



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN
PERMEABLE PARA SU USO EN CICLOVÍAS**

POR

Rocío Belén Urrutia Saavedra

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Oscar Link

Profesional Supervisor
Alejandra Stehr

Enero 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Rocío Urrutia Saavedra

© 2024 Rocío Urrutia Saavedra

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

RESUMEN

El constante crecimiento de la población y la urbanización ha impulsado el desarrollo significativo de la infraestructura vial, resultando en una creciente impermeabilización del suelo mediante la construcción de pavimentos impermeables. Con el aumento de la urbanización, ha surgido una notable expansión en la construcción de ciclovías en países como Chile. Una forma estudiada de enfrentar este problema es a través de pavimentos permeables, los que permiten que el agua pase fácilmente por su estructura. A pesar de ser una solución viable, esta no es frecuentemente utilizada debido a que existe poca información y escaso respaldo técnico asociado al diseño estructural, resistencias de las mezclas, propiedades hidráulicas y metodologías constructivas, que permitan utilizarlos para aplicaciones tales como estacionamientos, aceras, ciclovía, caminos de bajo tránsito, entre otras.

El objetivo de esta investigación es analizar el desempeño estructural e hidráulico de pavimentos de hormigón permeable para su uso en ciclovías. Para ello, se definieron las características de las mezclas y procedimientos para realizar un análisis estructural sobre la base de una revisión bibliográfica. Se llevó a cabo un diseño estructural mediante el *software* EverFE 2.24, que permitió obtener los esfuerzos críticos en la losa de hormigón permeable bajo diversas condiciones de carga, con estos esfuerzos se realizó un análisis de fatiga del material. Para caracterizar las propiedades hidráulicas se construyó una sección experimental donde se realizaron mediciones de permeabilidad.

Los resultados evidencian que, variando las dimensiones longitudinales de las ciclovías, un aumento en el espesor de la losa conlleva a una reducción en los esfuerzos a la flexotracción. Además, se observa que las losas de menor longitud presentan una disminución más notable de los esfuerzos en comparación con las losas de mayores dimensiones. Al incorporar el diferencial de temperatura en el análisis de fatiga, se constata que el número de ciclos de carga admisibles disminuye proporcionalmente al aumento de dicho diferencial. Asimismo, se aprecia que esta reducción se ve afectada por la disminución del espesor del pavimento, lo que conlleva a una disminución en la vida útil del pavimento.

En relación a la permeabilidad del pavimento, se evidencia una variación sustancial de los resultados dependiendo del punto de medición. De manera análoga, se resalta la disparidad entre dos métodos

de medición: NCAT y ASTM C1702, constatando que el método ASTM C1701 no satisface los requisitos mínimos de permeabilidad.

ABSTRACT

The constant growth of the population and urbanization has driven significant development in road infrastructure, resulting in an increasing soil impermeability through the construction of impermeable pavements. With the rise of urbanization, there has been a notable expansion in the construction of bike lanes in countries such as Chile. A studied approach to addressing this issue is through permeable pavements, which allow water to easily pass through their structure. Despite being a viable solution, it is not frequently used due to limited information and scarce technical support associated with structural design, mix resistances, hydraulic properties, and construction methodologies that enable their use for applications such as parking lots, sidewalks, bike lanes, low-traffic roads, among others.

The objective of this research is to analyze the structural and hydraulic performance of permeable concrete pavements for use in bike lanes. To achieve this, the characteristics of the mixes and procedures were defined to conduct a structural analysis based on a literature review. Structural design was carried out using EverFE 2.24 software, which allowed obtaining critical stresses in the permeable concrete slab under various loading conditions. With these stresses, a material fatigue analysis was performed. To characterize hydraulic properties, an experimental section was constructed where permeability measurements were taken.

The results show that varying the longitudinal dimensions of bike lanes, an increase in the thickness of the slab leads to a reduction in flexural stresses. Additionally, it is observed that shorter slabs exhibit a more noticeable decrease in stresses compared to larger slabs. By incorporating the temperature differential in the fatigue analysis, it is confirmed that the number of permissible load cycles decreases proportionally to the increase in this differential. Furthermore, it is noted that this reduction is affected by the decrease in pavement thickness, resulting in a decrease in pavement lifespan.

Regarding pavement permeability, there is substantial variation in results depending on the measurement point. Similarly, the disparity between two measurement methods, NCAT and ASTM C1702, is highlighted, confirming that the ASTM C1701 method does not meet the minimum permeability requirements.

DEDICATORIA

A mis padres, Adela y Enrique, quienes siempre me brindaron su apoyo y confiaron en mí. A mi familia, cuya presencia constante y apoyo incondicional fueron un pilar fundamental en los momentos en que los necesitaba. A mis amigos, quienes fueron compañeros valiosos a lo largo de mi trayectoria universitaria, desempeñando un papel esencial durante este significativo periodo y finalmente, a aquellos que compartieron experiencias, risas y momentos inolvidables.

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 a los profesores Oscar Link, Mauricio Pradena y profesor comisión por su apoyo, dedicación y disposición siempre a lo largo de toda la investigación.

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

1 ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología de trabajo.....	2
1.5 Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6 Organización de documento	4
CAPITULO 2 CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PERMEABLE	5
2.1 Introducción Pavimentos de hormigón permeable	5
2.2 Caracterización del hormigón permeable	5
2.2.1 Áridos	6
2.2.2 Resistencia en pavimentos de hormigón permeable	7
2.2.3 Módulo de elasticidad	9
2.3 Diseño estructural para pavimentos de hormigón permeable.....	10
2.3.1 Análisis mecanicista para pavimentos de hormigón permeable.....	10
2.3.2 Análisis de fatiga en pavimentos de hormigón permeable.....	11
2.4 Permeabilidad y porosidad de hormigones permeables	12
2.5 Conclusiones.....	12
CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS.....	14
3.1 Introducción.....	14
3.2 Modelación de diseño estructural de pavimentos de hormigón permeable para ciclovías..	14
3.2.1 Geometría.....	14
3.2.2 Propiedades del material para la modelación.....	15

3.2.3	Cargas	16
3.2.3.1	Cargas de tránsito	16
3.2.3.2	Cargas ambientales.....	18
3.2.4	Posición de la carga	19
3.2.5	Análisis de fatiga.....	20
3.3	Construcción sección de prueba	22
3.3.1	Materiales.....	22
3.3.2	Sección de prueba de ciclovía.....	23
3.4	Ensayos.....	25
3.4.1	Extracción de testigos	25
3.4.2	Ensayo de densidad y porosidad a testigos	25
3.4.3	Permeabilidad	27
3.4.4	Tasa de infiltración	28
3.5	Conclusión	30
CAPITULO 4 RESULTADOS		31
4.1	Introducción.....	31
4.2	Análisis estructural de ciclovías	31
4.3	Análisis de fatiga en losas de hormigón permeable para su uso en ciclovías	35
4.4	Ensayos.....	37
4.4.1	Ensayos densidad y porosidad	37
4.4.2	Ensayos de permeabilidad y tasa de infiltración.....	38
4.6	Conclusión	40
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.....		41
REFERENCIAS		43
4.1	ANEXO ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CICLOVÍAS.....	47
4.2	ANEXO ANÁLISIS DE FATIGA DE CICLOVÍAS	50

Índice de tablas

Tabla 2.1. Componentes típicos del hormigón permeable y sus proporciones, con propiedades mecánicas y físicas básicas del hormigón permeable.	6
Tabla 2.2. Resistencia mínima a flexotracción de acuerdo con la aplicación.....	9
Tabla 3.1. Ancho recomendado en Ciclovías según MINVU.....	14
Tabla 3.2. Propiedades de hormigón permeable	16
Tabla 3.3. Geometría de la carga de un eje de una bicicleta.....	17
Tabla 3.4. Medidas vehículo liviano	17
Tabla 3.5. Dimensiones del eje vehículo liviano	18
Tabla 3.6. TELTD utilizado en la modelación.....	19
Tabla 3.7. Propiedades físicas del árido grueso	22
Tabla 3.8. Propiedades físicas del árido fino	22
Tabla 3.9. Dosificación de hormigón permeable utilizada, obtenida por Oviedo (2022).....	23
Tabla 4.1. Esfuerzos críticos de flexotracción para una longitud de losa de 10 metros	32
Tabla 4.2. Esfuerzos críticos de flexotracción para una longitud de losa de 4 metros	33
Tabla 4.3. Número de repeticiones de carga permitido para una longitud de losa de 10 metros.....	35
Tabla 4.4. Número de repeticiones de carga permitido para una longitud de losa de 4 metros.....	36
Tabla 4.5 Densidad y porosidad de testigos extraídos	37
Tabla 4.6 Permeabilidad e infiltración de los puntos de medición en sección de prueba.	39
Tabla A.4.1. Resultados de esfuerzos críticos de modelación en EverFE para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 10 metros	47
Tabla A.4.2. Resultados de esfuerzos críticos modelación en EverFE para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 4 metros	48
Tabla A.4.3. Resultados de análisis de fatiga mediante modelo ACPA para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 10 metros	50
Tabla A.4.4. Resultados de análisis de fatiga mediante modelo ACPA para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 4 metros	51

Índice de figuras

Figura 2.1. Influencia del tamaño del agregado en la resistencia a la compresión del hormigón permeable con un 20% de porosidad. Fuente:(Yu et al., 2019)	7
Figura 2.2. Resistencia a la compresión (dividida por 10) y resistencia a la tracción en flexión en función de la variación del índice de vacíos	8
Figura 3.1. Geometría de la losa (en mm).....	15
Figura 3.2. Esquema de vehículo liviano	17
Figura 3.3. Representación eje vehículo liviano.	18
Figura 3.4. Casos a analizar en el software EverFE.....	20
Figura 3.5. Plano de la sección de prueba (en mm)	24
Figura 3.6. Sección de pavimento realizado. (a) Colocación de base y moldaje y (b) losa compactada y enrasada.....	24
Figura 3.7. a) Extracción de testigos, b) Testigos obtenidos de sección de prueba	25
Figura 3.8. Probeta sumergida.....	26
Figura 3.9. Medición de permeabilidad mediante el permeámetro NCAT	28
Figura 3.10. Puntos de medición en la sección de prueba.....	29
Figura 3.11. Medición de tasa de infiltración en sección de prueba	30
Figura 4.1. Variación en el esfuerzo máximo según el espesor en una losa de 10 metros de longitud	31
Figura 4.2 Variación en el esfuerzo máximo según el espesor en una losa de 4 metros de longitud	32
Figura 4.3 Variación de relación de esfuerzos al considerar diferenciales de temperatura para losa de 10 metros de longitud.....	34
Figura 4.4. Variación de relación de esfuerzos al considerar diferenciales de temperatura para losa de 4 metros de longitud.....	34
Figura 4.5. Variación del número de aplicaciones de carga (en escala logarítmica) para distintos espesores de losa al considerar diferenciales de temperatura	36
Figura 4.6 Propiedades hidráulicas del tramo de pavimento, permeabilidad con NCAT	38
Figura 4.7 Propiedades hidráulicas de sección de prueba, tasa de infiltración	39

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El continuo crecimiento de la población y la urbanización ha estado llevando a un alto desarrollo de la infraestructura y las redes de carreteras, y consecuentemente, a una impermeabilización progresiva del suelo debido a la construcción de pavimentos impermeables (Nguyen et al., 2014). Esta naturaleza impermeable de los pavimentos convencionales resulta en inundaciones aguas abajo, inundaciones repentinas injustificadas y erosión de las orillas, lo que causa la deterioración estructural y reduce la eficacia de los pavimentos (Joshaghani et al., 2015). Varios contaminantes, como sedimentos, nutrientes y metales pesados, son transportados por el flujo de agua de escorrentía de áreas de superficie impermeable que se mezclan directamente con el agua superficial (Bean et al., 2007).

Con el aumento de la urbanización, también ha crecido la construcción de ciclovías. En Chile, por ejemplo, se ha observado un incremento significativo en la construcción de esta infraestructura. En el año 2018, se contabilizaron 1,343 kilómetros de ciclovías, y para el año 2023, esta cifra se ha elevado a 2,072 kilómetros, con la expectativa de un crecimiento continuo (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2023). Sin embargo, la construcción de esta infraestructura plantea desafíos considerables, especialmente en lo que respecta a la resistencia estructural y la necesidad de un adecuado drenaje. En este contexto, la utilización del hormigón permeable emerge como una solución potencial para abordar estos desafíos y mejorar la calidad de las ciclovías.

A pesar de que el hormigón permeable se presenta como una solución a esta problemática, su utilización se encuentra limitada debido a la falta de información suficiente y a la ausencia de respaldo técnico para determinar las exigencias de resistencia asociadas a sus diversas aplicaciones en pavimentos, aún no se ha evaluado de manera exhaustiva su comportamiento estructural y su capacidad hidráulica en este contexto particular.

En Chile, no se dispone de un diseño estructural específico para las ciclovías. De acuerdo con las especificaciones del SERVIU (2018) si una ciclovía se encuentra en la calzada, se debe mantener el mismo paquete estructural que se utiliza en esta.

Hasta la fecha, se han realizado extensas investigaciones sobre el uso del hormigón permeable en diversas aplicaciones, pero la evaluación específica de su desempeño en ciclovías es un campo que demanda mayor atención. Los estudios previos se han centrado principalmente en carreteras y áreas de estacionamiento. En Brasil, por ejemplo, se han establecido resistencias de las mezclas y se han abordado aspectos de la constructibilidad en el caso de ciclovías (Balbo, 2020).

Esta falta de evaluación genera incertidumbre sobre su aplicabilidad y eficacia en la construcción de ciclovías resistentes y duraderas. Por tanto, se requiere una investigación específica en esta área para mejorar la infraestructura de las ciclovías y demostrar la viabilidad del hormigón permeable en esta aplicación.

1.2 Objetivo general

Analizar el desempeño estructural e hidráulico de pavimentos de hormigón permeable para ciclovías.

1.3 Objetivos específicos

1. Analizar estructuralmente ciclovías bajo diferentes escenarios de carga.
2. Comparar la influencia del diferencial de temperatura en el número de aplicaciones de carga permitidas.
3. Evaluar experimentalmente propiedades hidráulicas del hormigón permeable en sección de prueba de ciclovía.

1.4 Metodología de trabajo

Con el objetivo de recabar la información esencial para analizar la viabilidad de implementar pavimentos de hormigón permeable en ciclovías, este estudio se divide en tres etapas fundamentales que se describen a continuación:

En la primera etapa, se lleva a cabo el análisis estructural del pavimento de hormigón permeable. Para llevar a cabo este proceso, se emplea el *software* EverFE 2.24 de elementos finitos donde se obtienen los esfuerzos críticos en la losa bajo distintos escenarios de carga, teniendo en cuenta diversas condiciones térmicas.

En la segunda etapa, se realiza un análisis de fatiga utilizando el modelo comúnmente adoptado por la American Concrete Pavement Association (ACPA). Este análisis se basa en los esfuerzos críticos obtenidos para cada escenario de carga, con el objetivo de establecer el espesor mínimo recomendado para asegurar un rendimiento adecuado del hormigón permeable en aplicaciones de ciclovías.

Finalmente, en la tercera etapa se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad y se realizó la extracción de testigos del pavimento con el propósito de medir la densidad y porosidad del hormigón permeable. Esta fase completa la evaluación de propiedades del pavimento y proporciona una visión integral de su comportamiento y características específicas para su uso en ciclovías.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se destaca la influencia significativa del espesor de la losa en los esfuerzos críticos, evidenciando una clara disminución al incrementar dicho espesor, especialmente en los tramos de 4 metros. La evaluación de la fatiga estructural revela una mayor susceptibilidad de las losas más largas a condiciones climáticas adversas, señalando la necesidad de consideraciones específicas en el diseño para enfrentar la fatiga bajo grandes diferenciales de temperatura.

En el análisis de fatiga, se concluye que el número de repeticiones de carga permitido (N_f) aumenta con el espesor de la losa, sugiriendo mayor resistencia a la fatiga en losas más gruesas. Sin embargo, se observa una disminución en la resistencia a la fatiga con mayores diferenciales de temperatura, impactando particularmente a las losas más largas. La longitud de la losa emerge como un factor crucial, indicando que las losas más cortas poseen una capacidad inherente para resistir un mayor número de ciclos de carga repetitiva antes de experimentar fatiga estructural.

Los resultados de los ensayos de permeabilidad muestran que la diferencia entre puntos de medición es considerable con un coeficiente de variación de 0,66 y 0,50 para el ensayo NCAT y ASTM C1701 respectivamente. Además, la permeabilidad medida con el método ASTM C1701 no está dentro de los rangos entregados por la ACI Committee 522 (2010), donde el valor mínimo corresponde a 0,14 cm/s.

1.6 Organización de documento

Este documento se estructura en cinco capítulos, en el primero se realiza la introducción. El segundo capítulo se centra principalmente en la revisión bibliográfica, abarcando el estado actual del conocimiento sobre el hormigón permeable, la caracterización del material, el diseño estructural, la resistencia, la porosidad y la permeabilidad. En el tercer capítulo, se detalla la metodología de trabajo, que incluye la descripción de la modelación en el *software* EverFE, las variables utilizadas, el análisis de fatiga y los procedimientos de los ensayos de permeabilidad. El cuarto capítulo presenta los resultados de la investigación, destacando especialmente la determinación de los esfuerzos críticos en la losa, el número de aplicaciones de carga permitido en ciclovías, los ensayos realizados en el tramo de prueba y el análisis correspondiente de estos resultados. Por último, el quinto capítulo concluye con las principales observaciones y conclusiones derivadas de la investigación.

CAPITULO 2 CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO ESTUCTURAL DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PERMEABLE

2.1 Introducción Pavimentos de hormigón permeable

La urbanización continua y el crecimiento de la población promueven aún más el aumento de las áreas urbanas impermeables, lo que conlleva impactos ambientales y sociales adversos preocupantes. El hormigón permeable tiene un potencial notable para contrarrestar estos impactos adversos al mismo tiempo que proporciona la integridad estructural necesaria, respaldando así la urbanización continua. El hormigón permeable, es un medio poroso que consiste principalmente en agregados de granulometría abierta unidos por una matriz a base de cemento. Los poros conectados, que típicamente se encuentran en un rango de 15% a 30% por volumen, "permiten que el aire y los fluidos pasen fácilmente desde la superficie hasta las capas subyacentes" (Zhong & Wille, 2015).

Debido a sus estructuras de poros abiertos, los pavimentos permeables permiten que las aguas pluviales se infiltren en una cuenca de almacenamiento subterránea o se filtren al suelo y recarguen rápidamente el agua subterránea y también eliminan potencialmente los contaminantes y, por lo tanto, estos tipos de pavimentos se utilizan cada vez más como un material ecológico para pavimentos en zonas urbanas (Chandrappa & Biligiri, 2016).

En la actualidad, el hormigón permeable se utiliza principalmente en sistemas de pavimentos permeables, como carreteras, aceras, entradas de vehículos, estacionamientos y otras aplicaciones de trabajos ligeros en superficie plana.

2.2 Caracterización del hormigón permeable

En el hormigón permeable, se utilizan cuidadosamente cantidades controladas de agua y materiales cementantes para crear una pasta que forma un revestimiento espeso alrededor de las partículas de agregado. Una mezcla de hormigón permeable contiene muy poco árido fino, lo que crea un contenido sustancial de poros. Utilizar suficiente pasta para recubrir y unir las partículas de agregado crea un

sistema de poros altamente permeables e interconectados que drena rápidamente (Tennis et al., 2004a).

Las proporciones de los materiales pueden variar según los recursos disponibles en el lugar de uso, por lo que es fundamental llevar a cabo experimentos y procedimientos de dosificación en laboratorio para determinar las proporciones adecuadas (dosificación óptima). En la Tabla 2.1 se presentan los rangos habituales de consumo y las proporciones de materiales utilizados en las mezclas de concreto permeable.

Tabla 2.1. Componentes típicos del hormigón permeable y sus proporciones, con propiedades mecánicas y físicas básicas del hormigón permeable.

Materiales	Rango típico
Contenido de cemento (kg/m ³)	280-310
Contenido de árido grueso (kg/ m ³)	1440-1800
Contenido de árido fino (kg/ m ³)	85-205
Relación Agua-Cemento (W/C)	0,26-0,45
Relación Árido - Cemento (A/C)	4:1-4,5:1
Tamaño de árido grueso (mm)	2,38-19
Porosidad (%)	15-35
Resistencia a la compresión (MPa)	2.8-28
Permeabilidad	0,14-1,22

Fuente: (ACI Committee 522, 2010)

2.2.1 Áridos

El aspecto principal que crea una diferencia entre un pavimento normal y un pavimento permeable es el tamaño, la graduación y la cantidad de agregados. El requisito principal del hormigón permeable es tener huecos sustanciales para permitir el paso del agua a través de sus poros y, para garantizar un vacío suficiente, la Asociación Estadounidense de Hormigón utiliza agregados de gran tamaño que van desde 19 hasta 9.5 mm (ACI Committee 522, 2010).

Según el estudio realizado por Kevern et al. (2009) se determinó que el tamaño del agregado, los tipos de agregado, sus formas y distribuciones también tienen una gran influencia en la resistencia mecánica, las características de permeabilidad y la durabilidad a largo plazo del pavimento de hormigón permeable. La irregularidad en la forma del agregado influye en la disposición de las partículas o el modo de empaque, controlando en consecuencia el contenido de vacíos de la mezcla.

En un estudio realizado por Yu et al. (2019) se identificó el impacto significativo del tamaño de los agregados en la resistencia a la compresión del hormigón permeable. En este estudio, se confeccionaron ocho conjuntos de muestras de hormigón permeable, manteniendo una porosidad casi constante, pero variando los tamaños de los agregados utilizados. Los resultados de las pruebas mostraron que la resistencia a la compresión aumenta rápidamente con el aumento del tamaño del agregado al principio, pero una vez que el tamaño del agregado supera los 7 mm, el efecto del tamaño del agregado en la resistencia a la compresión no es tan evidente, como se ilustra en la Figura 2.1

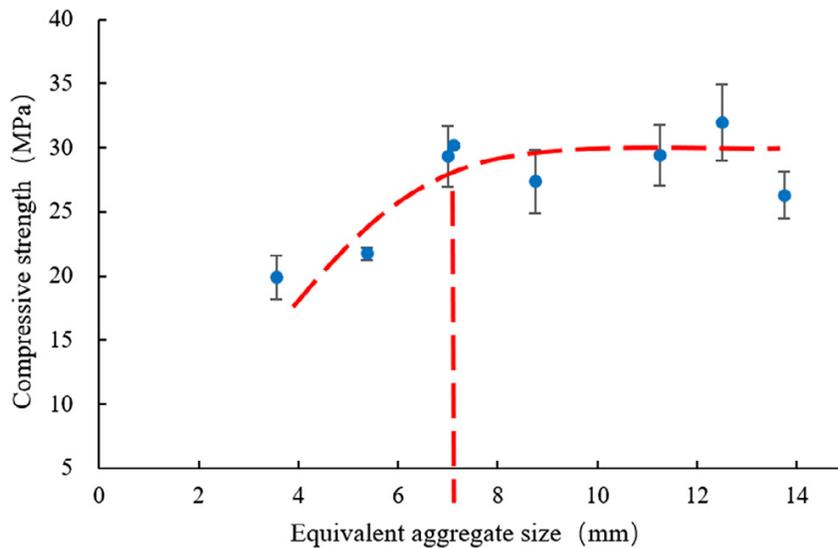


Figura 2.1. Influencia del tamaño del agregado en la resistencia a la compresión del hormigón permeable con un 20% de porosidad. Fuente:(Yu et al., 2019)

2.2.2 Resistencia en pavimentos de hormigón permeable

Debido al alto contenido de vacíos, la resistencia del pavimento de hormigón permeable suele ser considerablemente inferior a la de los pavimentos convencionales. Como señala Tennis et al. (2004a),

la resistencia a la compresión del concreto permeable generalmente varía en un rango que va desde 3,4 hasta 27,5 MPa, mientras que la resistencia a la tracción se encuentra en un intervalo que oscila entre 1,0 y 3,4 MPa.

En general, las propiedades mecánicas del concreto permeable están altamente influenciadas por su porosidad (ACI Committee 522, 2010). En el estudio realizado por Delatte et al. (2009), se determinó que tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la tracción en flexión están inversamente relacionadas con el índice de vacíos presente. En otras palabras, a medida que aumenta el índice de vacíos, disminuye la resistencia mecánica, como se ilustra en la Figura 2.2.

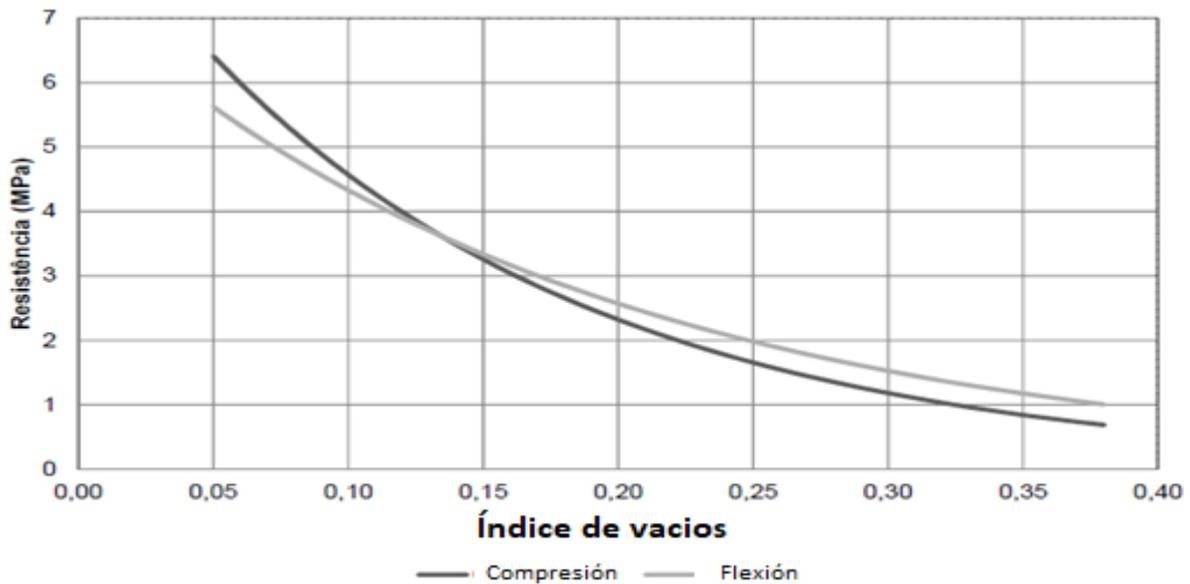


Figura 2.2. Resistencia a la compresión (dividida por 10) y resistencia a la tracción en flexión en función de la variación del índice de vacíos
Fuente: Adaptado de Delatte et al. (2009).

Actualmente en Chile, se tienen requisitos de resistencias en el hormigón permeable establecidas por el SERVIU de forma general, sin establecer el proyecto y la aplicación en la cual será utilizado, considerando vías expresas, colectoras, troncales, locales y pasajes.

En la Tabla 2.2 se aprecia una notable variabilidad en la resistencia a la flexotracción entre el hormigón permeable destinado a una ciclovía y aquel diseñado para un estacionamiento, en comparación con la resistencia establecida para aplicaciones generales. Los valores arrojan diferencias significativas,

alcanzando un 35 % y 45 % respectivamente. Estos hallazgos sugieren que la resistencia debería ser un criterio diferenciado en función del propósito de uso de dicho material.

Tabla 2.2. Resistencia mínima a flexotracción de acuerdo con la aplicación

Referencia	Aplicación	Resistencia a la Flexión
SERVIU (2005)	General	2,750 MPa
Batezini (2013)	Estacionamiento	1,250 MPa
Balbo (2020)	Ciclovía	0,975 MPa

2.2.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón permeable es un parámetro fundamental para el dimensionamiento estructural de las capas de revestimiento. Por tal razón debe ser correctamente determinado como uno de los objetivos de la dosificación.

En un estudio realizado por Goede (2009), se determinó el módulo de elasticidad estático y el coeficiente de Poisson en ensayos de compresión en muestras cilíndricas de concreto permeable fabricadas con agregado de diámetro único de 12,5 mm y una relación agua/cemento que variaba entre 0,27 y 0,28. Los resultados obtenidos mostraron valores del módulo de elasticidad que oscilaban entre 12,100 MPa y 15,100 MPa, los cuales son inferiores a los valores comúnmente encontrados en el concreto convencional. Esta observación era esperada debido a la notable diferencia en el contenido de vacíos entre estos dos materiales, ya que la cantidad de vacíos influye directamente en el módulo de elasticidad.

Se han encontrado relaciones establecidas anteriormente con base en estudios de laboratorio, como la propuesta por Goede (2009), la cual es mostrada en la ecuación (2.1).

$$E = 39,1 \cdot \rho_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \tag{2.1}$$

Donde:

ρ_c : Masa específica del hormigón permeable

f_c : Resistencia a la compresión

En cuanto al coeficiente de Poisson, el autor determinó valores que variaban de 0,14 a 0,34, con un valor promedio de 0,22.

2.3 Diseño estructural para pavimentos de hormigón permeable

2.3.1 Análisis mecanicista para pavimentos de hormigón permeable

El diseño de pavimentos de hormigón permeables 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. En general, el diseño estructural del pavimento se realiza para determinar el espesor de las capas de agregado que son necesarias para soportar las cargas de tráfico de diseño y al mismo tiempo proteger la subrasante de deformaciones permanentes (Weiss et al., 2019).

Numerosos investigadores han empleado una variedad de modelizaciones para el análisis estructural de pavimentos convencionales, tanto rígidos como flexibles, con el propósito de utilizar estos modelos en la predicción del rendimiento de los pavimentos para su diseño y dimensionamiento. Existen varios programas de *software* especializados para el análisis estructural de pavimentos rígidos y flexibles, que normalmente utilizan modelos constitutivos simplificados, pero ampliamente aceptados en la práctica para el diseño y dimensionamiento de estructuras. Ejemplos de estos programas incluyen el EverFE (Davids et al., 2003) e ISLAB (Khazanovich et al., 2000), ambos utilizando el método de los elementos finitos.

En lo que respecta a pavimentos permeables, la búsqueda de modelos para el análisis estructural aún es un campo relativamente reciente, y pocos autores han presentado estudios a este nivel. Sin embargo, considerando los valores de módulo de elasticidad observado en la investigación de Suleiman et al. (2012), se puede especular que el comportamiento de los pavimentos con losas de hormigón

permeable de Cemento Portland (CPCP) sea similar al atribuido a pavimentos rígidos, que normalmente se aborda en función de la teoría de placas de Westergaard (J. Balbo, 2009).

En su estudio, Batezini (2012) llevó a cabo análisis mecanicistas de pavimentos de concreto permeable utilizando el método de elementos finitos a través del *software* EverFE. El análisis consideró la aplicación de cargas de un eje simple de ruedas dobles de 80 kN, correspondiente al tráfico de vehículos comerciales, y un eje simple de rueda simple de 22 kN, simulando la circulación de vehículos ligeros, como una camioneta comercial. Los resultados indicaron que, la losa de hormigón permeable requeriría un espesor mayor a 40 cm, considerando la carga estándar de 80 kN, lo que podría considerarse económicamente inviable en la práctica. Sin embargo, el autor observó que, para el tráfico de vehículos ligeros, espesores de aproximadamente 11 cm serían suficientes para cumplir con la vida útil del proyecto sin riesgo de fatiga según el modelo de deterioro considerado.

En su estudio, Balbo (2020) se enfocó en el caso de una ciclovía en Brasil. Empleando el *software* ISLAB 2005, realizó simulaciones que consideraron tanto las condiciones geométricas de la losa como las cargas específicas relacionadas con la aplicación del pavimento. Los resultados de estas simulaciones se utilizaron para determinar los espesores necesarios de la losa, a fin de cumplir con los requisitos establecidos en el modelo de análisis. Con base en este modelo, se obtuvieron deflexiones máximas del orden de 11×10^{-2} mm y una resistencia de 0,33 MPa. La situación crítica se identificó cuando la carga estaba en el borde, lo que llevó a la determinación de un espesor de losa de 100 mm.

2.3.2 Análisis de fatiga en pavimentos de hormigón permeable

Zhou et al. (2016) investigaron las características de fatiga de vigas de concreto permeable modificado con polímeros de alta resistencia (PPC) con un 30% de porosidad promedio. En su estudio, Zhou et al. propusieron un modelo de fatiga basado en la relación de esfuerzo (SR), la resistencia a la flexión y la relación del esfuerzo mínimo al máximo durante la prueba de fatiga. Sin embargo, además de la alta porosidad de las vigas PPC utilizadas en las pruebas de fatiga, el diseño de la mezcla de PPC contenía agregados de tamaño único grande (27.5 a 37.5 mm) que está fuera del rango típico de tamaño de agregado utilizado para el concreto permeable.

En otro estudio, Chandrappa y Biligiri (2017) desarrollaron un modelo de fatiga para pavimentos de hormigón permeable basado en pruebas experimentales de fatiga flexural en vigas de concreto permeable. Sin embargo, su modelo de fatiga representaba dos porosidades específicas y parámetros específicos del diseño de la mezcla. Actualmente, se deben utilizar modelos de fatiga disponibles para el concreto tradicional hasta que se desarrollen modelos de fatiga más adecuados para PCP que cubran una amplia gama de diseños de mezcla.

2.4 Permeabilidad y porosidad de hormigones permeables

La conductividad hidráulica (también conocida como tasa de infiltración o coeficiente de permeabilidad) es uno de los parámetros más importantes del hormigón permeable y puede definirse como la velocidad de infiltración del agua a través de su estructura. Los valores típicos de conductividad hidráulica para concretos permeables utilizados en pavimentos varían entre 0,21 cm/s y 0,54 cm/s (Tennis et al., 2004b).

Los métodos de medición de permeabilidad más utilizados son, el permeámetro del Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT) y la norma ASTM C1701. En un estudio realizado Li et al. (2013) se llevó a cabo una comparación entre estos dos métodos de medición en diversos tipos de pavimentos, que incluyeron hormigón permeable, asfalto poroso y adoquines de concreto intertrabado permeable. Los resultados revelaron que tanto el método NCAT como el método ASTM pueden emplearse de manera efectiva para medir la permeabilidad en todos los tipos de pavimentos, y el material de superficie no afecta significativamente la precisión de la medición. No obstante, se observó que los valores de permeabilidad obtenidos a través del método ASTM fueron consistentemente más bajos, registrando un promedio del 75% en comparación con los obtenidos mediante el método NCAT.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se muestra la creciente importancia y versatilidad de los pavimentos de hormigón permeable en la gestión urbana sostenible. La búsqueda de soluciones para contrarrestar la impermeabilización urbana ha llevado al desarrollo de este material, cuya composición porosa no solo

garantiza la integridad estructural, sino que también facilita la infiltración del agua en el suelo. La influencia de propiedades como la porosidad, el tamaño del agregado y la dosificación en las propiedades mecánicas muestra la necesidad de un diseño estructural preciso y adaptado a la aplicación específica del pavimento permeable.

Además, la inclusión de aspectos como el análisis mecanicista y la evaluación de la fatiga en los pavimentos permeables destaca la complejidad del diseño de estas estructuras. La adaptación de modelos de análisis estructural convencionales para aplicarlos a pavimentos permeables es un desafío en desarrollo, y la necesidad de modelos específicos de fatiga para este tipo de material destaca la importancia de investigaciones futuras. La variabilidad en los métodos de medición de permeabilidad y la identificación de criterios de resistencia específicos según la aplicación demuestran la necesidad de definir especificaciones técnicas para cada aplicación.

CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan los materiales, las variables y propiedades para diseñar estructuralmente y caracterizar las propiedades hidráulicas del hormigón permeable para su aplicación en ciclovías. Para esto se consideran propiedades del material, cargas de tránsito y ambientales, además de explorar distintas posiciones críticas de carga.

3.2 Modelación de diseño estructural de pavimentos de hormigón permeable para ciclovías

Se hace uso del método de Elementos Finitos (MEF) para llevar a cabo los análisis mecánicos, lo que permite evaluar los efectos de las cargas de los vehículos en las estructuras de pavimentos. Se hace uso del programa EverFE en su versión 2.24.

EverFE es un *software* de análisis 3D por elementos finitos utilizado para simular cargas y calcular las tensiones y deformaciones en sistemas de losas de hormigón sometidas tanto a cargas de ejes de vehículos como a cambios climáticos. Fue desarrollado por Las Universidades de Maine y Washington con fondos de los Departamentos de Transporte del Estado de Washington y California, este programa está disponible gratuitamente desde el sitio Web de la Universidad de Maine.

3.2.1 Geometría

El ancho de la ciclovía modelada corresponde a lo recomendado en el Manual Vialidad Ciclo-Inclusiva del MINVU (MINVU, 2015) las cuales se encuentran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ancho recomendado en Ciclovías según MINVU

Ancho Ciclovía	Bidireccional	Unidireccional
Óptimo	2,40 m	1,80 m

Ancho Ciclovía	Bidireccional	Unidireccional
Mínimo absoluto en singularidad	2,00 m	1,20 m

Según Balbo (2020) el concreto presenta fisuras de retracción espaciadas, en promedio, a una distancia de 10 metros unas de otras. En contraste, las losas de hormigón convencional poseen una longitud estándar de 4 metros. Dado este contexto, se modelaron ambas longitudes de losa, en la Figura 3.1 se muestra la geometría de la losa de 10 metros.

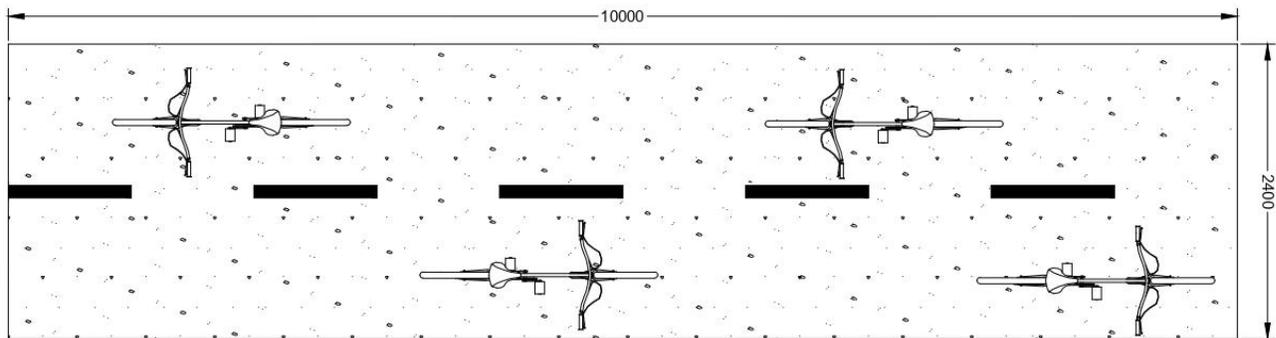


Figura 3.1. Geometría de la losa (en mm)

Para la modelación, se han empleado seis espesores diferentes de losa, los cuales son: 100 mm, 110 mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm y 200 mm. Esta variedad de espesores se ha empleado con el propósito de simular diversos escenarios de carga y condiciones.

3.2.2 Propiedades del material para la modelación

La losa de hormigón permeable a diseñar tiene propiedades iniciales determinadas a través de investigaciones previas en laboratorio de hormigones en la Universidad de Concepción realizadas por Oviedo (2022), donde se trabajaron mezclas de hormigón permeable, que permitieron establecer aquella que obtuvo mejor resistencia, siendo la de estas características la que se usó en esta investigación.

La Tabla 3.2 presenta las propiedades del hormigón permeable utilizadas como datos de entrada en la modelación realizada con el *software* EverFE.

El valor de la resistencia por flexotracción del material se obtiene a través de la resistencia a la compresión dada en la ecuación (3.1) (Spalvier et al., 2021).

$$f_r = 0,4377 * f_c^{\frac{2}{3}} \quad (3.1)$$

Tabla 3.2. Propiedades de hormigón permeable

Propiedad	Valor
Resistencia a compresión (MPa)	11,83
Resistencia a flexión por tracción (MPa)	2,27
Módulo de elasticidad (MPa)	16133
Coefficiente de Poisson	0,22
Coefficiente de dilatación térmica (1/°C)	1,1x10 ⁻⁵
Densidad (kg/m ³)	2177
K (MPa /mm)	0,05

No se utilizaron capas de base y subbase durante los análisis, en su lugar, se utilizaron un módulo de reacción de la subrasante (k). Se fijó un valor de k de 0.05 MPa/mm para todos los análisis, considerando un suelo de calidad media.

El coeficiente de Poisson se estableció utilizando los resultados de un estudio de laboratorio realizado por Goede (2009).

3.2.3 Cargas

3.2.3.1 Cargas de tránsito

Se emplearon dos tipos de ejes para la modelación de la ciclovía. El primer eje se basa en las dimensiones de una bicicleta, utilizando la geometría especificada en el estudio de Balbo (2020), cuyos valores se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Geometría de la carga de un eje de una bicicleta

Tipo de carga	Valores Sugeridos	Geometría de la carga
Ciclista sobre bicicleta	1 kN	Presión de una rueda: 0,75 MPa
		Radio: 14,5 mm
		Distancia entre los centros de las ruedas:
		1,0 m

El segundo eje, corresponde a un vehículo liviano con un eje de rueda simple con una carga de 22 kN según el estudio de Batezini (2012), debido a que en vías con velocidades de circulación menor a 30 km/h no se requiere segregación con estos vehículos, por lo tanto, pueden circular tanto las bicicletas como los vehículos livianos (MINVU, 2015). En la Figura 3.2 y Tabla 3.4 se muestra el esquema y medidas del vehículo liviano utilizado para la modelación.

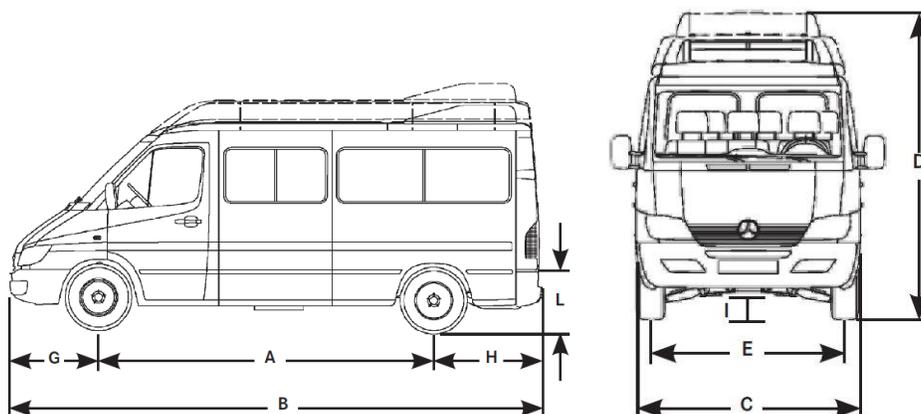


Figura 3.2. Esquema de vehículo liviano

Tabla 3.4. Medidas vehículo liviano

Medidas	Valor (cm)
A	300
B	489
C	192,2
E	163,8
G	93,9
H	95

Las dimensiones utilizadas para este eje se especifican en la Figura 3.3 y Tabla 3.5.

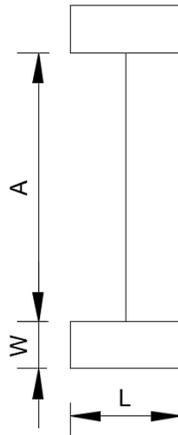


Figura 3.3. Representación eje vehículo liviano.

Tabla 3.5. Dimensiones del eje vehículo liviano

Dimensión	Carga
	22 kN
Largo área de contacto del neumático. L(mm)	670
Ancho área de contacto del neumático. W(mm)	284
Largo del eje. A (mm)	1630

3.2.3.2 Cargas ambientales

Durante la vida del pavimento de hormigón permeable está expuesto a sollicitaciones externas ambientales que genera un gran número de ciclos de carga y descarga. El efecto de dichos ciclos se refleja en una fatiga del material que posteriormente genera fallas en forma de grietas.

La cantidad de deformaciones de alabeo inducida se cuantifica mediante una diferencia lineal efectiva de temperatura en el espesor de losa, esta recibe el nombre de diferencia de temperatura lineal efectiva total (TELTD), se seguirá la metodología entregada por San Martín (2018).

$$TELTD = \Delta T_{tg} + EBITD \tag{3.2}$$

Donde:

ΔT_{tg} : Diferencia de temperatura lineal entre la parte superior e inferior de la losa equivalente a un gradiente térmico vertical no lineal a través del espesor debido a variaciones de temperatura.

EBITD : Diferencia de temperatura efectiva de construcción.

Las condiciones geográficas de la ciudad de Concepción y la estación de verano fueron consideradas al establecer los parámetros para la construcción del pavimento. Según San Martín (2018), se asigna un valor de -10°C para la temperatura base de diseño (*EBITD*) y una variación de temperatura de $-0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Para comparar los efectos que se producen con diferentes diferenciales de temperatura se utilizarán los valores que se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. TELTD utilizado en la modelación

EBITD	ΔT_{tg}	TELTD
($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)
0	0	0
-10	0	-10,0
-10	-5,0	-15,0
-10	-6,0	-16,0
-10	-9,0	-19,0
-10	-11,0	-21,0

3.2.4 Posición de la carga

Se realizaron varios análisis preliminares variando la posición del eje sobre la placa para determinar la posición crítica del eje en función de las tensiones generadas. Es por esto que se tienen siete casos a analizar, los cuales son:

- Una bicicleta centrada en un carril con una rueda tangente al borde libre transversal de la losa de hormigón.
- Una bicicleta centralizada en un carril en la zona central de la losa de hormigón.

- c. Dos bicicletas centradas en dos carriles, dispuestas en paralelo, ambas con una rueda tocando el mismo borde libre transversal de una losa de hormigón.
- d. Dos bicicletas centralizadas en dos carriles, dispuestas en paralelo, en la zona central del hormigón.
- e. Diez bicicletas alineadas en el centro cada carril.
- f. Un vehículo de emergencia dispuesto en el borde libre transversal de la losa de hormigón.
- g. Un vehículo de emergencia dispuesto en centro de la losa de hormigón.

En la Figura 3.4 se visualizan los distintos escenarios de carga a modelar.

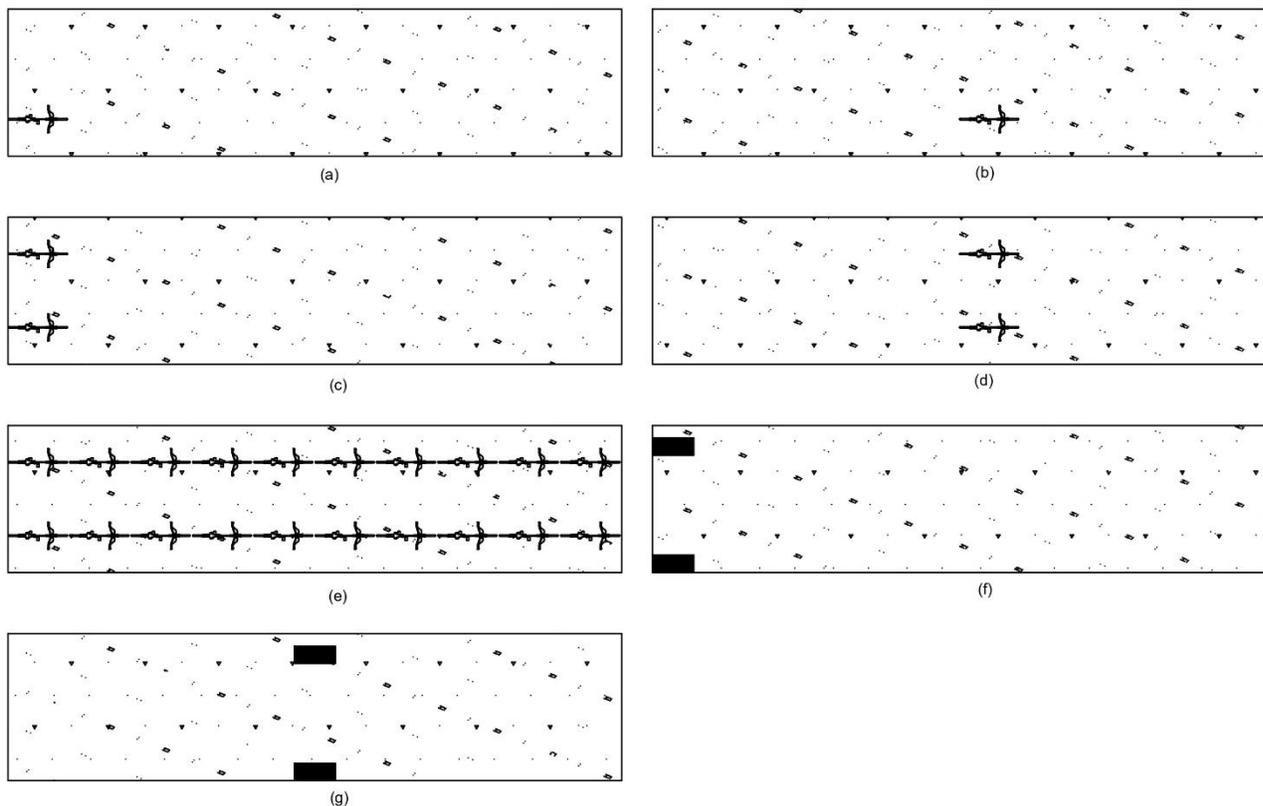


Figura 3.4. Casos a analizar en el software EverFE

3.2.5 Análisis de fatiga

En la actualidad, no se dispone de un modelo de fatiga confiable que se pueda utilizar para estimar el número de aplicaciones de carga permitidas (N_f) para el hormigón permeable. Por lo tanto, se adoptó

el modelo de fatiga utilizado en los estudios realizados por AlShareedah & Nassiri (2019) y Vancura et al. (2011), este es comúnmente utilizado por la American Concrete Pavement Association (ACPA) para pavimentos convencionales de hormigón para estimar el N_f para hormigón permeable antes del fallo y toma como entrada el estrés crítico (σ_{equiv}), el módulo de resistencia (MR) y la probabilidad de falla (P), y predice el número permitido de cargas de un solo eje de 18 kips antes de que ocurra una falla estructural en la sección del pavimento.

$$\text{Log}(N_f) = \left[\frac{-SR^{-10,24} * \log(1 - P)}{0,0112} \right]^{0,217} \quad (3.3)$$

Donde:

SR : Relación de estrés del pavimento

P : Probabilidad de fallo

$$SR = \frac{\sigma_{equiv}}{MR} \quad (3.4)$$

Donde:

σ_{equiv} : Esfuerzo crítico en la losa

MR : Módulo de Ruptura o resistencia a la flexotracción

El modelo de fatiga de la Asociación de Cemento de Portland (Portland Cement Association, 1984) para pavimentos de hormigón sugiere que las estructuras con una relación de estrés del pavimento (SR) inferior a 0,45 no experimentarán pérdida de resistencia por fatiga. Se destaca que esta relación entre tensiones (SR), considerada en el método de la PCA (1984), es aplicable para hormigones convencionales que presentan una microestructura muy diferente a la de los hormigones permeables. Debido a su porosidad muy elevada, los hormigones permeables pueden exhibir una condición de evolución de daño totalmente diferente causada por cargas cíclicas, y este límite de relación de tensiones puede variar significativamente de un material a otro.

3.3 Construcción sección de prueba

3.3.1 Materiales

Para la confección de hormigón permeable en el tramo de prueba se utilizó cemento, agregado grueso, agregado fino y agua, materiales que se explicarán a continuación:

El cemento utilizado para el total de las confecciones de hormigón permeable correspondió a Cemento Bio Bio de acuerdo con NCh 148 (INN, 1968). Este cemento cumple con las normas establecidas como de tipo puzolánico, el cual se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso.

El árido grueso utilizado corresponde a gravilla 3/8" la cual fue proporcionada por un proveedor fijo, para evitar la variación de características de este tipo de árido. La empresa corresponde a áridos HH cuyo proveedor es la empresa Áridos Livio Maggi que obtiene los áridos en la ribera del río Ñuble. En la Tabla 3.7 se presentan las propiedades físicas de los áridos

Tabla 3.7. Propiedades físicas del árido grueso

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

La arena a utilizada fue arena Bío Bío, obtenida de un proveedor fijo para el total de las confecciones del hormigón, correspondiente a áridos HH. En la Tabla 3.8 se presentan las propiedades físicas.

Tabla 3.8. Propiedades físicas del árido fino

Propiedades Físicas	Valor
Densidad real árido saturado superficialmente seco (kg/m ³)	2729
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2682

Propiedades Físicas	Valor
Densidad neta (kg/m ³)	2814
Absorción de agua (%)	1,75
Partículas finas menores a 0,080 mm (%)	0,59

En la confección de hormigón permeable se utilizó agua potable, la cual cumple con los requisitos físicos, químicos, radioactivos y bacteriológicos vigentes y presentes en NCh 409 (INN, 2005).

La dosificación escogida en esta investigación corresponde a PC-39-15 realizada en el estudio de Oviedo (2022). En la Tabla 3.9 se puede visualizar la dosificación de cada material utilizado en el tramo de prueba.

Tabla 3.9. Dosificación de hormigón permeable utilizada, obtenida por Oviedo (2022)

Dosificación	PC-39-15
AG [kg/m ³]	1345,16
AF [kg/m ³]	201,74
C [kg/m ³]	345,31
A [kg/m ³]	134,67
A/C	0,39
% AF/AG	15
AG/C	3,895
AF/C	0,584
K Nguyen	1,1298

3.3.2 Sección de prueba de ciclovía

Se construyó una sección de prueba de pavimento de hormigón poroso con dimensiones mostradas en la Figura 3.5, con un espesor de 20 cm.

La preparación y curado de la sección de pavimento se realiza acorde a la NCh 170 (INN, 2016). A partir de la dosificación de las mezclas, la cual es detallada en la Tabla 3.9, se calcula la cantidad de cada material en función del volumen de la sección de prueba. Las mezclas se realizaron en una betonera, donde se introduce primero el árido grueso, luego el árido fino y finalmente el cemento. Se

mezcla por unos segundos y se incorpora agua en pequeñas cantidades hasta que la mezcla esté homogénea, mezclando por alrededor de 5 minutos.

Para compactar la sección de prueba se utilizó un rodillo de 140 mm de diámetro, 1250 mm de largo y 125 kg, cuya presión de compactación corresponde a 0.065 MPa.

En la Figura 3.6 se puede visualizar imágenes de la construcción de la sección de prueba.

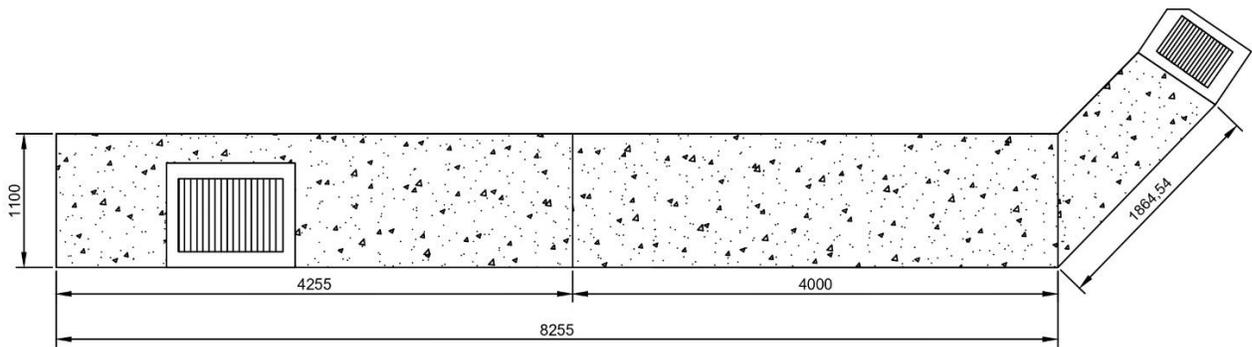


Figura 3.5. Plano de la sección de prueba (en mm)



(a)

(b)

Figura 3.6. Sección de pavimento realizado. (a) Colocación de base y moldaje y (b) losa compactada y enrasada.

3.4 Ensayos

3.4.1 Extracción de testigos

La extracción de testigos de hormigón permeable endurecido se realizó de acuerdo con lo establecido en NCh 1171 (INN, 2001) con un equipo correspondiente a una sonda rotatoria (Figura 3.7) que tiene una broca, la cual con sus bordes diamantados permite extraer de la sección de prueba tres probetas de hormigón permeable de dimensiones 9,3 cm de diámetro y 22 cm de altura.

La altura original de los testigos era de 22 cm, luego se realiza el rectificado de los extremos del testigo, obteniendo una altura final de 19,6 cm.

En el procedimiento de extracción de testigos no se produjo agrietamiento o daños visibles en la estructura como se observa en la Figura 3.7(b).



Figura 3.7. a) Extracción de testigos, b) Testigos obtenidos de sección de prueba

3.4.2 Ensayo de densidad y porosidad a testigos

El ensayo de densidad y porosidad se realizó de acuerdo con la norma para hormigón permeable ASTM C1754 (ASTM, 2021). Este ensayo fue realizado a los testigos obtenidos del tramo de prueba,

donde se determinaron las dimensiones de los testigos para obtener su volumen. Luego, se secó la probeta a través del método B, donde se deja la probeta en el horno a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas, para obtener la masa seca. Una vez seca la probeta, se debe sumergir en agua, determinando así la masa sumergida de la muestra cómo se observa en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Probeta sumergida

Para calcular la densidad de la probeta se utiliza ecuación (3.5).

$$Densidad = \frac{K * A}{D^2 * L} \quad (3.5)$$

Donde:

- A : Masa seca (g)
- D : Diámetro (mm)
- L : Largo (mm)
- K : Constante equivalente a 1 273 240 en unidades SI

Para calcular la porosidad de cada probeta se utiliza ecuación (3.6).

$$Porosidad = \left[1 - \left(\frac{K * (A - B)}{\rho_w * D^2 * L} \right) \right] * 100 \quad (3.6)$$

B : Masa sumergida (g)

ρ_w : Densidad del agua (kg/m³)

3.4.3 Permeabilidad

Para medir la permeabilidad en la sección del pavimento se utilizó el permeámetro NCAT. Utiliza la Ley de Darcy para determinar la tasa de flujo de agua a través del pavimento de asfalto y tiene ajustes para probar pavimentos permeables con diferentes porosidades. Se basa en el principio de carga variable.

Para pavimentos con alta permeabilidad, como es el caso del hormigón permeable, es necesario seleccionar uno de los tubos de mayor diámetro, ya que el nivel de agua caerá demasiado rápido para una observación precisa en los tubos de menor diámetro.

En este estudio, se utilizó el permeámetro de campo de asfalto Gilson AP-1B NCAT de Gilson Company, Inc. (Lewis Center, OH), como se muestra en la Figura 3.9. Consiste en dos tubos de dos niveles con graduaciones marcadas y la base. Una junta de goma en la parte inferior de la placa base asegura un área bien definida para la permeabilidad.

Se realizan mediciones en ocho ubicaciones seleccionadas al azar en la sección de prueba, las cuales se pueden ver en la Figura 3.10. En cada una de ellas se repite la medición del tiempo en tres ocasiones. Esto se lleva a cabo con el propósito de determinar el tiempo que requiere el agua para descender entre alturas de referencia conocidas, la permeabilidad se calcula con la Ecuación (3.7).

$$k = \left(\frac{aL}{At} \right) * \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.7)$$

Donde:

- k : Coeficiente de permeabilidad
 a : Área tubo de admisión
 A : Área de la muestra
 t : Tiempo que demora entre h_1 y h_2
 L : Largo de la muestra
 h_1 : Altura inicial del agua
 h_2 : Altura final del agua



Figura 3.9. Medición de permeabilidad mediante el permeámetro NCAT

3.4.4 Tasa de infiltración

La medición de la tasa de infiltración se llevó a cabo en la sección del pavimento siguiendo las pautas de la norma ASTM C1701 (ASTM, 2020). Se utilizó un anillo de infiltración de aluminio con un diámetro de 294 mm y una altura de 150 mm, el cual se selló en los bordes con la superficie del pavimento. El proceso consiste en definir una cantidad de agua de acuerdo con la condición de permeabilidad del pavimento y medir el tiempo desde el momento en que el agua impacta la superficie del hormigón permeable hasta que ya no se encuentra presente en la superficie permeable.

El ensayo se realizó vertiendo agua desde un balde, siguiendo las especificaciones de la norma que indican un contenido de 3,6 kg. Este procedimiento se repitió tres veces para obtener un promedio, y se aseguró de mantener el nivel de agua dentro de la franja demarcada en el instrumento, que varía entre 10 mm y 15 mm.

A continuación, en la Figura 3.10 se indican los puntos donde fueron realizadas las mediciones.

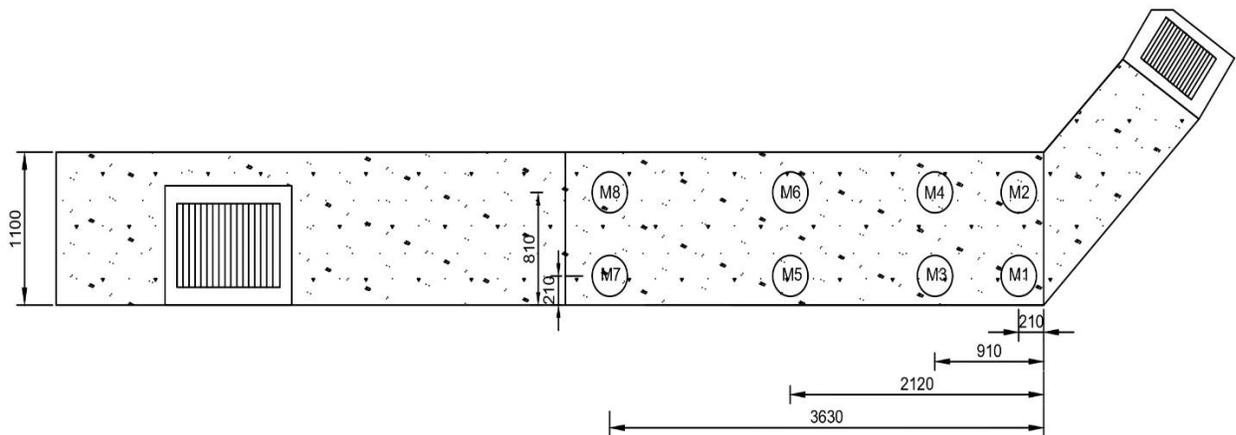


Figura 3.10. Puntos de medición en la sección de prueba (en mm)

La tasa de infiltración se calcula según la ecuación (3.8). El anillo infiltrómetro utilizado en la sección de prueba se presenta en la Figura 3.11.

$$I = \frac{KM}{D^2 * t} \quad (3.8)$$

Donde:

I : Infiltración

K : Factor 4583666000 (mm³-s)/(kg-h)

M : Masa de agua

D : Diámetro del anillo de infiltración

t : tiempo



Figura 3.11. Medición de tasa de infiltración en sección de prueba

3.5 Conclusión

En este capítulo se establecieron las diferentes metodologías a utilizar en esta investigación de forma detallada para cada procedimiento. Se consideraron diferentes espesores de losas, propiedades de materiales provenientes de investigaciones previas y diversas cargas de tránsito y ambientales para obtener los esfuerzos críticos través de la modelación en el *software* EverFe 2.24 para su posterior análisis de fatiga para el caso de pavimentos de hormigón permeable para ciclovías. Además, se construyó una sección de prueba basada en una dosificación previamente investigada para medir las propiedades hidráulicas del hormigón permeable.

CAPITULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo, se presentan los resultados relacionados con el análisis estructural de losas de hormigón permeable en su aplicación a ciclovías, mostrando los resultados de esfuerzos críticos bajos distintos escenarios de carga, número de aplicaciones de carga permitido, permeabilidad e infiltración del hormigón permeable para su uso en ciclovías.

4.2 Análisis estructural de ciclovías

A través de la modelación de los distintos escenarios de carga en el *software* EverFE se obtienen los esfuerzos críticos máximos generados en cada escenario.

En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se muestran los resultados de la variación del máximo esfuerzo de tensión de tracción en función de la variación del espesor de la losa para los largos de 10 y 4 metros para la condición de gradiente de temperatura más desfavorable (-21°C). Los resultados para los diferenciales de temperatura complementarios se presentan en el Anexo 4.1.

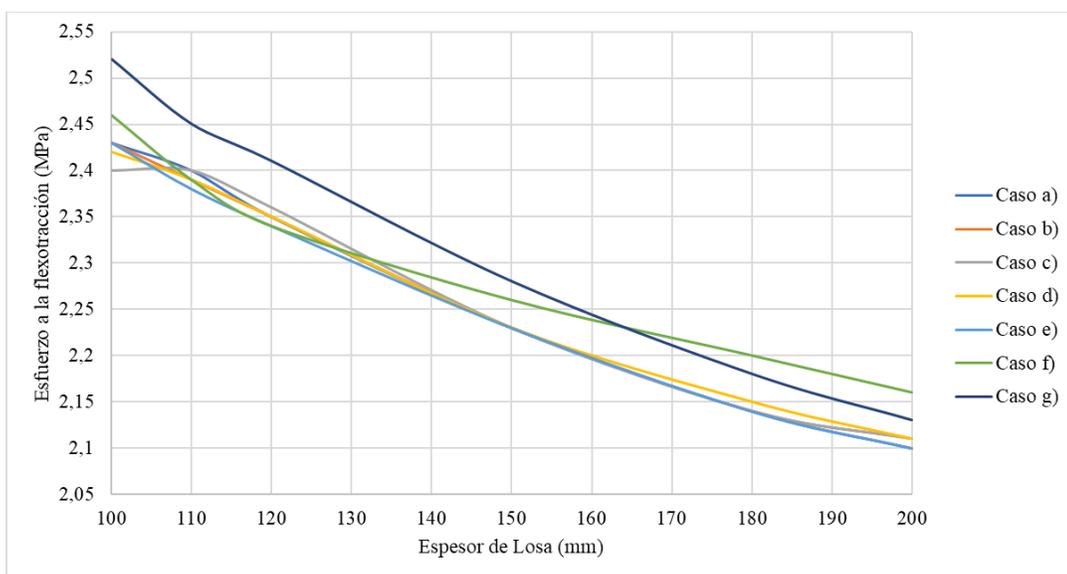


Figura 4.1. Variación en el esfuerzo máximo según el espesor en una losa de 10 metros de longitud

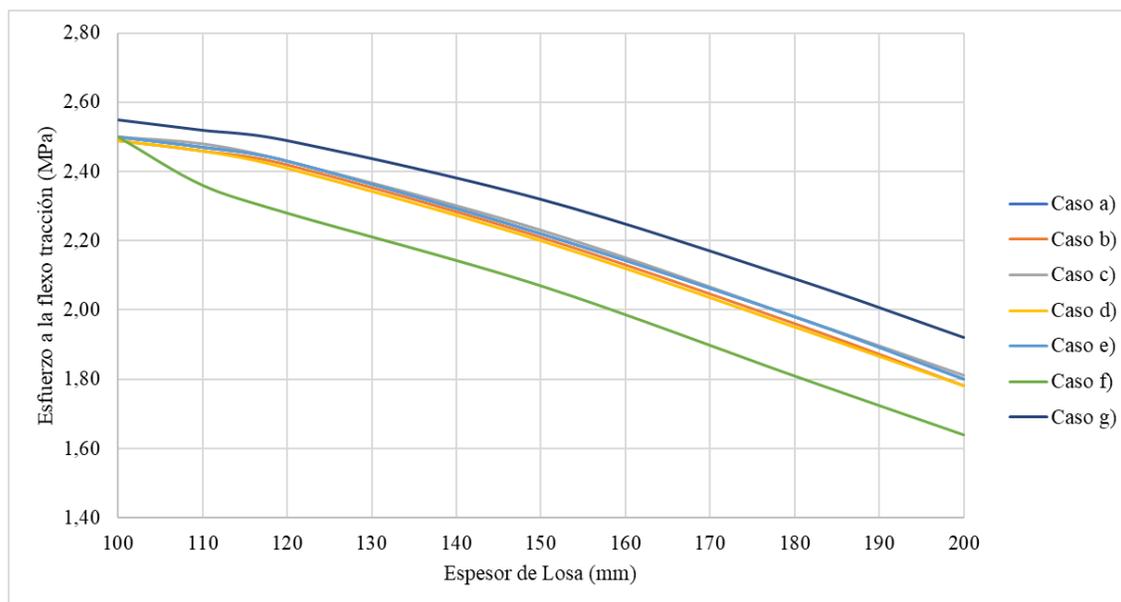


Figura 4.2 Variación en el esfuerzo máximo según el espesor en una losa de 4 metros de longitud

En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se muestran los resultados de los esfuerzos críticos a la flexotracción para las dos longitudes de losa en el escenario de carga más desfavorable, correspondiente a vehículo liviano ubicado en el borde de la losa (caso g).

Tabla 4.1. Esfuerzos críticos de flexotracción para una longitud de losa de 10 metros

Caso	Espesor de Losa (mm)	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
		ΔT 0°C	ΔT -10°C	ΔT -15°C	ΔT -16°C	ΔT -19°C	ΔT -21°C
g)	100	0,95	1,61	1,97	2,06	2,28	2,52
	110	0,85	1,46	1,80	1,90	2,23	2,45
	120	0,76	1,31	1,75	1,86	2,19	2,41
	150	0,55	1,14	1,65	1,76	2,07	2,28
	180	0,41	1,08	1,57	1,67	1,98	2,18
	200	0,34	1,05	1,53	1,63	1,93	2,13
Disminución (entre 100mm – 200mm)		65,3%	34,8%	22,3%	20,9%	15,4%	15,5%

Tabla 4.2. Esfuerzos críticos de flexotracción para una longitud de losa de 4 metros

Caso	Espesor de Losa (mm)	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
		ΔT					
		0°C	-10°C	-15°C	-16°C	-19°C	-21°C
g)	100	0,96	1,4	1,9	2,00	2,3	2,55
	110	0,86	1,28	1,74	1,83	2,13	2,52
	120	0,76	1,16	1,62	1,72	2,06	2,49
	150	0,55	0,921	1,43	1,54	1,86	2,32
	180	0,40	0,786	1,25	1,35	1,63	2,09
	200	0,33	0,701	1,13	1,21	1,47	1,92
Disminución (entre 100mm – 200mm)		64,4%	49,9%	40,5%	39,5%	36,1%	24,7%

Se evidencia una reducción de los esfuerzos máximos a medida que se incrementa el espesor de la losa, bajo ambas condiciones evaluadas. El escenario que genera los mayores esfuerzos en la losa corresponde al vehículo liviano ubicado en el borde de esta. En el caso de la losa de 10 metros de longitud, los esfuerzos de tracción bajo un TELTD de -21°C fluctúan entre 2,1 MPa y 2,52 MPa. Para la losa de 4 metros de longitud, los esfuerzos generados varían en el rango de 1,64 MPa a 2,55 MPa.

En el contexto del escenario con un vehículo liviano en la ciclo vía, se observa que el incremento del espesor de la losa en 100 mm conlleva a reducciones significativas en los esfuerzos críticos para todos los diferenciales de temperatura, especialmente notable en la condición de longitud de la losa de 4 metros, donde se registra una disminución sobre un 25%. En este sentido, una losa más corta con mayor espesor resulta en tensiones internas más bajas, en línea con la explicación por Covarrubias (1988) donde menciona que las tensiones en la losa se incrementan al aumentar el largo de la losa y al disminuir el espesor. Además, esto se relaciona con Pradena et al. (2019), donde explica que al reducir la longitud de losa, también se reduce el alabeo, el cual genera un estado tensional en la losa dependiendo de la longitud y el espesor de ésta.

Por otro lado, en la Figura 4.3 y Figura 4.4 se presenta la variación de la relación de esfuerzos al considerar diferentes casos de diferenciales de temperatura en el escenario que genera mayores cargas,

correspondiente al vehículo liviano ubicado en el borde de la losa. Se destaca en línea segmentada el límite SR, que según el modelo de fatiga de la Asociación del Cemento Portland (1984) sugiere que, para pavimentos de hormigón que presenten una relación de tensiones (SR) inferior a 0,45, no experimentarán pérdida de resistencia por fatiga.

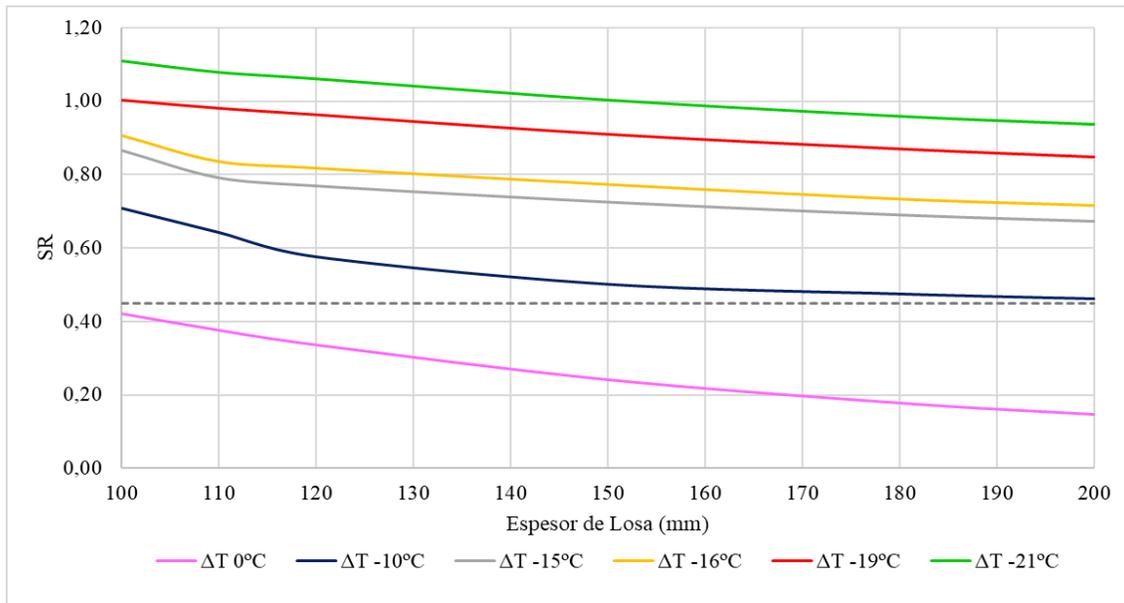


Figura 4.3 Variación de relación de esfuerzos al considerar diferenciales de temperatura para losa de 10 metros de longitud

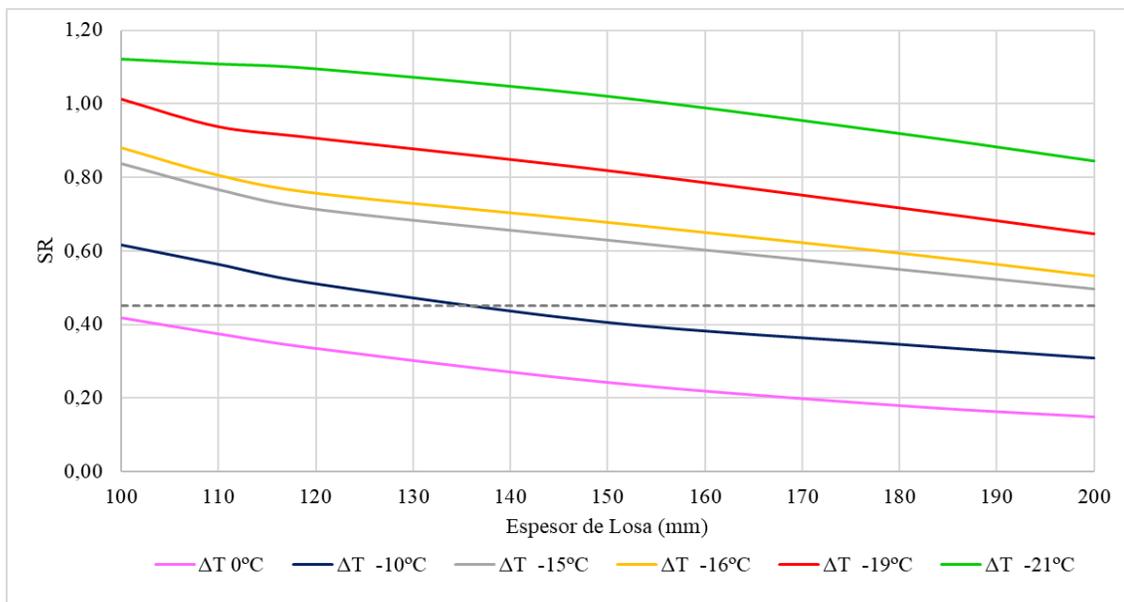


Figura 4.4. Variación de relación de esfuerzos al considerar diferenciales de temperatura para losa de 4 metros de longitud

Se observa que al tener en cuenta los efectos del diferencial de temperatura en la losa de hormigón permeable de 10 metros de longitud, en todos los casos con diferencial de temperatura, los valores de la relación de esfuerzos están sobre 0,45, es decir, que presentarían daño por efectos de fatiga. Por el contrario, sin diferencial de temperatura, los valores de la relación de esfuerzos son inferiores a 0,45 para todos los escenarios de cargas considerados, por lo que no presentarían daño por fatiga. En el caso de la losa de 4 metros, la relación de esfuerzos disminuye en comparación con la losa de mayor longitud en todos los casos. Además, para un diferencial de temperatura de -10°C , espesores superiores a 110 mm no experimentarían daño por fatiga, al igual que en el caso de un diferencial de -15°C para espesores mayores a 180 mm.

4.3 Análisis de fatiga en losas de hormigón permeable para su uso en ciclovías

Los resultados del análisis de fatiga para la losa de 10 y 4 metros de hormigón permeable en el escenario que genera mayores cargas, el cual corresponde al vehículo liviano ubicado en el borde de la losa, se muestran en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 respectivamente. Los resultados a los escenarios complementarios se encuentran en el Anexo 4.2.

Tabla 4.3. Número de repeticiones de carga permitido para una longitud de losa de 10 metros

Espesor de losa (mm)	Número de aplicaciones de carga (N_f)					
	$\Delta T 0^{\circ}\text{C}$	$\Delta T -10^{\circ}\text{C}$	$\Delta T -15^{\circ}\text{C}$	$\Delta T -16^{\circ}\text{C}$	$\Delta T -19^{\circ}\text{C}$	$\Delta T -21^{\circ}\text{C}$
100	8,39E+13	2,47E+04	6,39E+02	3,47E+02	106,57	42,01
110	8,47E+17	2,88E+05	2,68E+03	1,10E+03	134,91	53,48
120	1,05E+23	8,84E+06	4,47E+03	1,54E+03	164,99	62,03
150	1,49E+48	2,89E+09	1,45E+04	4,02E+03	326,03	106,57
180	2,32E+95	4,65E+10	4,42E+04	1,12E+04	5,95E+02	1,74E+02
200	4,97E+146	2,28E+11	8,31E+04	1,88E+04	8,64E+02	2,28E+02

Tabla 4.4. Número de repeticiones de carga permitido para una longitud de losa de 4 metros

Espesor de losa (mm)	Número de aplicaciones de carga (N_f)					
	ΔT 0°C	ΔT -10°C	ΔT -15°C	ΔT -16°C	ΔT -19°C	ΔT -21°C
100	1,53E+14	9,84E+05	1,10E+03	5,16E+02	97,42	38,12
110	1,30E+18	2,06E+07	4,98E+03	2,02E+03	228,37	42,01
120	1,67E+23	1,26E+09	2,15E+04	6,21E+03	347,10	46,46
150	3,91E+47	1,58E+15	5,21E+05	7,07E+04	1540,43	89,28
180	6,14E+92	4,11E+21	5,12E+07	3,14E+06	1,88E+04	2,88E+02
200	9,38E+140	7,46E+27	4,44E+09	1,94E+08	2,38E+05	9,34E+02

Los resultados de las Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se pueden ver gráficamente en la Figura 4.5, donde la línea continua corresponde a la losa de 10 metros, en cambio la línea discontinua representa la losa de 4 metros.

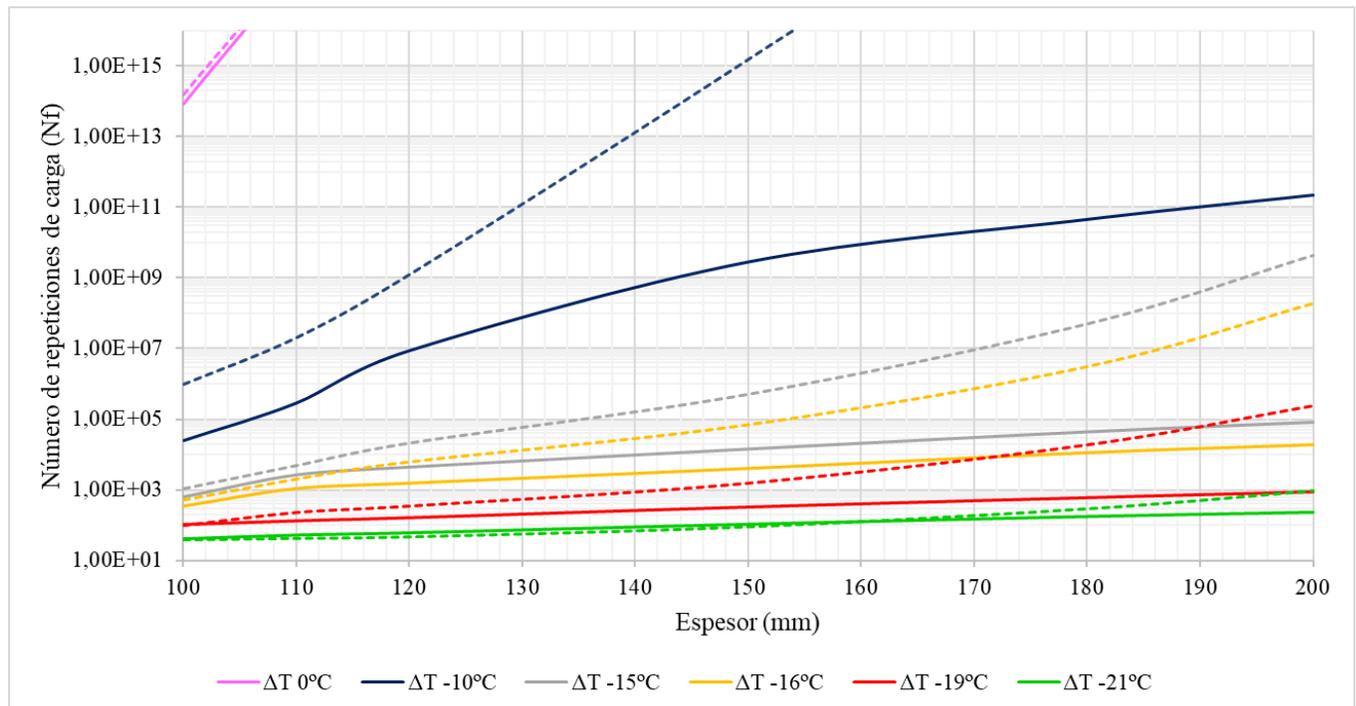


Figura 4.5. Variación del número de aplicaciones de carga (en escala logarítmica) para distintos espesores de losa al considerar diferenciales de temperatura

De la Tabla 4.3, se observa una clara tendencia al aumento del número de repeticiones de carga permitido (N_f) a medida que se incrementa el espesor de la losa. Este comportamiento sugiere que losas más gruesas tienen una mayor capacidad para soportar cargas repetitivas antes de alcanzar el agotamiento por fatiga. Sin embargo, a mayores diferenciales de temperatura, representadas por valores como -21°C , el número de aplicaciones de carga en la losa disminuye, indicando una mayor vulnerabilidad de las losas a la fatiga en condiciones climáticas donde se produzcan grandes diferenciales de temperatura en el espesor de la losa. Además, en la Tabla 4.4 (correspondiente al número de repeticiones para una losa de 4 metros), se observa la misma tendencia general de la disminución de N_f con el diferencial de temperatura.

Lo anterior, es comparable al estudio de AlShareedah et al., (2020), en donde al incorporar la diferencia de temperatura en el diseño del espesor de pavimentos de hormigón permeable resultó en espesores mínimos requeridos más altos, hasta 100 mm más, en comparación con pavimentos de hormigón permeable sin diferencial de temperatura bajo las mismas cargas de tráfico.

Por último, en la Figura 4.5, se destaca que, para un espesor específico, los valores de N_f asociados a la losa de 10 metros de longitud son inferiores en contraste con aquellos correspondientes a una longitud de 4 metros. Este resultado indica que las losas más cortas tienen una capacidad inherente para resistir un mayor número de ciclos de carga repetitiva antes de experimentar fatiga estructural.

4.4 Ensayos

4.4.1 Ensayos densidad y porosidad

La densidad y porosidad de los testigos extraídos en la sección de prueba son mostrados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Densidad y porosidad de testigos extraídos

Propiedad	Testigo 2	Testigo 3
Masa sumergida (g)	1763	1660
MSS (g)	3144	2978
Masa seca (g)	2930	2810

Propiedad	Testigo 2	Testigo 3
Densidad (kg/m ³)	1845	1940
Porosidad	27%	21%

Se observa que las densidades obtenidas están dentro del rango de valores comunes en hormigones permeables, correspondientes a valores entre 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³ (Tennis et al., 2004a). De igual manera, los valores de porosidad están dentro del rango típico definido por la ACI Committee 522 (2010), los cuales varían dentro del rango de un 15% y 35%.

4.4.2 Ensayos de permeabilidad y tasa de infiltración

A continuación, en la Figura 4.6 y Figura 4.7 se muestran los resultados de los ensayos de permeabilidad e infiltración respectivamente, y en la Tabla 4.6 las mediciones asociadas a cada punto.

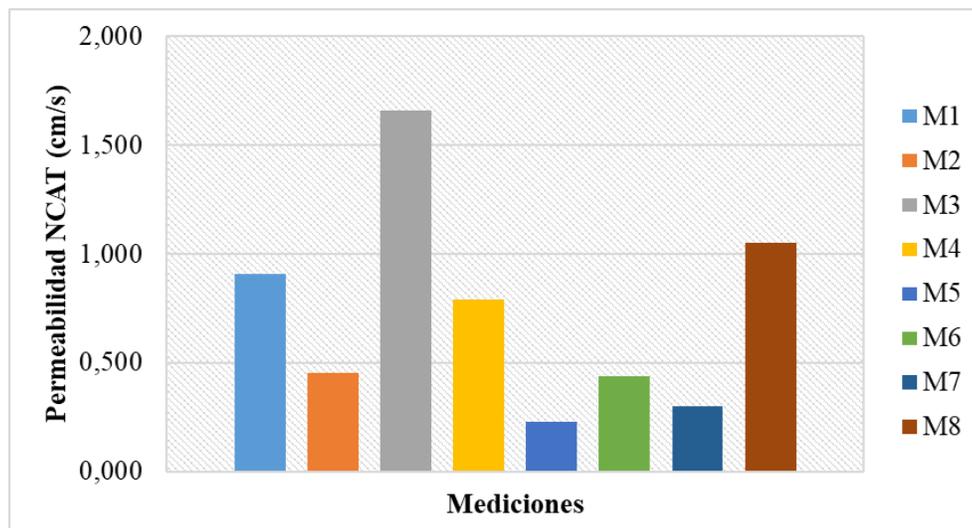


Figura 4.6 Propiedades hidráulicas del tramo de pavimento, permeabilidad con NCAT

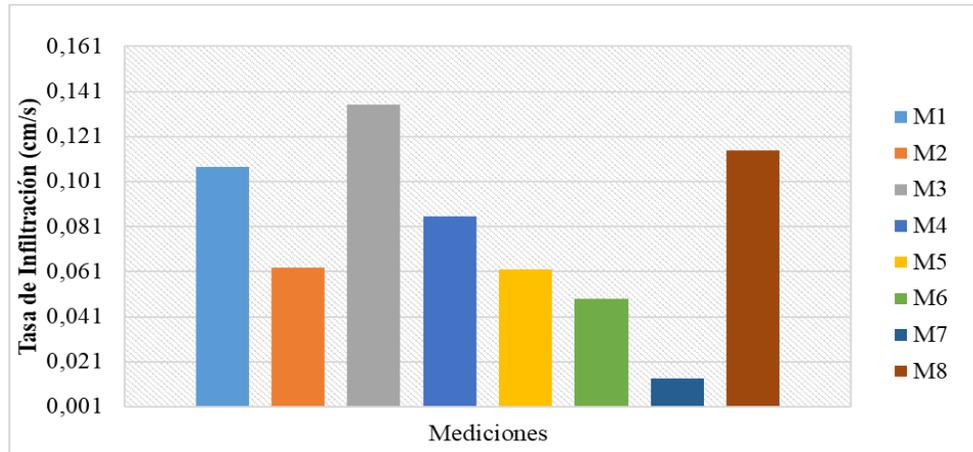


Figura 4.7 Propiedades hidráulicas de sección de prueba, tasa de infiltración

Tabla 4.6 Permeabilidad e infiltración de los puntos de medición en sección de prueba.

Medición	Permeabilidad NCAT (cm/s)	Tasa de Infiltración ASTM C1701 (cm/s)
M1	0,906	0,107
M2	0,455	0,063
M3	1,658	0,135
M4	0,793	0,086
M5	0,229	0,062
M6	0,440	0,049
M7	0,299	0,014
M8	1,051	0,115
Promedio (cm/s)	0,729	0,079
Desviación Estándar	0,478	0,040
Coefficiente de variación	0,655	0,503

Se observa que la diferencia entre puntos de medición es considerable, con un promedio de 0,73 cm/s para el ensayo NCAT y 0,079 para el ASTM C1701, y un coeficiente de variación de 0,66 y 0,50 correspondientemente. Lo anterior, concuerda con lo estudiado por Li et al. (2013) en donde obtuvo que los valores de permeabilidad medidos con el método ASTM fueron 50-90% (75% en promedio) más bajos que los medidos con el método NCAT. Además, la permeabilidad medida con el método

ASTM C1701 no está dentro de los rangos entregados por la ACI Committee 522 (2010), donde el valor mínimo corresponde a 0,14 cm/s.

Estas diferencias se explican por la diferencia en la dirección del movimiento del flujo de agua debido a que el permeámetro NCAT tiene un diámetro menor que ejerce un flujo en dos direcciones, en cambio, el infiltrómetro tiene un diámetro mayor que induce un flujo unidireccional (Li et al., 2013). Adicionalmente, la diferencia se puede relacionar a la diferencia en los principios de carga constante y carga variable utilizados en el método ASTM C1701 y NCAT respectivamente (Chen et al., 2019).

4.6 Conclusión

Se han presentado los resultados del análisis estructural de losas de hormigón permeable destinadas a ciclovías, así como los ensayos relacionados con su comportamiento hidráulico. En el análisis estructural, se han detallado los esfuerzos críticos a la flexotracción en la losa de hormigón permeable para los diferentes escenarios de carga y condiciones climáticas. Una disminución de la longitud de la losa se traduce en una reducción significativa de los esfuerzos máximos. Asimismo, la evaluación de la relación de esfuerzos en relación con los diferenciales de temperatura revela que las losas de mayor longitud muestran una mayor susceptibilidad a la fatiga, especialmente en condiciones de temperatura más baja. El análisis de fatiga revela que el número de repeticiones de carga permitido aumenta con el espesor de la losa, pero disminuye con mayores diferenciales de temperatura. La longitud de la losa también influye en la capacidad de resistir ciclos repetitivos de carga, sugiriendo que las losas más cortas son más resistentes a la fatiga.

Se presentan además resultados de los ensayos de densidad, porosidad, permeabilidad e infiltración, para los distintos puntos medidos. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos comunes para hormigones permeables en el caso de la densidad y porosidad. Por otro lado, la variabilidad en los resultados de permeabilidad e infiltración entre diferentes puntos de medición sugiere una heterogeneidad en la superficie y la interconexión de poros en el pavimento permeable. Además, las diferencias marcadas entre los métodos de medición, permeámetro NCAT e infiltrómetro ASTM C1701, resaltan la importancia de la elección del método en la obtención de resultados significativos.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

Mediante el análisis estructural de ciclovías pavimentadas con hormigón permeable, se evidenció que la variación en el espesor de la losa influye significativamente en los esfuerzos críticos, mostrando una clara reducción a medida que se incrementa el espesor, especialmente notable en la condición de longitud de la losa de 4 metros, donde se registra una disminución sobre un 25%. El escenario de carga más desfavorable, con un vehículo liviano en el borde de la losa, generó los esfuerzos máximos, y se observó que una losa más corta con mayor espesor resulta en tensiones internas más bajas. Además, la evaluación de la relación de esfuerzos en relación con los diferenciales de temperatura sugiere la posibilidad de fatiga en losas de 10 metros, especialmente en condiciones de grandes diferenciales de temperatura, mientras que las losas de 4 metros presentan una menor propensión a este fenómeno. Es crucial señalar que la aplicación del modelo de fatiga de la PCA (1984) debe ser realizada con precaución, considerando las particularidades de los hormigones permeables.

En lo que respecta el análisis de fatiga en losas de hormigón permeable para ciclovías, se concluye que el número de repeticiones de carga permitido (N_f) aumenta con el espesor de la losa, indicando una mayor resistencia a la fatiga para losas más gruesas. Sin embargo, se observa que las variaciones significativas de temperatura afectan negativamente la resistencia a la fatiga, siendo más evidente en grandes diferenciales de temperatura. Además, la longitud de la losa surge como un factor determinante en la capacidad de resistir ciclos repetitivos de carga, siendo las losas más cortas intrínsecamente más resistentes a la fatiga. Por esta razón se recomiendan espesores de 200 mm y losas de 4 metros de longitud para disminuir los esfuerzos internos de tracción y prolongar la vida útil de la estructura.

En el marco del tercer objetivo, que se centra en los ensayos de densidad, porosidad, permeabilidad e infiltración, se valida que los valores de densidad y porosidad de los testigos extraídos cumplen con los rangos comunes para hormigones permeables, respaldando la idoneidad del material utilizado en la construcción de ciclovías. No obstante, los resultados de permeabilidad e infiltración exhiben variaciones significativas entre los puntos de medición, teniendo un coeficiente de variación de 0,66 y 0,50 para los métodos NCAT Y ASTM C1701 respectivamente, atribuibles a diferencias en la superficie y la interconexión de poros en el pavimento permeable. Además, se destaca la diferencia entre las mediciones obtenidas con el permeámetro NCAT y el infiltrómetro ASTM C1701, donde se

obtienen permeabilidades con un promedio de 0,73 cm/s para el ensayo NCAT y 0,079 cm/s para el ASTM C1701, este último método no cumple con el valor mínimo de permeabilidad establecido por la ACI Committee 522 (2010), estas variaciones se explican por la diferencia en la dirección del movimiento del flujo de agua y la diferencia del diámetro de los permeámetros utilizados, por esta razón que estos métodos de medición no son los más indicados para superficies de gran envergadura, se sugiere la utilización de métodos en donde se pueda inundar la superficie completa de pavimento.

Finalmente, para ampliar la comprensión de los pavimentos de hormigón permeable en ciclovías, se sugiere explorar líneas de investigación futura que se enfoquen en ensayos de deflectometría de impacto. La validación exhaustiva del programa EverFE 2.24 mediante ensayos en campo permitirá una mayor confianza en los resultados de los análisis estructurales. Además, se propone investigar el comportamiento real de los pavimentos de hormigón permeable frente a diversos diferenciales de temperatura. Este estudio podrá demostrar el comportamiento, resistencia y durabilidad del material en condiciones climáticas variables, contribuyendo a un diseño más preciso y adaptado a los desafíos específicos que enfrentan las ciclovías.

REFERENCIAS

- ACI Committee 522. (2010). *522R-10: Report on Pervious Concrete*.
- AlShareedah, O., Mostofa Haider, M., & Nassiri, S. (2020). Effect of Temperature Difference on the Thickness Design of Pervious Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 2674(11), 263–277. <https://doi.org/10.1177/0361198120943591>
- AlShareedah, O., & Nassiri, S. (2019). Methodology for Mechanistic Design of Pervious Concrete Pavements. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(2), 04019012. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000117>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete (ASTM C1701)*. 10.1520/C1701_C1701M-17A.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2021). *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete (ASTM C1754)*.
- Balbo, J. (2009). *Pavimentos de Concreto*. Oficina de Textos.
- Balbo, J. T. (2020). *Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia emergente*. Oficina de Textos .
- Batezini, R. (2012). *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Batezini, R. (2013). *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Bean, E. Z., Hunt, W. F., & Bidelsbach, D. A. (2007). Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates. *Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates*, 133(3). <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94372007133:3249>
- 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. *Construction and Building Materials*, 111, 262–274. <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>
- Covarrubias, J. P. (1988). Comportamiento de pavimentos de hormigón en Chile. *Revista de Ingeniería de Construcción*, N° 4.

- Davids, W. G., Wang, Z., Turkiyyah, G., Mahoney, J. P., Bush, D., Davids, W. G., Wang, Z., Turkiyyah, G., & Mahoney, J. P. (2003). Three-Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2. *Transportation Research Record*.
- Delatte, N., Mrkajic, A., & Miller, D. I. (2009). Field and laboratory evaluation of pervious concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2113, 132–139. <https://doi.org/10.3141/2113-16>
- Goede, W. (2009). *Pervious concrete: investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods*. Washington State University.
- Instituto Nacional de Normalización. (1968). *Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales*. NCh 148.
- Instituto Nacional de Normalización. (2001). *Testigos de hormigón endurecido - Parte 1: Extracción y ensayo*. NCh 1171.
- Instituto Nacional de Normalización. (2005). *Agua Potable - Parte 1 - Requisitos*. NCh 409.
- Instituto Nacional de Normalización. (2016). *Hormigon-Requisitos generales*.
- Joshaghani, A., Ramezani pour, A. A., Ataei, O., & Golroo, A. (2015). Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 101, 317–325. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.094>
- Kevern, J. T., Asce, M., 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))
- Khazanovich, L., Yu, H., Rao, J., Galasova, K., Shats, E., & Jones, R. (2000). ISLAB2000—finite element analysis program for rigid and composite pavements: user’s guide. *ISLAB2000—Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite Pavements: User’s Guide*.
- Li, H., Kayhanian, M., & Harvey, J. T. (2013). Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *Journal of Environmental Management*, 118, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2023). *Catastro de Ciclovías*. Biblioteca Digital de Transportes. <https://ciclovias.visorterritorial.cl/>
- MINVU. (2015). *Manual Vialidad Ciclo inclusiva, Recomendaciones de Diseño* .
- 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>

- Oviedo, I. (2022). *Evaluación de hormigones permeables con zeolita o pomacita como material de reemplazo parcial del cemento*. Universidad de Concepción.
- Portland Cement Association. (1984). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.
- Pradena, M., & Chaparro, B. (2019). Structural Analysis of Concrete Pavements: Short Slabs in Industrial Floors. *Revista Politécnica*, 43(2).
- San Martín, A. (2018). *Causas, efectos y análisis del alabeo de losas para pavimentos de hormigón*. Universidad de Concepción.
- SERVIU. (2018). *Manual de obras Viales, Pavimentación y Aguas Lluvias*.
- Spalvier, A., Díaz, A., Marrero, I., Marrero, T., Piellarisi, R., & Segura, L. (2021). *Recomendaciones sobre Pavimentos de Hormigón Permeable*.
- Suleiman, M. T., Gopalakrishnan, K., & Kevern, J. T. (2012). Structural Response of Pervious Concrete Pavement Systems Using Falling Weight Deflectometer Testing and Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 137(12), 907–917. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000295](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000295)
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004a). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004b). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association.
- Vancura, M., MacDonald, K., & Khazanovich, L. (2011). Structural analysis of pervious concrete pavement. *Transportation Research Record*, 2226, 13–20. <https://doi.org/10.3141/2226-02>
- Weiss, P. T., Kayhanian, M., Gulliver, J. S., & Khazanovich, L. (2019). Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(2), 143–162. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1279482>
- Yu, F., Sun, D., Wang, J., & Hu, M. (2019). Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 463–475. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.140>
- Zhong, R., & Wille, K. (2015). *Material design and characterization of high performance pervious concrete*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Rocío Urrutia Saavedra
Título de la memoria : Análisis de la utilización de pavimentos de hormigón permeable para su uso en ciclovías
Fecha de la presentación oral :
Profesor(es) Guía : Oscar Link Lazo
Profesor(es) Revisor(es) : Alejandra Sther Gesche
Concepto : Investigación
Calificación :

Resumen

La creciente urbanización y expansión de infraestructuras viales, como ciclovías en países como Chile, han generado una mayor impermeabilización del suelo. Aunque los pavimentos permeables podrían ser una solución efectiva, la falta de información y respaldo técnico ha limitado su aplicación en áreas como estacionamientos, aceras y ciclovías. Esta investigación se enfocó en analizar el desempeño estructural e hidráulico de pavimentos de hormigón permeable para ciclovías, definiendo mezclas y procedimientos, y utilizando el software EverFE 2.24 para el diseño estructural.

El objetivo del estudio fue analizar cómo los pavimentos de hormigón permeable podrían desempeñarse estructural e hidráulicamente en ciclovías. La investigación incluyó la definición de características de mezclas y procedimientos mediante una revisión bibliográfica, seguida de un diseño estructural utilizando el software EverFE 2.24. Los resultados sugieren que, para ciclovías, las losas de 4 metros con espesores de 200 mm son recomendables, ya que reducen sobre un 25% los esfuerzos críticos en comparación con las losas de 10 metros. Además, el análisis de fatiga reveló que el diferencial de temperatura afecta el número de aplicaciones de carga, disminuyendo a medida que aumenta la diferencia de temperatura y disminuye el espesor de la losa.

En relación a la permeabilidad del pavimento, se evidencia una variación sustancial de los resultados dependiendo del punto de medición. De manera análoga, se resalta la disparidad entre dos métodos de medición: NCAT y ASTM C1702, constatando que el método ASTM C1701 no satisface los requisitos mínimos de permeabilidad.

4.1 ANEXO ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CICLOVÍAS

Tabla A.4.1. Resultados de esfuerzos críticos de modelación en EverFE para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 10 metros

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Esesor de Losa (mm)	TELTD 0°C Max Stress (MPa)	TELTD - 10°C Max Stress (MPa)	TELTD - 15°C Max Stress (MPa)	TELTD - 16°C Max Stress (MPa)	TELTD - 19°C Max Stress (MPa)	TELTD - 21°C Max Stress (MPa)
a)	1	Borde	100	0,36	1,16	1,74	1,85	2,20	2,43
a)	1	Borde	110	0,33	1,14	1,71	1,83	2,17	2,40
a)	1	Borde	120	0,30	1,12	1,68	1,79	2,13	2,35
a)	1	Borde	150	0,23	1,06	1,59	1,70	2,02	2,23
a)	1	Borde	180	0,19	1,02	1,53	1,63	1,94	2,14
a)	1	Borde	200	0,17	1,00	1,50	1,60	1,90	2,10
b)	1	Centro	100	0,06	1,16	1,73	1,85	2,19	2,43
b)	1	Centro	110	0,06	1,14	1,71	1,82	2,16	2,39
b)	1	Centro	120	0,06	1,12	1,68	1,79	2,12	2,35
b)	1	Centro	150	0,06	1,06	1,59	1,70	2,02	2,23
b)	1	Centro	180	0,05	1,02	1,53	1,63	1,94	2,14
b)	1	Centro	200	0,05	1,01	1,51	1,61	1,91	2,11
c)	2	Borde	100	0,36	1,17	1,75	1,86	2,21	2,40
c)	2	Borde	110	0,33	1,15	1,72	1,84	2,18	2,40
c)	2	Borde	120	0,30	1,13	1,69	1,80	2,14	2,36
c)	2	Borde	150	0,23	1,07	1,60	1,70	2,02	2,23
c)	2	Borde	180	0,19	1,02	1,53	1,64	1,94	2,14
c)	2	Borde	200	0,17	1,00	1,50	1,60	1,91	2,11
d)	2	Centro	100	0,03	1,15	1,73	1,85	2,19	2,42
d)	2	Centro	110	0,06	1,14	1,71	1,82	2,16	2,39
d)	2	Centro	120	0,06	1,12	1,68	1,79	2,12	2,35
d)	2	Centro	150	0,06	1,07	1,60	1,70	2,02	2,23
d)	2	Centro	180	0,05	1,03	1,54	1,64	1,94	2,15
d)	2	Centro	200	0,05	1,01	1,51	1,61	1,91	2,11
e)	10	Centro	100	0,32	1,17	1,75	1,85	2,21	2,43
e)	10	Centro	110	0,33	1,13	1,70	1,81	2,18	2,38
e)	10	Centro	120	0,30	1,12	1,69	1,78	2,14	2,34
e)	10	Centro	150	0,23	1,07	1,60	1,70	2,02	2,23
e)	10	Centro	180	0,19	1,02	1,53	1,63	1,94	2,14
e)	10	Centro	200	0,17	1,00	1,50	1,60	1,91	2,10
f)	Veh	Centro	100	0,50	1,39	1,97	1,97	2,28	2,46
f)	Veh	Centro	110	0,44	1,26	1,80	1,84	2,23	2,39
f)	Veh	Centro	120	0,39	1,17	1,75	1,81	2,19	2,34
f)	Veh	Centro	150	0,27	1,12	1,65	1,74	2,07	2,26

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Esesor de Losa (mm)	TELTD 0°C Max Stress (MPa)	TELTD - 10°C Max Stress (MPa)	TELTD - 15°C Max Stress (MPa)	TELTD - 16°C Max Stress (MPa)	TELTD - 19°C Max Stress (MPa)	TELTD - 21°C Max Stress (MPa)
f)	Veh	Centro	180	0,20	1,08	1,57	1,69	1,99	2,20
f)	Veh	Centro	200	0,16	1,06	1,56	1,66	1,96	2,16
g)	Veh	Borde	100	0,96	1,61	1,97	2,06	2,28	2,52
g)	Veh	Borde	110	0,86	1,46	1,80	1,90	2,23	2,45
g)	Veh	Borde	120	0,76	1,31	1,75	1,86	2,19	2,41
g)	Veh	Borde	150	0,55	1,14	1,65	1,76	2,07	2,28
g)	Veh	Borde	180	0,40	1,08	1,57	1,67	1,98	2,18
g)	Veh	Borde	200	0,33	1,05	1,53	1,63	1,93	2,13

Tabla A.4.2. Resultados de esfuerzos críticos modelación en EverFE para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 4 metros

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Esesor de Losa (mm)	TELTD 0°C Max Stress (MPa)	TELTD - 10°C Max Stress (MPa)	TELTD - 15°C Max Stress (MPa)	TELTD - 16°C Max Stress (MPa)	TELTD - 19°C Max Stress (MPa)	TELTD - 21°C Max Stress (MPa)
a)	1	Borde	100	0,43	1,19	1,78	1,90	2,26	2,50
a)	1	Borde	110	0,40	1,18	1,77	1,88	2,24	2,47
a)	1	Borde	120	0,36	1,16	1,73	1,85	2,20	2,43
a)	1	Borde	150	0,30	1,06	1,59	1,70	2,01	2,22
a)	1	Borde	180	0,28	0,95	1,41	1,51	1,79	1,98
a)	1	Borde	200	0,27	0,86	1,29	1,37	1,63	1,80
b)	1	Centro	100	0,13	1,19	1,78	1,90	2,26	2,49
b)	1	Centro	110	0,13	1,17	1,76	1,88	2,23	2,46
b)	1	Centro	120	0,13	1,15	1,72	1,84	2,19	2,42
b)	1	Centro	150	0,12	1,05	1,58	1,68	2,00	2,21
b)	1	Centro	180	0,10	0,93	1,40	1,49	1,77	1,96
b)	1	Centro	200	0,10	0,85	1,27	1,36	1,61	1,78
c)	2	Borde	100	0,43	1,20	1,79	1,91	2,27	2,40
c)	2	Borde	110	0,40	1,19	1,77	1,89	2,24	2,40
c)	2	Borde	120	0,36	1,17	1,74	1,86	2,2	2,36
c)	2	Borde	150	0,30	1,07	1,60	1,60	2,01	2,23
c)	2	Borde	180	0,28	0,95	1,42	1,52	1,79	2,14
c)	2	Borde	200	0,27	0,87	1,30	1,38	1,63	2,11

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Esesor de Losa (mm)	TELTD 0°C Max Stress (MPa)	TELTD - 10°C Max Stress (MPa)	TELTD - 15°C Max Stress (MPa)	TELTD - 16°C Max Stress (MPa)	TELTD - 19°C Max Stress (MPa)	TELTD - 21°C Max Stress (MPa)
d)	2	Centro	100	0,05	1,19	1,78	1,90	2,25	2,49
d)	2	Centro	110	0,13	1,17	1,76	1,87	2,23	2,46
d)	2	Centro	120	0,13	1,15	1,72	1,84	2,18	2,41
d)	2	Centro	150	0,11	1,04	1,57	1,68	1,99	2,20
d)	2	Centro	180	0,10	0,92	1,39	1,48	1,76	1,95
d)	2	Centro	200	0,10	0,84	1,26	1,35	1,60	1,78
e)	10	Centro	100	0,32	1,20	1,79	1,91	2,27	2,50
e)	10	Centro	110	0,33	1,19	1,77	1,89	2,24	2,47
e)	10	Centro	120	0,30	1,17	1,74	1,86	2,2	2,43
e)	10	Centro	150	0,23	1,07	1,60	1,60	2,01	2,22
e)	10	Centro	180	0,19	0,95	1,42	1,52	1,79	1,98
e)	10	Centro	200	0,17	0,87	1,30	1,38	1,63	1,80
f)	Veh	Centro	100	0,50	1,61	1,97	2,05	2,31	2,50
f)	Veh	Centro	110	0,44	1,45	1,83	1,95	2,29	2,36
f)	Veh	Centro	120	0,39	1,31	1,80	1,92	2,26	2,28
f)	Veh	Centro	150	0,27	1,17	1,69	1,79	2,11	2,07
f)	Veh	Centro	180	0,20	1,07	1,53	1,62	1,90	1,81
f)	Veh	Centro	200	0,16	1,00	1,41	1,49	1,75	1,64
g)	Veh	Borde	100	0,95	1,40	1,90	2,00	2,30	2,55
g)	Veh	Borde	110	0,85	1,28	1,74	1,83	2,13	2,52
g)	Veh	Borde	120	0,76	1,16	1,62	1,72	2,06	2,49
g)	Veh	Borde	150	0,55	0,92	1,43	1,54	1,86	2,32
g)	Veh	Borde	180	0,41	0,79	1,25	1,35	1,63	2,09
g)	Veh	Borde	200	0,34	0,70	1,13	1,21	1,47	1,92

4.2 ANEXO ANÁLISIS DE FATIGA DE CICLOVÍAS

Tabla A.4.3. Resultados de análisis de fatiga mediante modelo ACPA para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 10 metros

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Espesor de Losa (mm)	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f
				TELTD 0°C	TELTD - 10°C	TELTD - 15°C	TELTD - 16°C	TELTD - 19°C	TELTD -21°C
a)	1	Borde	100	6,93E+124	1,26E+09	4,98E+03	1,68E+03	156,72	57,54
a)	1	Borde	110	4,97E+146	2,89E+09	6,96E+03	2,02E+03	183,28	64,45
a)	1	Borde	120	5,62E+183	6,91E+09	9,92E+03	2,96E+03	228,37	78,68
a)	1	Borde	150	∞	1,32E+11	3,29E+04	7,81E+03	450,39	134,91
a)	1	Borde	180	∞	1,30E+12	8,31E+04	1,88E+04	799,63	215,89
a)	1	Borde	200	∞	4,54E+12	1,38E+05	2,85E+04	1097,58	271,75
b)	1	Centro	100	∞	1,26E+09	5,55E+03	1,68E+03	164,99	57,54
b)	1	Centro	110	∞	2,89E+09	6,96E+03	2,22E+03	193,41	67,00
b)	1	Centro	120	∞	6,91E+09	9,92E+03	2,96E+03	241,79	78,68
b)	1	Centro	150	∞	1,32E+11	3,29E+04	7,81E+03	450,39	134,91
b)	1	Centro	180	∞	1,30E+12	8,31E+04	1,88E+04	799,63	215,89
b)	1	Centro	200	∞	2,40E+12	1,16E+05	2,47E+04	1012,00	256,22
c)	2	Borde	100	4,18E+125	8,50E+08	4,47E+03	1,54E+03	148,97	64,45
c)	2	Borde	110	4,82E+147	1,90E+09	6,21E+03	1,84E+03	173,83	64,45
c)	2	Borde	120	5,62E+183	4,44E+09	8,80E+03	2,68E+03	215,89	75,52
c)	2	Borde	150	∞	7,77E+10	2,85E+04	7,81E+03	450,39	134,91
c)	2	Borde	180	∞	1,30E+12	8,31E+04	1,65E+04	799,63	215,89
c)	2	Borde	200	∞	4,54E+12	1,38E+05	2,85E+04	1012,00	256,22
d)	2	Centro	100	∞	1,90E+09	5,55E+03	1,68E+03	164,99	59,72
d)	2	Centro	110	∞	2,89E+09	6,96E+03	2,22E+03	193,41	67,00
d)	2	Centro	120	∞	6,91E+09	9,92E+03	2,96E+03	241,79	78,68
d)	2	Centro	150	∞	7,77E+10	2,85E+04	7,81E+03	450,39	134,91
d)	2	Centro	180	∞	7,13E+11	7,07E+04	1,65E+04	799,63	204,25
d)	2	Centro	200	∞	2,40E+12	1,16E+05	2,47E+04	1012,00	256,22
e)	10	Centro	100	1,59E+159	8,50E+08	4,47E+03	1,68E+03	148,97	57,54
e)	10	Centro	110	5,64E+144	4,44E+09	6,21E+03	2,44E+03	173,83	69,69
e)	10	Centro	120	2,49E+182	6,91E+09	8,80E+03	3,27E+03	215,89	82,02
e)	10	Centro	150	∞	7,77E+10	2,85E+04	7,81E+03	450,39	134,91
e)	10	Centro	180	∞	1,30E+12	8,31E+04	1,88E+04	799,63	215,89
e)	10	Centro	200	∞	4,54E+12	1,38E+05	2,85E+04	1012,00	271,75
f)	Veh	Centro	100	1,89E+58	1,23E+06	6,39E+02	6,39E+02	106,57	51,60
f)	Veh	Centro	110	1,15E+78	3,75E+07	2,68E+03	1,84E+03	134,91	67,00
f)	Veh	Centro	120	5,65E+103	8,50E+08	4,47E+03	2,44E+03	164,99	82,02
f)	Veh	Centro	150	2,10E+230	6,91E+09	1,45E+04	4,98E+03	326,03	116,87
f)	Veh	Centro	180	∞	4,65E+10	4,42E+04	8,80E+03	5,54E+02	1,57E+02

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Espesor de Losa (mm)	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f
				TELTD 0°C	TELTD - 10°C	TELTD - 15°C	TELTD - 16°C	TELTD - 19°C	TELTD -21°C
f)	Veh	Centro	200	∞	1,32E+11	5,15E+04	1,27E+04	6,88E+02	1,93E+02
g)	Veh	Borde	100	8,39E+13	2,47E+04	6,39E+02	3,47E+02	106,57	42,01
g)	Veh	Borde	110	8,47E+17	2,88E+05	2,68E+03	1,10E+03	134,91	53,48
g)	Veh	Borde	120	1,05E+23	8,84E+06	4,47E+03	1,54E+03	164,99	62,03
g)	Veh	Borde	150	1,49E+48	2,89E+09	1,45E+04	4,02E+03	326,03	106,57
g)	Veh	Borde	180	2,32E+95	4,65E+10	4,42E+04	1,12E+04	5,95E+02	1,74E+02
g)	Veh	Borde	200	4,97E+146	2,28E+11	8,31E+04	1,88E+04	8,64E+02	2,28E+02

Tabla A.4.4. Resultados de análisis de fatiga mediante modelo ACPA para distintos escenarios de carga en una losa de longitud de 4 metros

Caso	N° Bicicletas	Ubicación	Espesor de Losa (mm)	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f
				TELTD 0°C	TELTD - 10°C	TELTD - 15°C	TELTD - 16°C	TELTD - 19°C	TELTD -21°C
a)	1	Borde	100	7,70E+80	3,98E+08	3,27E+03	1,10E+03	116,87	44,91
a)	1	Borde	110	5,14E+99	5,79E+08	3,62E+03	1,30E+03	128,52	49,80
a)	1	Borde	120	3,70E+119	1,26E+09	5,55E+03	1,68E+03	156,72	57,54
a)	1	Borde	150	2,06E+189	1,32E+11	3,29E+04	7,81E+03	481,96	141,72
a)	1	Borde	180	3,19E+212	2,09E+14	7,92E+05	1,16E+05	2959,90	594,54
a)	1	Borde	200	2,10E+230	3,64E+17	1,54E+07	1,94E+06	18800,21	2682,68
b)	1	Centro	100	∞	3,98E+08	3,27E+03	1,10E+03	116,87	46,46
b)	1	Centro	110	∞	8,50E+08	4,02E+03	1,30E+03	134,91	51,60
b)	1	Centro	120	∞	1,90E+09	6,21E+03	1,84E+03	164,99	59,72
b)	1	Centro	150	∞	2,28E+11	3,81E+04	9,92E+03	516,32	148,97
b)	1	Centro	180	∞	8,09E+14	9,84E+05	1,65E+05	3622,73	687,83
b)	1	Centro	200	∞	2,53E+18	2,77E+07	2,46E+06	24719,57	3271,59
c)	2	Borde	100	2,01E+81	2,76E+08	2,96E+03	1,01E+03	111,57	44,91
c)	2	Borde	110	5,14E+99	3,98E+08	3,62E+03	1,19E+03	128,52	48,09
c)	2	Borde	120	3,70E+119	8,50E+08	4,98E+03	1,54E+03	156,72	57,54
c)	2	Borde	150	5,52E+190	7,77E+10	2,85E+04	2,85E+04	481,96	134,91
c)	2	Borde	180	3,19E+212	1,13E+14	6,41E+05	9,82E+04	2959,90	594,54
c)	2	Borde	200	2,79E+228	1,60E+17	1,16E+07	1,54E+06	18800,21	2435,68
d)	2	Centro	100	∞	3,98E+08	3,27E+03	1,10E+03	122,52	46,46
d)	2	Centro	110	∞	8,50E+08	4,02E+03	1,41E+03	134,91	51,60

Caso	N° Bicletas	Ubicación	Espesor de Losa (mm)	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f	N_f
				TELTD 0°C	TELTD - 10°C	TELTD - 15°C	TELTD - 16°C	TELTD - 19°C	TELTD -21°C
d)	2	Centro	120	∞	1,90E+09	6,21E+03	1,84E+03	173,83	62,03
d)	2	Centro	150	∞	3,99E+11	4,42E+04	9,92E+03	553,73	156,72
d)	2	Centro	180	∞	1,58E+15	1,23E+06	1,98E+05	4019,08	741,16
d)	2	Centro	200	∞	6,25E+18	3,75E+07	3,14E+06	28463,25	3271,59
e)	10	Centro	100	1,59E+159	2,76E+08	2,96E+03	1,01E+03	111,57	44,91
e)	10	Centro	110	5,64E+144	3,98E+08	3,62E+03	1,19E+03	128,52	49,80
e)	10	Centro	120	2,49E+182	8,50E+08	4,98E+03	1,54E+03	156,72	57,54
e)	10	Centro	150	∞	7,77E+10	2,85E+04	2,85E+04	481,96	141,72
e)	10	Centro	180	∞	1,13E+14	6,41E+05	9,82E+04	2959,90	594,54
e)	10	Centro	200	∞	1,60E+17	1,16E+07	1,54E+06	18800,21	2682,68
f)	Veh	Centro	100	3,84E+59	2,47E+04	6,39E+02	3,70E+02	93,24	44,91
f)	Veh	Centro	110	1,80E+79	3,49E+05	2,02E+03	7,41E+02	101,86	75,52
f)	Veh	Centro	120	8,93E+104	8,84E+06	2,68E+03	9,34E+02	116,87	106,57
f)	Veh	Centro	150	2,79E+228	8,50E+08	8,80E+03	2,96E+03	256,22	326,03
f)	Veh	Centro	180	∞	7,77E+10	8,31E+04	2,15E+04	1,10E+03	2,44E+03
f)	Veh	Centro	200	∞	6,30E+12	7,92E+05	1,65E+05	4,47E+03	1,65E+04
g)	Veh	Borde	100	1,53E+14	9,84E+05	1,10E+03	5,16E+02	97,42	38,12
g)	Veh	Borde	110	1,30E+18	2,06E+07	4,98E+03	2,02E+03	228,37	42,01
g)	Veh	Borde	120	1,67E+23	1,26E+09	2,15E+04	6,21E+03	347,10	46,46
g)	Veh	Borde	150	3,91E+47	1,58E+15	5,21E+05	7,07E+04	1540,43	89,28
g)	Veh	Borde	180	6,14E+92	4,11E+21	5,12E+07	3,14E+06	1,88E+04	2,88E+02
g)	Veh	Borde	200	9,38E+140	7,46E+27	4,44E+09	1,94E+08	2,38E+05	9,34E+02