queda en el sistema y si existe una generación de escorrentía.

**Tabla 4.1 Resultados simulador con compactación 0,06 MPa y base con 5,1% de fino**

<b>rpm</b>	<b>L/hr</b>	<b>Agua infiltrada en probeta</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Escorrentía</b>
221	12	11,35	0,7	0%
400	22,5	20,92	1,6	0%
600	34,2	32,6	1,6	0%
<b>Promedio infiltración</b>			1,3	

**Tabla 4.2 Resultados simulador con compactación 0,06 MPa y base con 7,6% de fino**

<b>rpm</b>	<b>L/hr</b>	<b>Agua infiltrada en probeta</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Escorrentía</b>
221	11,7	10,7	1,0	0%
400	21,6	21,1	0,5	0%
600	32,4	30,8	1,6	0%
<b>Promedio infiltración</b>			1,0	

**Tabla 4.3 Resultados simulador con compactación 0,13 MPa y base con 5,1% de fino**

rpm	L/hr	Agua infiltrada en probeta	Diferencia	Escorrentía
221	11,7	10,6	1,1	0%
400	21,6	21,1	0,5	0%
600	32,4	31,36	1,0	0%
<b>Promedio infiltración</b>			0,9	

**Tabla 4.4 Resultados simulador con compactación 0,13 MPa y base con 7,6% de fino**

rpm	L/hr	Agua infiltrada en probeta	Diferencia	Escorrentía
221	11,1	10,15	1,0	0%
400	20,7	19,65	1,1	0%
600	30,9	30,3	0,6	0%
<b>Promedio infiltración</b>			0,9	

Con lo obtenido en las tablas de resultados, se tiene que para todos los casos estudiados no hubo generación de escorrentía. A pesar de que, visiblemente en el caso de la mezcla con una compactación de 0,13 MPa y base 7,6% se veía más saturada, pero sin la generación algún porcentaje de escorrentía.

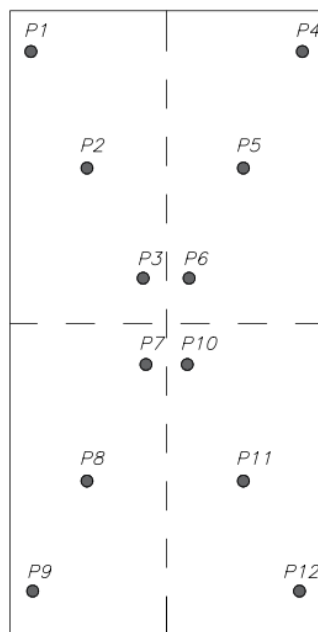
El agua fue infiltrada en la estructura de losa y base granular, obteniendo un promedio de 1 litro en el sistema que no se infiltra.

La escorrentía medida en simulador de lluvias se determinó a través de porcentaje y cumple con estudios donde utilizaron pavimentos permeables de hormigón poroso y asfalto permeable, el porcentaje de escorrentía generado variaba entre un 2,5 % y un 0,0 % (Rodriguez-Hernandez et al., 2016)

## 4.4 Sección de pavimento

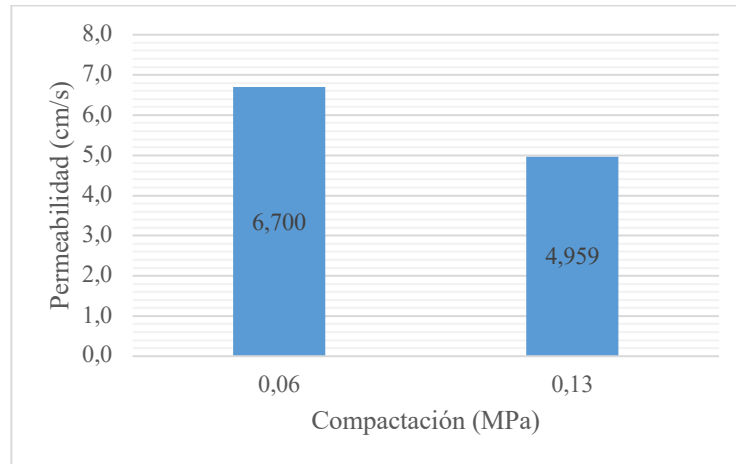
### 4.4.1 Permeabilidad

Se midió permeabilidad en la sección de pavimento con el método NCAT, en 3 posiciones de cada losa corta, como se tiene en figura 4.6.



**Figura 4.6 Puntos de medición aleatorios en tramo de pavimento**

Para cada losa se obtuvo el promedio de permeabilidad, siendo los resultados presentados en figura 4.7.



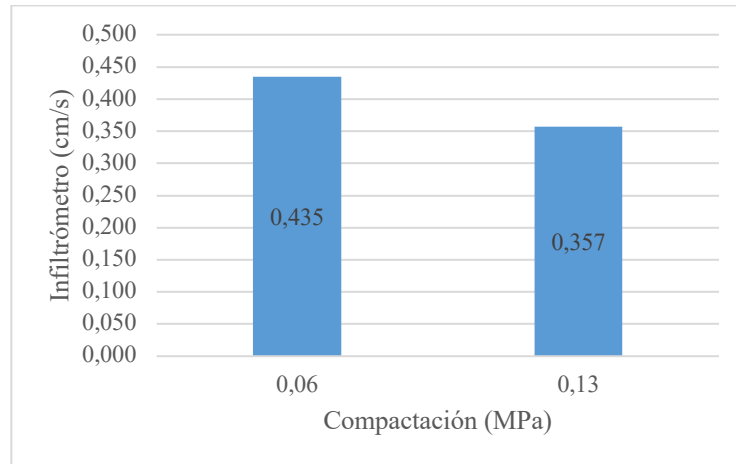
**Figura 4.7 Permeabilidad sección pavimento con método NCAT**

Al analizar los resultados obtenidos, se tiene que existe una disminución de permeabilidad de un 26 % a mayor compactación. Pudiendo concluir con estos resultados, que la compactación aplicada en la mezcla de hormigón poroso afecta en gran medida a la capacidad de permeabilidad de este tipo de pavimento.

Además, al realizar una comparación de estos resultados con los obtenidos en otras investigaciones, donde se establecen rangos de 3,9 cm/s a 5,18 cm/s., en ambos casos se cumple con el rango de permeabilidad, siendo la compactación de 0,06 MPa. mayor al límite superior de la permeabilidad (Chen et al., 2019).

#### **4.4.2 Infiltración**

Se midió infiltración en cada losa corta de la sección de pavimento con el método ASTM C1701 en 3 posiciones al igual que en las mediciones de permeabilidad (figura 4.8).



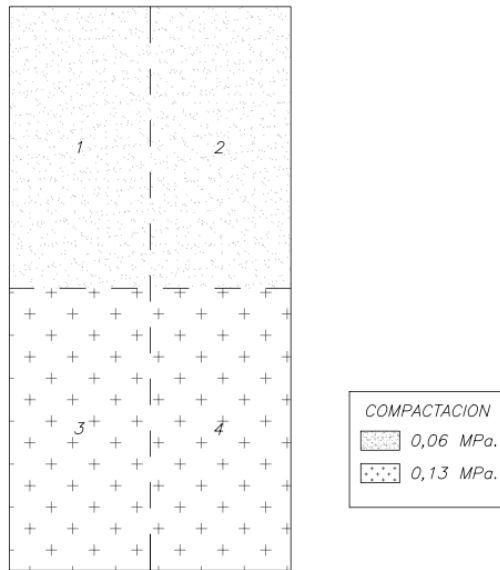
**Figura 4.8 Infiltración en sección de pavimento con método ASTM C1701**

Al analizar los resultados obtenidos, se tiene que existe una disminución de permeabilidad de un 17,9 % a mayor compactación. Pudiendo concluir con estos resultados que la compactación aplicada en la mezcla de hormigón poroso afecta a la capacidad de permeabilidad de este tipo de pavimento. Se debe considerar que se obtuvieron testigos en la sección de prueba, que proporcionaron la porosidad de las losas con su diferencia de compactación, donde la losa con menor compactación obtuvo aproximadamente el 50% más que la losa con mayor compactación (Anexo 4.5)

Al comparar los resultados obtenido con el recomendado por la ACI (2010), se tiene que para los dos casos de compactación, se supera el mínimo establecido correspondiente a 0,14 MPa.

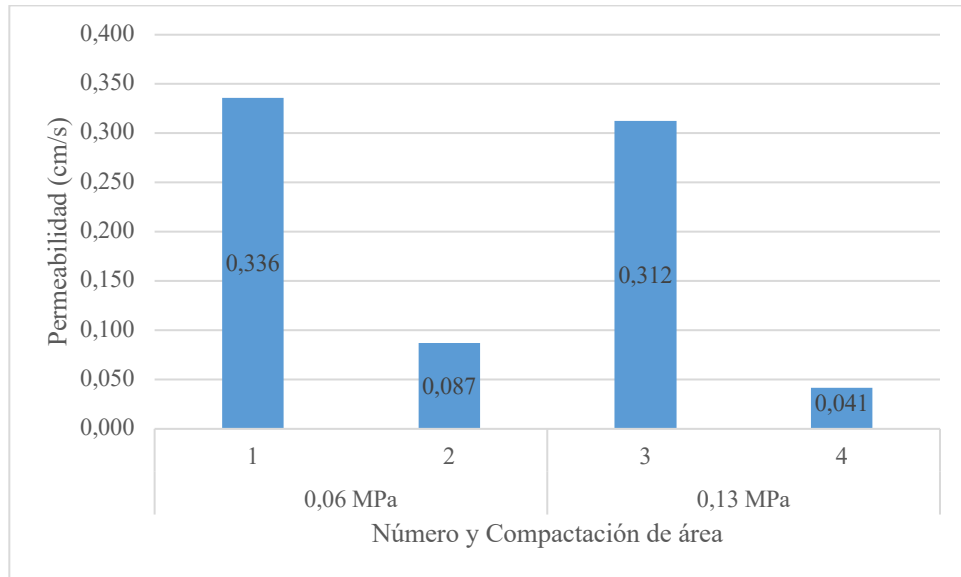
#### 4.4.3 Large Scale

El método Large Scale fue medido en cada una de las 4 losas cortas que se observan en la figura 4.9. Las dos áreas delanteras tienen una compactación correspondiente a 0,06 MPa. y las dos áreas traseras tienen una compactación de 0,13 MPa.

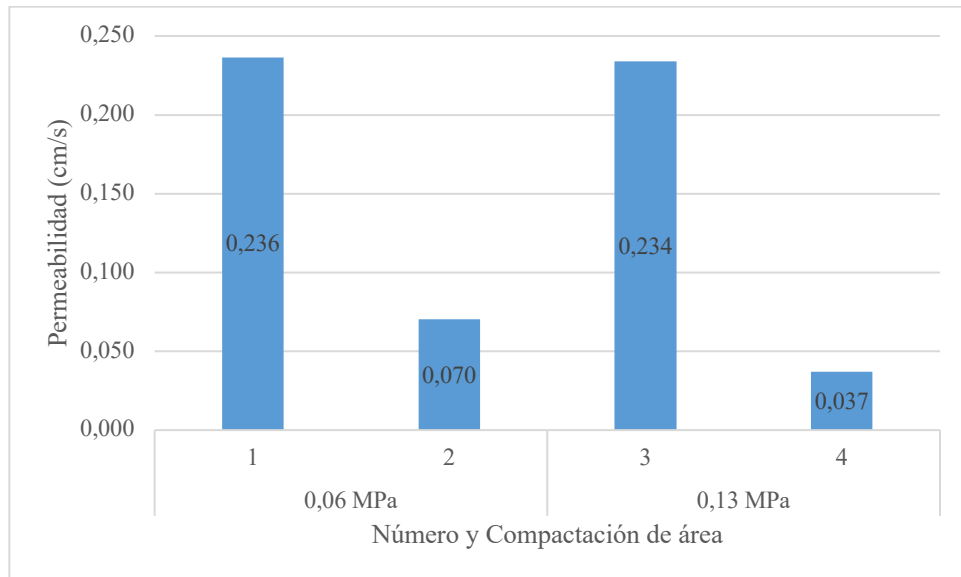


**Figura 4.9** Áreas designadas para cada losa corta

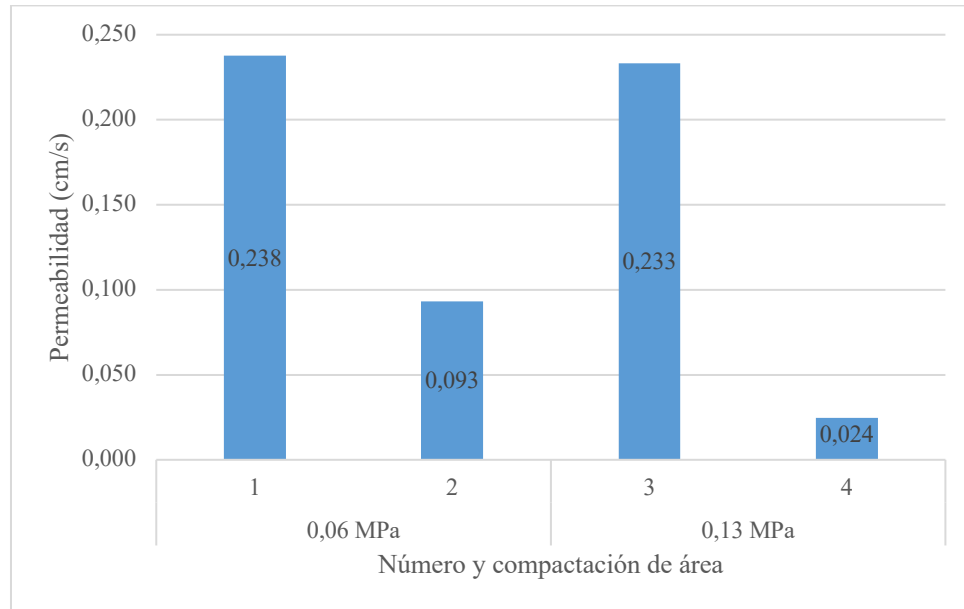
En las figuras 4.10, 4.11, 4.12 se tiene los resultados promedios de las mediciones de forma manual, a través de cámaras y con sensores medidores de altura en cada área respectivamente.



**Figura 4.10 Permeabilidad por área con mediciones manuales**



**Figura 4.11 Permeabilidad por área mediciones con cámara**



**Figura 4.12 Large Scale medición con sensores**

Con los resultados obtenidos, se observa una tendencia en los tres métodos de medición, donde las áreas 1 y 3 tienen mayor permeabilidad, a pesar de tener menor y mayor compactación respectivamente.

En las áreas 1 y 2 se tienen variabilidades entre ellas de 60 y 74 % dependiendo del método y para el caso de las áreas 2 y 3 existen variabilidades entre ellas de 84 y 90 %.

De acuerdo con lo establecido por (Boogaard, 2015), en los Países bajos, Bélgica y Alemania, los pavimentos permeables deben demostrar una capacidad de infiltración de 194,4 mm/h. (0,0054 cm/s), además (Lucke et al., 2014) plantea que la tasa de infiltración se considera aceptable o no dependiendo de varios factores, como la ubicación del pavimento. Por ejemplo, en los países bajos y en gran parte de Europa, los pavimentos permeables recién instalados deben tener una capacidad mínima de infiltración de 97,2 mm/h. (0,0027 cm/s), Los rangos en los estudios anteriores son de acuerdo con el método Large Scale, ya que demostraron que se puede obtener resultados de infiltración más

precisos aumentando significativamente la superficie del pavimento sometido a ensayo. Al inundar un área mucho mayor de pavimento durante las pruebas, debido que cualquier variación espacial en la capacidad de infiltración se promedia eficazmente (Boogaard & Lucke, 2019).

Con lo establecido en literatura, se determina que se obtuvieron resultados mayores a los parámetros establecidos para pavimentos permeables.

Boogard, *et al.* (2014) realizó este método en ocho pavimentos permeables con una construcción similar y de edad similar, obteniendo gran variación en las tasas de infiltración calculadas, entre 0,0008 y 0,0095 cm/s. También, Boogard y Lucke (2019) realizaron ensayos con este método a 16 pavimentos permeables con construcción y edades similares, obteniendo resultados variables de 0,0008 y 0,014 cm/s.

La variabilidad puede deberse a los métodos de construcción utilizados, a las condiciones climáticas de los días previos o a la posición de la losa, ya que las del extremo tienen mayor permeabilidad considerando que al lado de ellas no existe pavimento, distinta es la situación para las áreas 2 y 4, donde existe otro pavimento al lado de ellas.

#### **4.5 Conclusión**

En este capítulo, se entregaron y compararon los resultados de resistencias obtenidos en una misma mezcla aplicando distintas presiones de compactación correspondientes a 0,06 y 0,13 MPa., esta variación permitió analizar como varía la resistencia y si cumple con los requisitos establecidos para su aplicación en estacionamientos. Además, para esta variación se estudiaron las permeabilidades alcanzadas pudiendo concluir que a mayor compactación la permeabilidad se ve afectada en mayor número, siendo que aumenta la resistencia.

Además, al analizar las bases con porcentajes de fino de 5,1 y 7,6 %, se tiene que las permeabilidades obtenidas no afectan a las permeabilidades antes obtenidas sin el estudio con las bases. Concluyendo que, al tener un pavimento con una permeabilidad adecuada, la base granular con variación de porcentaje de fino no afecta.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

La compactación de la losa de hormigón y la cantidad de finos de la base granular afectan parcialmente la resistencia a la flexotracción y la permeabilidad de un hormigón poroso para su uso en pavimentos permeables de estacionamientos. Lo anterior debido a que la compactación de la losa de hormigón al variar desde un 0,6 a 0,13 MPa. afecta en un aumento del 5,45% de resistencia a la flexotracción, pero influye en una disminución de la permeabilidad en un 50% comparada la compactación menor. A su vez, la base granular comercial utilizada, al variar el porcentaje de fino desde un 5,1 % y un 7,6 % no se concluye que afecten a la permeabilidad de este tipo de pavimento, ya que los resultados fueron variables. Estos resultados son importantes y en la literatura especializada son inexplorados.

La relación establecida entre la compactación y la resistencia a flexotracción, no significa que afecta a la aplicación de estacionamiento dada, ya que al diseñar con losa corta se necesitan resistencias sobre los 1,1 MPa. la cual se alcanza en ambos casos. A su vez, la compactación influyó a la permeabilidad de este hormigón, esto debido que para el caso de la loseta hay variaciones de permeabilidad de aproximadamente 50 % en los distintos métodos, esta tendencia es igual al medir esta característica en las combinaciones de losa de hormigón poroso y la base granular con distinto porcentaje de fino, conservando la variación de permeabilidad en alrededor de un 50 %. Para el caso del pavimento correspondiente a un estacionamiento, el cual fue construido con losa corta y una variación de la compactación de la misma magnitud antes mencionada y una base granular con un porcentaje de fino de 5,1 %, se tiene que para métodos como NCAT y ASTM C1701 a menor compactación se tiene aumentos en la permeabilidad en aproximadamente 20 % comparados con la menor compactación. Para el método en terreno correspondiente a

Large Scale se tienen variaciones de permeabilidad de sobre el 60 % entre las losas con las mismas compactaciones.

La variación en los resultados correspondiente a ensayos como NCAT y ASTM C1701 comparados con métodos como Large Scale tiene relación con las áreas de medición, considerando que los primeros métodos tienen áreas de medición de 0,0168 m<sup>2</sup> y 0.0681 m<sup>2</sup> respectivamente, en cambio este último tiene un área de 1,44 m<sup>2</sup>, pudiendo realizar una medición más precisa al establecer una homogeneidad al considerar mayor área.

Con los estudios realizados a la base granular indican que la cantidad de fino (en el rango del 5,1% al 7,6%) no influye en la permeabilidad de la estructura de pavimento cuando la losa tiene una permeabilidad adecuada. Considerando que, dentro de los resultados obtenidos en el simulador con lluvias de la Ciudad de Concepción, no se generaron escorrentías a pesar de que estas fueron aumentadas en el triple. Esto sugiere que se puedan ocupar bases comerciales, limitando la cantidad de fino en un máximo del 7,6%.

Se puede concluir con esta investigación que, a mayor compactación, la resistencia tiene un impacto relativamente menor, pero afecta a la permeabilidad del hormigón poroso. Además, se ha evidenciado que cuando se cumple con los estándares de permeabilidad establecidos en la literatura, la base granular estudiada no influye en la permeabilidad del pavimento. Esto nos permite contribuir al conocimiento para masificar el hormigón permeable a mayores utilizaciones con bases comerciales sin necesidad de requerir una especial. Además, hay que considerar que se realizaron estudios correspondientes a la aplicación en estacionamientos siendo posible extender a aplicaciones como ciclovías, en las cuales se necesitan menores resistencias.

Para futuras líneas de investigación, se podría profundizar en el estudio de la base granular y su uso a largo plazo puede afectar a la obstrucción de los poros.

**GLOSARIO**

ACI	American Concrete Institute
AF	Árido fino
AG	Árido grueso
ASTM	American Society for Testing and Materials
A/C	Relación agua cemento
INN	Instituto Nacional de Normalización
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo
NCAT	Asphalt Field Permeameter
NCh	Norma Chilena
SERVIU	Servicio de Vivienda y Urbanización

## REFERENCIAS

ACI Committee 522., & American Concrete Institute. (2010a). *Report on pervious concrete*. American Concrete Institute.

ACI Committee 522., & American Concrete Institute. (2010b). *Report on pervious concrete*. American Concrete Institute.

American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*.  
[https://doi.org/10.1520/C1701\\_C1701M-09](https://doi.org/10.1520/C1701_C1701M-09)

Ansari, A., & Mahajan, M. (2020). INFLUENCE OF COMPACTION METHODS ON FUNCTIONAL AND STRUCTURAL PERFORMANCE OF PERVIOUS CONCRETE. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJCIET)*, 11(7). <https://doi.org/10.34218/ijciet.11.7.2020.009>

Balbo, J. (2020). *Pavimentos de Concreto Permeáveis: uma visão ambiental de tecnologia sustentável emergente*. Oficina de Textos .

Barbosa, G. (2006). *Avaliação Experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em área urbanas*. Universidade de Brasília.

Batezini, R. (2009). *Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis Como Revestimento de Pavimentos Para Áreas de Veículos Leves* [Univeridade de Passo Fundo].  
<https://doi.org/https://doi.org/10.31274/rtd-180813-6632>

- Batezini, R. (2013). *Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos Leves*. Universidade de Passo Fundo.
- Batezini, R. (2019). *Estudo das Características Hidráulicas e Mecânicas de Calçadas em Concreto Permeável em pista experimental*. Universidade de Passo Fundo.
- Batezini, R., Balbo, J. T., Haselbach, L., Curvo, F. de O., Kalleder, G. N., Sato, B. S., & Zema, D. (2021). Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. *Ambiente Construído*, 21(2), 177–194. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000200520>
- Boogaard, F. (2015). *Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands*. <https://doi.org/10.4233/uuid:d4cd80a8-41e2-49a5-8f41-f1efc1a0ef5d>
- Boogaard, F., & Lucke, T. (2019). Long-term infiltration performance evaluation of Dutch permeable pavements using the full-scale infiltration method. *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020320>
- Carrasco, M., Rautenberg, D., & Positieri, M. (2021). Hormigón drenante: diseño, características y aplicaciones. *Revista Hormigón*, 5–23. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/k8kj29kpr>
- Castro, J., De Solminihac, H., Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón Laboratory study of mixture proportioning for pervious concrete pavement. In *Revista Ingeniería de Construcción* (Vol. 24, Issue 3). [www.ing.puc.cl/ric](http://www.ing.puc.cl/ric)

- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 111, pp. 262–274). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>
- Chen, L. M., Chen, J. W., Chen, T. H., Lecher, T., & Davidson, P. C. (2019). Measurement of permeability and comparison of pavements. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030444>
- Christiasen, J. E. (1942). *Irrigation by Sprinkling*.
- Ferrada, C. (2023). *Estudio Experimental de Secciones de Pavimento de Hormigón Poroso con residuos de Vidrio o Cerámica como Reemplazo Parcial de Cemento*.
- Furtado, L., Mota, A. D. A., Grison, F., & Menegotto, M. L. (2021). Eficiência de drenagem de um modelo de pavimento de concreto permeável sob chuva natural. *Revista de Engenharia Civil IMED*, 8(1), 128. <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i1.4153>
- Fwa, T. F., Lim, E., & Tan, K. H. (2015). Comparison of permeability and clogging characteristics of porous asphalt and pervious concrete pavement materials. *Transportation Research Record*, 2511, 72–80. <https://doi.org/10.3141/2511-09>
- Gupta, R. (2014). Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia - A pilot study. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2013.10.001>
- Haselbach, L., & Freeman, R. (2006). Vertical Porosity Distributions in Pervious Concrete Pavement. *ACI Materials Journal*, 103(6), 452–458. <https://doi.org/10.14359/18223>

INN. (1968). *NCh 148*.

INN. (2009a). *NCh 1017*.

INN. (2009b). *NCh 1038*.

Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2012). *NCh 1498*. [www.inn.cl](http://www.inn.cl)

Ioannides, A. (1991). EXTENSION OF WESTERGAARD SOLUTIONS USING DIMENSIONAL ANALYSIS. *2ND INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE THEORETICAL DESIGN OF CONCRETE PAVEMENTS (CROW RECORD 5)*, 357–388.

IOWA Department of Natural Resources. (2019a). *IOWA Storm Water Management Manual- Chapter 8 Permeable Pavement Systems*.

IOWA Department of Natural Resources. (2019b). *IOWA Storm Water Management Manual- Chapter 8 Permeable Pavement Systems*.

Jahan, K., Everett, J. W., Orlins, J., Mehta, Y., Hesketh, R. P., Farrell, S., Hollar, K., Savelski, M., Polikar, R., & Cinaglia, M. (2004). *Undergraduate Education in Pollution Prevention*. <http://sun00.rowan.edu/~everett/reu/reu.htm>.

Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2009). Evaluation of Pervious Concrete Workability Using Gyrotory Compaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), 764–770. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:12\(764\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:12(764))

Kevern, J. T., Wang, K., Christopher, R., Kandil, W. A., & Simpkins, W. (2008). *Advancements in pervious concrete technology*.

- Kevern, J. T., Wang, K., & Schaefer, V. R. (2006). *Pervious Concrete Construction: Methods and Quality Control*. <https://www.researchgate.net/publication/228492306>
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 193, pp. 221–233). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>
- López, N. (2022). *Generación de lluvias en ambiente de laboratorio*.
- Lucke, T., Boogaard, F., & van de Ven, F. (2014). Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 22–35. <https://doi.org/10.1080/21650020.2014.893200>
- Montebeller, C., Carvalho, D., Sobrinho, T., Nunes, A., & Rubio, E. (2001). Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular simulador de chuvas pendula. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 5, 1–5.
- MOP-DGOP Dirección de Vialidad. (2021a). *Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control Manual de Carreteras (Volumen 8)*.
- MOP-DGOP Dirección de Vialidad. (2021b). *Especificaciones y Técnicas Generales de Construcción Manual de Carreteras (Volumen N° 5)*.
- Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, 73, 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>
- Obla, K. H. (2010). Pervious concrete-An overview. In *The Indian ConCreTe Journal*.

- Pablo Covarrubias, J. V, & Chile, S. (2012). Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada Design of concrete pavement with optimized slab geometry. In *Revista Ingeniería de Construcción* (Vol. 27, Issue 3). [www.ricuc.cl/Diseñodelosasdehormigóncongeometríaoptimizada/Designofconcretepavementwithoptimizedslabgeometry](http://www.ricuc.cl/Diseñodelosasdehormigóncongeometríaoptimizada/Designofconcretepavementwithoptimizedslabgeometry)
- Reyes, F., & Torres, A. (2002). *EFFECT OF PLASTIC FIBERS ON FLEXION OF DRAINABLE PAVEMENT STRUCTURES* (Vol. 17). *Revista Ingeniería de Construcción*.
- Rodriguez-Hernandez, J., Andrés-Valeri, V. C., Ascorbe-Salcedo, A., & Castro-Fresno, D. (2016). Laboratory Study on the Stormwater Retention and Runoff Attenuation Capacity of Four Permeable Pavements. *Journal of Environmental Engineering*, 142(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001033](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001033)
- Rodriguez-Hernandez, J., Castro-Fresno, D., Fernández-Barrera, A. H., & Vega-Zamanillo, Á. (2012). Characterization of Infiltration Capacity of Permeable Pavements with Porous Asphalt Surface Using Cantabrian Fixed Infiltrometer. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(5), 597–603. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000480](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000480)
- Schaefer, V. R. (2006). *Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates Final Report Technology Center • Partnership for Geotechnical Advancement • Roadway Infrastructure Management and Operations Systems • Statewide Urban Design and Specifications • Traffic Safety and Operations*. [www.ctre.iastate.edu](http://www.ctre.iastate.edu)
- Servicio de Vivienda y Urbanización. (2006). *Cartilla Pavimentos Permeables de Hormigón*.

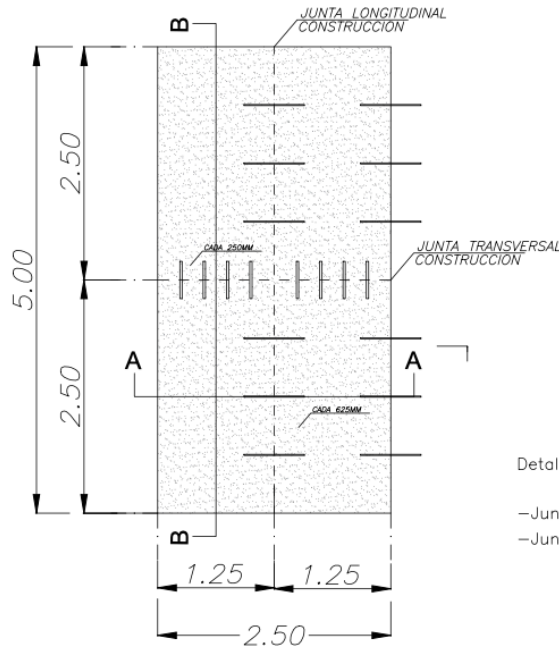
- Shu, X., Huang, B., Wu, H., Dong, Q., & Burdette, E. G. (2011). Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3187–3192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002>
- Spalvier, A., Díaz, A., Marrero, I., Baliosian, T., Piellarisi, R., & Segura, L. (2021). *Recomendaciones sobre Pavimentos de Hormigón Permeable*.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association.
- Villar, J. (2022). *Análisis del Desempeño Estructural y Constructabilidad de Pavimentos de Hormigón Permeable para su uso en Estacionamientos*.
- Wanielista, M., Chopra, M., Spence, J., & Ballock, C. (2007). *Hydraulic Performance Assessment of Pervious Concrete Pavements for Stormwater Management Credit*.

**ANEXO 2.1 : Dosificación Utilizada****Tabla A.2.1.1 Dosificación utilizada en investigación**

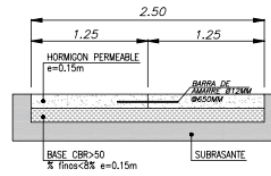
	<b>PC-39-15</b>
<b>AG [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	1345,16
<b>AF [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	201,74
<b>C [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	345,31
<b>A [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	134,67
<b>A/C</b>	0,39
<b>% AF/AG</b>	15,00
<b>AG/C</b>	3,895
<b>AF/C</b>	0,584
<b>K Nguyen</b>	1,1298

### ANEXO 3.1 Plano Estacionamiento

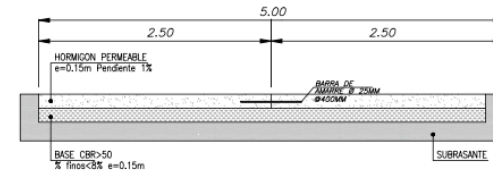
VISTA EN PLANTA ESTACIONAMIENTO



PERFIL ESTACIONAMIENTO A-A

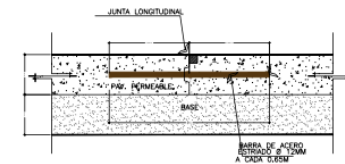


PERFIL ESTACIONAMIENTO B-B

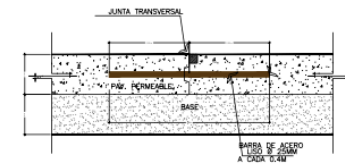


Detalle.

- Junta longitudinal barra acero estriada diámetro 12mm
- Junta transversal barra acero lisa diámetro 25mm



DETALLE JUNTA LONGITUDINAL



DETALLE JUNTA TRANSVERSAL

## ANEXO 4.1: Resultados resistencia a flexotracción

**Tabla A.4.1.1 Resultados de resistencia a flexotracción en losetas con compactación de 0,06 MPa.**

Tipo de probeta	Días	Peso (kg)	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Velocidad (MPa*s)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Prom.
PC-3R (1.1)	7	24,3	560	150	150	0,005	13,27	1,77	1,77
PC-3R (1.2)	28	24,5	560	152	152	0,005	19,31	2,47	2,32
PC-3R (2.1)	28	25	560	151	149	0,005	20,02	2,65	
PC-3R (2.2)	28	24,55	560	153	151	0,005	17,14	2,21	
PC-3R (3.1)	28	24,3	560	152	150	0,005	16,72	2,17	
PC-3R (3.2)	28	24,4	560	150	152	0,005	15,9	2,09	

**Tabla A.4.1.2 Resultados de resistencia a flexotracción en losetas con compactación de 0,13 MPa.**

Tipo de probeta	Días	Peso (kg)	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Velocidad (MPa*s)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Promedio
PC-4R (2.1)	7	24	560	152	150	0,005	13,73	1,78	1,78
PC-4R (1.1)	28	24,85	560	159	155	0,005	19,09	2,19	2,20
PC-4R (1.2)	28	23,65	560	149	150	0,005	16,19	2,19	
PC-4R (2.2)	28	24,5	560	150	150	0,005	18,23	2,43	
PC-4R (3.1)	28	24,2	560	150	152	0,005	15,98	2,1	
PC-4R (3.2)	28	24,3	560	142	154	0,005	17,09	2,11	

## ANEXO 4.2 Resultados Permeabilidad (NCAT)

**Tabla A.4.2.1 Resultados permeabilidad en losetas**

Dosificación	Tiempo (s)	h1	h2	Espesor loseta (cm)	k (cm/s)	Promedio
PC-3R	0,980	3,000	2,000	15	6,206	5,724
	1,010	3,000	2,000	15	6,022	
	1,230	3,000	2,000	15	4,945	
PC-4R	3,830	6,000	3,000	15	2,715	2,806
	3,350	6,000	3,000	15	3,104	
	4,000	6,000	3,000	15	2,599	

**Tabla A.4.2.2 Resultados permeabilidad en estructura de pavimento**

Dosificación	Tiempo (s)	h1	h2	Espesor loseta (cm)	k (cm/s)	Promedio
PC-4R-5,1%	1,750	6,000	4,000	15	3,475	2,849
	2,280	6,000	4,000	15	2,668	
	2,530	6,000	4,000	15	2,404	
PC-4R-7,6%	3,030	4,000	2,000	15	3,431	3,322
	3,280	4,000	2,000	15	3,170	
	3,090	4,000	2,000	15	3,365	
PC-3R-7,6%	2,040	5,000	2,000	15	6,737	6,624
	2,030	5,000	2,000	15	6,771	
	2,160	5,000	2,000	15	6,363	
PC-3R-5,1%	1,180	4,000	2,000	15	8,811	7,943
	1,360	4,000	2,000	15	7,645	
	1,410	4,000	2,000	15	7,374	

Tabla A.4.2.3 Resultados permeabilidad en estacionamiento

<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>Espesor pav (cm)</b>	<b>k (cm/s)</b>	<b>Promedio</b>
<b>A4-4R (1)</b>	2,010	6,000	3,000	15	5,173	6,016
	1,350	6,000	3,000	15	7,702	
	2,010	6,000	3,000	15	5,173	
<b>A4-4R (2)</b>	1,300	6,000	3,000	15	7,998	7,528
	1,160	5,000	3,000	15	6,606	
	0,960	5,000	3,000	15	7,982	
<b>A4-4R (3)</b>	0,780	4,000	3,000	15	5,532	6,557
	0,510	4,000	3,000	15	8,461	
	0,760	4,000	3,000	15	5,678	
<b>A3-5R (1)</b>	0,700	4,000	3,000	15	6,165	7,233
	0,510	4,000	3,000	15	8,461	
	0,610	4,000	3,000	15	7,074	
<b>A3-5R (2)</b>	4,680	5,000	3,000	15	1,637	1,558
	5,010	5,000	3,000	15	1,529	
	5,080	5,000	3,000	15	1,508	
<b>A3-5R (3)</b>	1,500	5,000	3,000	15	5,108	6,085
	1,310	5,000	3,000	15	5,849	
	1,050	5,000	3,000	15	7,298	

**ANEXO 4.3: Resultados Infiltración (ASTM C1701)****Tabla A.4.3.1 Resultados infiltración en losetas**

Compactación	Tiempo (s)	I (mm/h)	I (cm/s)	Promedio
0,06 MPa	92,37	10.334	0,287	0,250
	112,52	8.483	0,236	
	117,19	8.145	0,226	
0,13 MPa	208,38	4.581	0,127	0,118
	234,08	4.078	0,113	
	233,75	4.084	0,113	

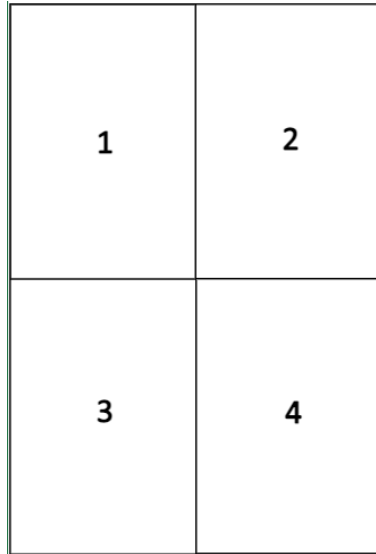
**Tabla A.4.3.2 Resultados infiltración en losetas con %fino en base**

Compactación y fino	Tiempo (s)	I (mm/h)	I (cm/s)	Promedio
0,06 MPa - 5,1%	42	4.545	0,126261	0,133
	40,95	4.662	0,129498	
	36,78	5.190	0,144181	
0,06 MPa - 7,6%	36,08	5.291	0,147	0,143
	37,46	5.096	0,142	
	37,72	5.061	0,141	
0,13 MPa - 5,1%	69,2	2.759	0,077	0,072
	77,95	2.449	0,068	
	73,65	2.592	0,072	
0,13 MPa - 7,6%	72,9	2.619	0,073	0,070
	77,08	2.477	0,069	
	77,96	2.449	0,068	

Tabla A.4.3.3 Resultados infiltración en estacionamientos

Compactación	Tiempo (s)	I (mm/h)	I (cm/s)	Promedio (cm/s)
0,06 MPa (1)	47,01	20304,88608	0,564	0,607
	42,35	22539,14273	0,626	
	42,05	22699,94518	0,631	
0,06 MPa (2)	65,33	14610,93976	0,406	0,373
	72	13257,39854	0,368	
	76,62	12458,00959	0,346	
0,06 MPa (3)	73,7	12951,59694	0,360	0,324
	85,44	11171,96506	0,310	
	88,07	10838,34103	0,301	
0,13 MPa (1)	53,22	17935,60118	0,498	0,527
	49,48	19291,28324	0,536	
	48,36	19738,06234	0,548	
0,13 MPa (2)	55,37	3.448	0,096	0,089
	58,73	3.251	0,090	
	65,25	2.926	0,081	
0,13 MPa (3)	59,63	16.008	0,445	0,453
	57,3	16658,51125	0,463	
	58,69	16263,97503	0,452	

## ANEXO 4.4: Resultados Método Large Scale



**Figura A4.4.1 Numeración de área de estacionamiento**

**Tabla A.4.4.1 Resultados mediciones manuales en dos puntos**

Compactación	Área	P1	P2	Promedio
0,06 MPa	1	0,351	0,322	0,336
	2	0,097	0,078	0,087
0,13 MPa	3	0,351	0,274	0,312
	4	0,044	0,039	0,041

**Tabla A.4.4.2 Resultados mediciones con cámara en dos puntos**

Compactación	Área	P1	P2	Promedio
0,06 MPa	1	0,243	0,230	0,236
	2	0,088	0,052	0,070
0,13 MPa	3	0,237	0,230	0,234
	4	0,047	0,027	0,037

Tabla A.4.4.3 Resultados mediciones con marcador de nivel en dos puntos

Área	Num.	Pn1	Pn2	Prom. Pn1	Prom. Pn 2	Prom. Pn1+Pn2
0,06 MPa	1	0,2555607	0,176349062	0,3086268	0,1667567	0,238
		0,3324868	0,197349643			
		0,3378328	0,126571526			
	2	0,121672522	0,075441683	0,1150178	0,0714648	0,093
		0,116117328	0,07890935			
		0,107263572	0,060043379			
0,13 MPa	3	0,3128003	0,28231198	0,2789363	0,187335713	0,233
		0,2374528	0,139105591			
		0,2865557	0,140589569			
	4	0,02981929	0,007243547	0,0285642	0,020429977	0,024
		0,023967805	0,026243678			
		0,031905642	0,027802706			

**ANEXO 4.5 Calibración simulador de lluvia****Tabla A.4.5.1 Calibración 1 simulador de lluvia**

Peso vaso (kg)	Peso total (kg)	Peso agua (kg)	Cantidad (L)	Área recipiente	mm	Duración (h)	Intensidad (L/hr)	prom-xi
0,006	0,12	0,114	0,114	0,004	29,622	0,166	0,684	0,048
0,006	0,126	0,12	0,12	0,004	31,181	0,166	0,72	0,012
0,006	0,112	0,106	0,106	0,004	27,543	0,166	0,636	0,096
0,006	0,138	0,132	0,132	0,004	34,299	0,166	0,792	0,06
0,006	0,144	0,138	0,138	0,004	35,858	0,166	0,828	0,096
Promedio							0,732	0,312
							UC	91,5%

**Tabla A.4.5.2 Calibración 2 simulador de lluvia**

Peso vaso (kg)	Peso total (kg)	Peso agua (kg)	Cantidad (L)	Área recipiente	mm	Duración (h)	Intensidad (L/hr)	prom-xi
0,006	0,138	0,132	0,132	0,004	34,300	0,167	0,792	0,0552
0,006	0,106	0,1	0,1	0,004	25,984	0,167	0,6	0,1368
0,006	0,106	0,1	0,1	0,004	25,984	0,167	0,6	0,1368
0,006	0,142	0,136	0,136	0,004	35,339	0,167	0,816	0,0792
0,006	0,152	0,146	0,146	0,004	37,937	0,167	0,876	0,1392
Promedio							0,737	0,5472
							UC	85,1%

Tabla A.4.5.3 Calibración 3 simulador de lluvia

Peso vaso (kg)	Peso total (kg)	Peso agua (kg)	Cantidad (L)	Área recipiente	mm	Duración (h)	Intensidad (L/hr)	prom-xi	
0,006	0,134	0,128	0,128	0,004	33,260	0,166	0,768	0,0744	
0,006	0,13	0,124	0,124	0,004	32,220	0,166	0,744	0,0984	
0,006	0,158	0,152	0,152	0,004	39,496	0,166	0,912	0,0696	
0,006	0,142	0,136	0,136	0,004	35,338	0,166	0,816	0,0264	
0,006	0,168	0,162	0,162	0,004	42,094	0,166	0,972	0,1296	
							Promedio	0,8424	0,3984
								UC	90,5%

## ANEXO 4.6 Resultados porosidad en estacionamiento

Tabla A.4.6.1 Resultados porosidad en estacionamiento

Tipo de compactación	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Densidad	Porosidad
0,06 MPa	56	124	579,8	349	1898	24,2
0,13 MPa	56	109	552,8	320,5	2059	13,2