



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



**ACTUALIZACIÓN DE LA GUÍA CHILENA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE  
ADOQUNES DE HORMIGÓN PARA CALLES, CAMINOS Y PASAJES**

POR

**María Paz Puentes Ríos**

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

Profesor Guía  
Tomás Echaveguren Navarro

Profesional Supervisor  
Luis Merino Quilodrán

Julio 2024  
Concepción (Chile)  
© 2024 María Paz Puentes Ríos

© 2024 María Paz Puentes Ríos

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

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a mi padre, Marcelo, a mis hermanas Catalina y Florencia, a mi abuelo Víctor, a mis tíos y primos, a mi pareja, amigas y amigos, quienes siempre confiaron en mí y me apoyaron incondicionalmente en todas las circunstancias de mi vida y mi carrera. También está dedicado a mis familiares que me acompañan desde el cielo, mis abuelos Jorge, Margarita y Mila, por brindarme paz, amor y alegría todos los días. Todo esto es gracias a ustedes.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi profesor guía Tomás Echaveguren y al profesor Luis Merino, por brindar su dedicación, conocimiento y paciencia, para el desarrollo de mi trabajo final de la carrera, gracias por compartir su experiencia.

## RESUMEN

Los pavimentos de adoquines de hormigón tienen numerosas ventajas, entre ellas, su durabilidad ante ambientes agresivos, su rapidez en puesta de operación, su mantenimiento debido a que es fácil de reponer, su contribución a la seguridad vial por su condición de operación y su reutilización. En el año 2013 no existía ni una norma que definiera las especificaciones y diseño de los pavimentos de adoquines de hormigón. Por esta razón el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, publica en el año 2013 la segunda edición del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón” con la finalidad de proponer un método de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón para uso vehicular en calles, caminos y pasajes.

Con el tiempo, se ha identificado una brecha en el estado del arte, principalmente por la publicación de la primera norma de adoquines de hormigón en el país. El Manual adaptó el método de diseño de pavimento de adoquines de hormigón del Reino Unido del año 2010, sin embargo, este fue actualizado en 2021. Por las razones mencionadas anteriormente, se genera la necesidad de actualizar el Manual del ICH. Este trabajo revisa el Manual para identificar oportunidades de actualización. Luego, se realiza una revisión del estado del arte para proponer mejoras en las especificaciones del adoquín, las solicitudes de diseño y el procedimiento de diseño de pavimentos. Finalmente, se elaboran ejemplos de diseño para distintos tipos de tráfico vehicular.

Se concluye que los cambios en el estado del arte se deben a actualizaciones en las normas que definen las especificaciones de materiales y las solicitudes de diseño. En relación con las solicitudes de diseño, se propone relacionar directamente las categorías de tráfico con el dimensionamiento del pavimento, de esta manera, se sistematiza todo el proceso de dimensionamiento de pavimentos de adoquines de hormigón.

Para la inclusión de las propuestas mencionadas, se recomienda integrar los capítulos de “Solicitaciones de diseño” y “Diseño estructural” del manual del ICH, ya que se abordan de manera separada, lo que genera una discontinuidad en el proceso de diseño. La propuesta consiste en unificar el diseño de pavimentos en un solo capítulo, incluyendo un nuevo diseño sistemático para los pavimentos de tráfico vehicular. Este capítulo detallará las especificaciones de materiales, las

solicitaciones de diseño y presentará ejemplos de diseño desarrollados según el nuevo método de diseño, con el objetivo de mejorar la comprensión del lector sobre el proceso de diseño de pavimentos.

## ABSTRACT

Concrete paver pavements offer numerous advantages, including durability in aggressive environments, quick operational readiness, easy maintenance due to simple replacement, contribution to road safety due to their operational condition, and reusability. In 2013, there was no standard defining the specifications and design of concrete paver pavements. For this reason, the Chilean Cement and Concrete Institute published the second edition of the "Concrete Paver Pavement Design Manual" in 2013 to propose a design method for concrete paver pavements for vehicular use on streets, roads, and alleys.

Over time, a gap in the state of the art has been identified, mainly due to the publication of the first concrete paver standard in the country. The Manual adapted the 2010 concrete paver pavement design method from the United Kingdom; however, this was updated in 2021. For the reasons, there is a need to update the ICH Manual. This work reviews the Manual to identify opportunities for updates. It then examines the state of the art to propose improvements in paver specifications, design loads, and the pavement design procedure. Finally, design examples are developed for different types of vehicular traffic.

This work concludes that changes in the state of the art are due to updates in the standards that define material specifications and design stresses. In relation to design stresses, it is proposed to increase the categories of vehicular traffic, thus optimizing the total thickness in the design of concrete paver pavements.

To include the proposals, it is recommended to integrate the chapters "Design Stresses" and "Structural Design" of the ICH Manual, as they are currently addressed separately, creating a discontinuity in the design process. The proposal consists of unifying the pavement design into a single chapter, including a new systematic design for vehicular traffic pavements. This chapter will detail material specifications, design solicitations, and present design examples developed according to the new design method, with the aim of improving the reader's understanding of the pavement design process.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.1. Objetivo general .....	1
1.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcances.....	2
1.4. Plan de trabajo .....	2
1.5. Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6. Organización de la memoria.....	3
<b>2. ANÁLISIS DEL MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CHILE .....</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción.....	5
2.2. Contenidos del “Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón”.....	5
2.3. Especificaciones de adoquines de hormigón del Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón 2013.....	7
2.4. Especificaciones de base granular del Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón 2013 .....	9
2.5. Especificaciones de base granular tratada con cemento del Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón 2013 .....	10
2.6. Solicitaciones de diseño en vías urbanas.....	11
2.7. Diseño de pavimentos vehiculares .....	15
2.8. Conclusiones.....	17
<b>3. PROPUESTAS PARA EL MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTO DE ADOQUINES DE HORMIGÓN .....</b>	<b>19</b>

## Índice de contenido

3.1	Introducción.....	19
3.2	Oportunidades de mejora a implementar en la nueva versión del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón”.....	19
3.3	Especificaciones de adoquines de hormigón.....	20
3.4	Especificaciones de bases granulares.....	23
3.5	Especificaciones de bases granulares tratadas con cemento.....	23
3.6	Propuestas de solicitudes de diseño en calles, caminos y pasajes.....	24
3.7	Conclusiones.....	26
<b>4.</b>	<b>PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE TRÁFICO VEHICULAR – PEATONAL Y EJEMPLOS DE DISEÑO A INCORPORAR EN EL MANUAL.....</b>	<b>28</b>
4.1	Introducción.....	28
4.2	Propuestas de procedimiento de diseño para pavimentos vehiculares y peatonales.....	28
4.2.1	Cálculo de Tránsito Medio Diario Anual.....	30
4.2.2	Dimensionamiento de los pavimentos de adoquines de hormigón.....	32
4.3	Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico peatonal.....	35
4.4	Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico liviano.....	37
4.5	Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico medio.....	42
4.6	Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico pesado.....	46
4.7	Conclusiones.....	52
<b>5.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>57</b>

**ÍNDICE TABLAS**

Tabla 2.1 Especificaciones de adoquines de hormigón . . . . .	7
Tabla 2.2 Factores de espesor equivalente y resistencias características de bases tratadas con cemento . . . . .	10
Tabla 2.3 Tasas de crecimiento de tráfico por tipo de vehículo. . . . .	12
Tabla 2.4 Factores de eje equivalente para vías urbanas según categoría de vía. . . . .	12
Tabla 2.5 Clasificación de tráfico según nivel de solicitaciones . . . . .	13
Tabla 2.6 Determinación de espesores de subbase y suelo mejorado . . . . .	15
Tabla 2.7 Determinación de espesor de subbase granular. . . . .	16
Tabla 2.8 Determinación de espesor de base, cama de arena y adoquín de hormigón. . . . .	16
Tabla 2.9 Espesores de la subbase, base tratada, cama de arena y adoquines para tráficos medios, livianos y peatonales. . . . .	17
Tabla 3.1 Resumen de propuesta de especificaciones de adoquines de hormigón. . . . .	20
Tabla 3.2 Categorías de tráfico según Ejes Estándar Acumulados para sistemas de instalación no confinado y confinado en pavimento de adoquines de hormigón. . . . .	24
Tabla 3.3 Promedio de las tasas de crecimiento de tráfico por tipo de vehículo . . . . .	26
Tabla 4.1 Espesores de subbase, base, cama de arena y adoquín de hormigón mínimos para una superficie no ligada. . . . .	32
Tabla 4.2 Espesores de subbase, base, capa de mortero y adoquín de hormigón mínimos para una superficie ligada. . . . .	33
Tabla 4.3 Aparejo según categoría de tráfico. . . . .	34
Tabla 4.4 Composición vehicular para tráfico liviano. . . . .	37
Tabla 4.5 Tasas de crecimiento, factor de equivalencia y FEE . . . . .	38
Tabla 4.6 Proyección TMDA para tráfico liviano. . . . .	38
Tabla 4.7 Ejes Equivalentes obtenidos para tráfico liviano. . . . .	39
Tabla 4.8 Composición vehicular para tráfico medio. . . . .	42
Tabla 4.9 Tasas de crecimiento, Factor de equivalencia y FEE. . . . .	42

Índice de Tablas

Tabla 4.10 Proyección TMDA para tráfico medio..... 42

Tabla 4.11 Ejes Equivalentes obtenidos para tráfico medio. .... 44

Tabla 4.12 Composición vehicular para tráfico pesado..... 47

Tabla 4.13 Tasa de crecimiento, factor de equivalencia y FEE. .... 47

Tabla 4.14 Proyección TMDA para tráfico pesado. .... 48

Tabla 4.15 Ejes Equivalentes obtenidos para tráfico pesado..... 49

**ÍNDICE FIGURAS**

Figura 4.1 Diagrama de flujo del nuevo procedimiento de diseño de pavimento de adoquines de hormigón.....	29
Figura 4.2 Aparejos utilizados en Chile y el sentido de circulación de los vehículos.....	34
Figura 4.3 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico peatonal. ....	36
Figura 4.4 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico liviano.....	41
Figura 4.5 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico medio.....	46
Figura 4.6 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico pesado.....	51

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

El Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH) publicó en 1991 la segunda edición del libro "Pavimentos de Adoquines: Manual de diseño y Construcción", el único manual en el país dedicado al diseño y construcción de pavimentos de adoquines, en conjunto con el Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Este manual se basó en los trabajos de John Knapton, de Gran Bretaña, y Brian Shackel, de Australia. En 2013, tras 20 años de avances en investigación y tecnología, y debido al aumento de la demanda de tráfico, el ICH publicó la tercera edición del "Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón". Esta última edición se centra en el diseño estructural de pavimentos de adoquines de hormigón para uso vehicular y peatonal, incluyendo aplicaciones portuarias y aeroportuarias.

Dado que han surgido brechas en el estado del arte de los adoquines y del método de diseño de los pavimentos de adoquines desde la última publicación del "Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón" en el año 2013, es necesario actualizar dicho manual para usos vehiculares y peatonales mediante el reconocimiento de todos los aspectos que se puedan mejorar, en tanto a las especificaciones de los materiales, solicitudes y proceso de diseño.

Este trabajo propone actualizar el "Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón" en términos de especificaciones de materiales, solicitudes de diseño y diseño estructural, mediante la identificación de áreas con potencial de mejora en el estado del arte del adoquín, para aplicación en calles, caminos y pasajes.

### 1.1 Objetivo general

Actualizar el método de diseño de pavimento de adoquines de calles, caminos y pasajes del "Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón".

## **1.2 Objetivos específicos**

Identificar oportunidades de actualización de diseño de pavimentos de adoquines en calles, caminos y pasajes.

Formular un proceso de diseño de pavimento de adoquines en calles, caminos y pasajes.

Elaborar ejemplos de aplicación del proceso de diseño para pavimentos de adoquines en calles, caminos y pasajes.

## **1.3 Alcances**

Sólo se considera el diseño de pavimentos de uso vehicular y peatonal del ICH (2013) para este trabajo.

Para el diseño de pavimentos de adoquines se utilizó el método de diseño del Reino Unido al no existir métodos calibrados para Chile.

## **1.4 Plan de trabajo**

Se identificaron oportunidades para actualizar el "Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón". Para ello, se describieron los procedimientos de diseño actuales del manual y se señalaron los aspectos mejorables. Dado que la metodología del manual se basa en las normas del Reino Unido, se realizó una revisión bibliográfica tanto nacional como del Reino Unido sobre pavimentos de adoquines de hormigón. Esto permitió generar propuestas de actualización en cuanto a especificaciones de materiales, solicitudes de diseño y procedimientos de diseño de pavimentos de adoquines en calles, caminos y pasajes. Finalmente, se elaboraron ejemplos de diseño para pavimentos de adoquines destinados a tráfico pesado, medio, liviano y peatonal, utilizando la propuesta de diseño actualizada.

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

Se identifican oportunidades de mejora en el Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón del ICH, en tanto a las especificaciones de los adoquines, solicitudes de diseño y procedimientos de diseño, debido a que desde el año 2013, las normas se han ido actualizando.

Las especificaciones de materiales han sido actualizadas con la publicación de la primera norma chilena de adoquines de hormigón, NCh 3731/1. Esta actualización incluye la revisión de todos los documentos de referencia, sin embargo, solo presentan variación los criterios que describen las dimensiones, resistencia a la compresión, resistencia a ciclos de hielo/deshielo y resistencia al deslizamiento.

Se formula un proceso de diseño de pavimento de adoquines de hormigón, en cual se va a relacionar directamente con nuevas categorías de tráfico propuestas. De esta manera se tiene un diseño con menor cantidad de pasos que lo propuesto con el método vigente.

Se elaboran ejemplos de aplicación del proceso de diseño para pavimentos de adoquines de hormigón, considerando distintos tipos de tráfico, en donde, se obtienen los espesores mínimos de cada capa del pavimento y el aparejo de adoquines recomendado.

Se ejecutan los ejemplos de aplicación con el método de diseño actual y propuesto. Con el nuevo método se obtienen reducciones en las capas de pavimento para la mayoría de las categorías de tráfico.

Al implementar este nuevo método se consigue una utilización más eficiente de materiales y recursos económicos sin comprometer la resistencia de los pavimentos. Esto se debe a que el cálculo de los espesores del método propuesto se realizó con el fin de evitar el sobredimensionamiento de la subbase granular.

### **1.6 Organización de la memoria**

## Capítulo 1: Introducción

El primer capítulo plantea la problemática, en donde se propone actualizar el Manual de pavimentos de adoquines de hormigón del ICH (2013), se propone el objetivo general, los objetivos específicos, el plan de trabajo y los principales resultados y conclusiones.

El segundo capítulo presenta un resumen de ICH (2013), se describen las especificaciones de materiales, solicitudes de diseño y diseño de pavimentos, haciendo un diagnóstico de las potenciales mejoras.

El tercer capítulo contiene propuestas de actualización para el manual considerando especificaciones de materiales, solicitudes de diseño y procesos de diseño de pavimentos de adoquines en calles, caminos y pasajes.

El cuarto capítulo contiene la descripción del nuevo proceso de diseño y la ejecución esta, mediante ejemplos de diseño de pavimentos para tráfico pesado, medio, liviano y peatonal.

El quinto capítulo expone conclusiones obtenidas del trabajo, en los aspectos de especificaciones, solicitudes y dimensionamiento.

## **2. ANÁLISIS DEL MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CHILE**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo, se describe el “Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón” del ICH (2013). Se detalla el contenido en cada capítulo, en especial, las especificaciones del adoquín de hormigón, el cálculo de las solicitaciones y el proceso de diseño de los pavimentos de adoquines. Posteriormente, se hace un diagnóstico de las oportunidades de mejoras del manual existente.

### **2.2 Contenidos del “Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón”**

En el primer capítulo del Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón se distinguen los tres tipos de pavimentos de adoquines: los pavimentos de adoquines de hormigón, pavimentos permeables de adoquines porosos y pavimentos peatonales de adoquines. También se detallan los atributos de estos pavimentos en términos de: diversidad, calidad, durabilidad, rapidez de puesta en operación, mantenimiento, condición de operación y reutilización. Continuando con el punto anterior se muestra un esquema del proceso tecnológico de pavimentación con adoquines de hormigón. Para finalizar se describen e ilustran las aplicaciones de los pavimentos de adoquines según el nivel de solicitud y grupo de aplicación.

El segundo capítulo se titula “Especificaciones y Ensayos para Adoquines de Hormigón” en donde se habla acerca de las especificaciones de las características esenciales, con el objetivo de reunir todos los requisitos que debe cumplir el adoquín para asegurar un nivel de calidad adecuado. Se menciona la clasificación de los adoquines en tipo “A”, “B” y “C” los cuales se dividen según las condiciones de trabazón que garantizan. Se describen las especificaciones técnicas para los adoquines de hormigón mencionando los requerimientos físicos que debe cumplir cada pieza individual según la norma ASTM C936-01: Dimensiones, resistencia, absorción, resistencia a la abrasión, resistencia a los ciclos de hielo y deshielo.

El tercer capítulo se titula "Comportamiento Estructural de los Pavimentos de Adoquines", se revisan los primeros ensayos sobre su comportamiento y se describe la típica estructura de un pavimento, incluyendo adoquines, cama de arena, base, subbase y suelo de fundación. Se discuten varios ensayos como los de Knapton, Shackel, ARRB y Rotterdam, junto con otros estudios sobre el comportamiento de los adoquines. Se analiza el estado de tensiones en los pavimentos de adoquines, utilizando modelos como las ecuaciones de Boussinesq. Se detalla la trabazón mecánica, el efecto de la forma y aparejo del adoquín, el ancho de la junta y el comportamiento frente a la fatiga. Se mencionan factores clave que influyen en el desempeño del pavimento, como el espesor, forma y resistencia mecánica del adoquín, el aparejo y el ancho de la junta. También se describen las características necesarias de la cama de arena, base, subbase y subrasante.

El cuarto capítulo se titula "Cálculo de solicitaciones de diseño", en donde se especifica cómo calcular las solicitaciones de diseño según el tipo de uso que se le dará al pavimento, para esto, será necesario calcular la demanda de tráfico, los factores de eje equivalente, ejes equivalentes acumulados. Adicionalmente, se detalla como calcular las solicitaciones en superficies terrestres portuarias y aeroportuarias.

El quinto capítulo se titula "Diseño estructural de los pavimentos de adoquines" en este desarrollan los métodos para el diseño estructural de los pavimentos de adoquines para cada uso, vehicular y peatonal, portuario y aeroportuario. Se resumen las especificaciones provisorias para adoquines de hormigón y de todos los elementos que componen este tipo de pavimentos. Se proponen métodos de diseño para tráfico pesado, medio, liviano y peatonal, en donde se especifican los espesores que debe tener cada capa según las solicitaciones. También se proponen métodos de diseño portuarios y aeroportuarios con sus ejemplos respectivos.

El sexto capítulo se titula "Mantenimiento de pavimentos de adoquines" en donde se habla de las tareas intermedias que se hacen en el proceso de planificación de mantenimiento del pavimento, para ello se detallan los deterioros, la auscultación y la evaluación de estado en pavimentos de adoquines.

### 2.3 Especificaciones de adoquines de hormigón del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón “

Los adoquines de hormigón deben cumplir una serie de especificaciones de fabricación y desempeño, para poder garantizar durabilidad.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de las especificaciones de adoquines de hormigón con sus criterios de aceptación y sus normativas de referencia, elaborado por el “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón”.

Se analizan los criterios y normativas de referencia que definen las especificaciones de los adoquines de hormigón, según el manual del ICH. Además, se debe considerar que se ha publicado en nuestro país la norma NCh 3731/1:2024, que establece nuevos criterios para estas especificaciones. Por lo tanto, es necesario incorporar esta norma en una nueva versión del manual.

**Tabla 2.1 Especificaciones de adoquines de hormigón (ICH, 2013).**

<b>Especificación</b>	<b>Criterio</b>	<b>Normativa de referencia</b>
Dimensión	Largo: variable $\pm 2$ mm Ancho: variable $\pm 2$ mm Espesor: 60,80,100 mm; variable $\pm 3$ mm Largo/Ancho $<4$ Largo/espesor $<4$	Dimensiones: NTC 2017-04. Espesor: NTC 2017-04. Tolerancias: ASTM C936-01
Resistencia a la flexotracción	Mínimo individual: 3 MPa Mínimo promedio: 4MPa	Ensayo: BSI 6717 2001 Valores: BSI 6717 2001
Resistencia a la compresión	Mínimo individual: 50 MPa Mínimo promedio: 55MPa	Ensayo: M.C.-V.8(2010): 8.402.11 (LNV 82) Valores: ASTM C936-01
Resistencia a ciclos de	Pérdida de masa máxima: $<1\%$ en	Ensayo: ASTM C1645-09

<b>Especificación</b>	<b>Criterio</b>	<b>Normativa de referencia</b>
hielo/deshielo	50 ciclos	Valores: ASTM C936-01
Resistencia a la Abrasión	Pérdida volumen: 15 cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> Pérdida de espesor: <3mm	Ensayo: ASTM C1138 Valores: ASTM C936-01
Absorción	Máximo individual: 7% Máximo promedio: 5 %	Ensayo: ASTM C1585-11 Valores: ASTM C936-01
Resistencia al deslizamiento	>65BPN (Calle de rodaje) >55BPN (Vehicular) >40BPN (Peatonal)	Ensayo: M.C.-V.8(2010): 8.602.24 Valores: M.C.-V.5(2010): 5.408.303c AS/NZS 3661.1:1993

Se detectan las siguientes oportunidades de mejoras para cada especificación:

- Dimensiones: Cambian los valores de ancho, largo y espesor, debido a que se actualiza la Norma ASTM.
- Resistencia a la compresión: En esta especificación en particular, se debe cambiar la normativa de referencia por la nueva normativa chilena de adoquines (NCh 3731/1:2024), por lo que cambian los valores de la resistencia mínima individual y promedio.
- Resistencia a los ciclos de hielo/deshielo: La normativa de referencia y los ensayos que miden los valores se actualizan, por lo que los valores de resistencia a los ciclos de hielo/deshielo cambian.
- Resistencia a la abrasión: Se debe actualizar normativa de referencia, ensayos y valores.
- Absorción: Se debe actualizar normativa de referencia, ensayos y valores.

- Resistencia al deslizamiento: Se deben actualizar las normativas que definen el ensayo y los valores, debido a una modificación realizada al método de ensayo aplicada a la resistencia al deslizamiento en adoquines de hormigón.

#### **2.4 Especificaciones de base granular del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón “**

Según el Manual del ICH (2013) en el diseño de vías administradas por la Dirección de Vialidad o por la Coordinación General de Concesiones, las bases granulares deben cumplir con las siguientes especificaciones mínimas:

- Materiales: El equivalente de arena será de mínimo 25%, las sales solubles no serán mayor a 4%. (Ministerio de Obras Públicas, 2010a)
- La capacidad de soporte (CBR) debe ser mayor o igual a 80%; la fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de Los Ángeles, de no más de 35%; el porcentaje mínimo de material chancado es del 50%. (Ministerio de Obras Públicas, 2010a)

En el diseño de vías urbanas, las bases granulares deben cumplir con las siguientes especificaciones mínimas:

- Materiales: El material a utilizar debe estar constituido por un suelo del tipo grava arenosa. Definido como base una capa de agregados pétreos muy bien graduados y provenientes de un proceso de producción mecanizado de chancado y selección, homogéneamente revuelto, libre de grumos o terrones de arcilla, de materiales vegetales o de cualquier otro material perjudicial. El equivalente de arena debe ser de un mínimo del 50% (NCh 1325 of 1978), el porcentaje de sales solubles totales no debe superar un 4% (NCh 1444/1 of 1980) (MINVU, 2008).

- La capacidad de soporte (CBR) debe ser mayor o igual a 80%; el agregado grueso debe tener un desgaste inferior a un 35%, medida por el ensaye de Los Ángeles (NCh 1369); el porcentaje de partículas chancadas debe ser mayor que el 50%, y que, además, el 70% mínimo de las partículas retenidas en el tamiz N°4 ASTM tengan, a lo menos, dos caras fracturadas mecánicamente (MINVU, 2008).

Como oportunidad de mejora se detecta que el “Manual de diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón” debe referenciar los documentos actualizados que hacen referencia a los materiales y a la graduación de la base granular.

### 2.5 Especificaciones de base granular tratada con cemento del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón “

Las bases granulares tratadas con cemento se refieren a materiales dosificados deben cumplir una resistencia característica a la compresión a 7 días entre 2,5 y 4,5 MPa, con dosis de cemento inferiores al 5% en peso. (Ministerio de Obras Públicas, 2010a)

En tanto a la resistencia característica de la base granular tratada con cemento, si bien el Manual de Carreteras establece un valor de referencia, para efectos del ICH (2013) y dependiendo del diseño, es posible seleccionar otras resistencias y calcular en consecuencia de los espesores equivalentes al material de referencia (BTGC3) según la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Factores de espesor equivalente y resistencias características de bases tratadas con cemento (ICH, 2013).**

Tipo de base	Resistencia característica (MPa)		Factor de espesor equivalente
	ASTM	NCH	
BGTC1	3	4,5	1,6
BGTC2	5	7,0	1,2
BGTC3	8	10	1,0
BGTC4	12	15	0,8
BGTC5	20	25	0,7

Como oportunidad de mejora se propone que el Manual referencie los documentos actualizados que definen los materiales y las resistencias características de la base granular tratada con cemento, posteriormente se debe comparar si la resistencia exigida por el Manual de Carreteras coincide con la normativa de la BSI.

## **2.6 Solicitaciones de diseño en vías urbanas según “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón “**

Al momento de diseñar un pavimento, es fundamental conocer las solicitaciones que se van a ejercer sobre este, con el fin de que el pavimento tenga un buen desempeño durante su vida útil, es por esta razón que se calculan las solicitaciones de diseño.

Para calcular las solicitaciones de tráfico vehicular, se comienza definiendo la zonificación, luego, se determina la demanda actual de tráfico y se proyecta su crecimiento, posteriormente se estiman los factores de equivalencia de carga, y finalmente, se calcula la solicitud acumulada.

Para vías urbanas, según el Manual del ICH se estima la demanda de tráfico según el Manual de Diseño y Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana (MIDEPLAN, 1988). El flujo vehicular medido se expresa como Tránsito Medio Diario Anual (TMDA, en veh/día-año) en cada dirección del tráfico.

Para los años de vida útil del pavimento se realiza proyección de tránsito, a través de las tasas de crecimiento de tráfico por tipo de vehículo.

Se deben considerar los siguientes datos: flujo total y grado de saturación para así poder determinar el corte temporal en el cual se produce la saturación.

Para calcular las solicitaciones, la versión vigente el Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón sugiere considerar los siguientes factores:

- Tasa de crecimiento de tráfico por tipo de vehículo (MIDEPLAN, 1988)

- Factores de eje equivalente para vías urbanas, de acuerdo con el método AASHTO 1993 (NHI, 1993) según la adaptación de (Rada et al., 1990)

El manual del ICH (2013) sugiere proyecciones de tránsito a partir de estudios específicos de acuerdo con MIDEPLAN (1988) o MOP (1997), sin embargo, en caso de ausencia de datos que permitan establecer las tasas de crecimiento, es posible utilizar los datos de la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Tasas de crecimiento de tráfico por tipo de vehículo (MIDEPLAN, 1988).**

Vehículos tipo	Tasa de crecimiento (%)
Automóviles	8
Camionetas	7
Bus urbano	7
Camión 2 ejes	6
Camión +2 ejes	5

**Tabla 2.4 Factores de eje equivalente para vías urbanas según categoría de vía (ICH, 2013).**

Tipo de vehículo	Factores de eje equivalente (FEE)	
	Estratigrafía liviana	Tipo de aplicación
Buses y taxibuses	1,3	1,3
Camión de 2 ejes	0,4	0,4
Camión de 3 ejes	1,7	2,3
Camión de 3 ejes articulado	0,7	1,3
Camión de 4 ejes	3,0	3,0
Camión de 4 ejes articulado	2,6	2,6

A partir del flujo vehicular medido en la zona de interés, se deben calcular los ejes equivalentes (EE) hacia la vida de diseño. Considerando las leyes de crecimiento de tránsito y la composición vehicular obtenidos por estudios de demanda, se puede calcular los EE, aplicando la Ecuación

(2.1).

$$EE(t) = \frac{P_w \cdot [TMDA(t)] \cdot [\sum_j VP_j \cdot FEE_j]}{NP} \cdot 365 \quad (2.1)$$

En donde  $EE(t)$  corresponde a los Ejes Equivalentes en el año  $t$  en la pista de diseño.  $P_w$  corresponde a la probabilidad de que el eje longitudinal derecho del vehículo pase por una línea imaginaria paralela ubicada a 0,5 m de la solera, se puede asumir un valor entre 0,7 y 0,9.  $TMDA(t)$  corresponde al flujo de vehículos total medido en [veh/día-año].  $VP_j$  corresponde al porcentaje de vehículos pesados tipo “j” expresado en decimal.  $FEE_j$  corresponde al Factor de Eje Equivalente del vehículo pesado “j”. NP es el número de pistas.

Para calcular el valor acumulado de los ejes equivalentes anteriormente mencionados en la vida de diseño, aplicando la Ecuación (2.2).

$$EE(t + 1) = EE(t + 1) + EE(t); \quad t \geq 0 \quad (2.2)$$

A partir de los Ejes Equivalentes Acumulados obtenidos en la vida de diseño del pavimento, se realiza una clasificación de tráfico de 4 categorías, como se muestra en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Clasificación de tráfico según nivel de solicitudes (ICH, 2013).**

Clasificación de tráfico según nivel de solicitudes						
Tipo de tráfico			Nivel de solicitud			Descripción
Nivel	Categoría		EE/día	EEAx10 <sup>6</sup>	Veh/día	
<b>Pesado</b>	I	IA	>1000	>0,5	Estimar	Calles, caminos y accesos a desarrollos industriales, comerciales y otro con alta presencia de vehículos pesados
		IB	<1000	>0,5	Estimar	
		IC	<200	>0,5	Estimar	

<b>Medio</b>	II	IIA	<60	>0,5	>5	Calles, caminos, pasajes, retornos, estaciones de servicio y espacios peatonales con presencia de vehículos pesados
		IIB	<60	<0,5	<5	
<b>Liviano</b>	III	IIIA	<5	-	<1	Áreas peatonales en que circulan eventualmente vehículos pesados como pasajes o calles de condominios. Estacionamientos de desarrollos comerciales, industriales, deportivos u otros que reciben vehículos pesados.
<b>Peatonal</b>		IIIB	0	-	0	
		IV		0	-	0

Se identifican 8 categorías de tráfico, divididas en niveles y categorías, según las solicitudes de diseño, medidas en EE/día, EEA y veh/día, con una descripción según el uso del pavimento.

La clasificación de tráfico se basa a lo establecido en la normativa del Reino Unido BS 7533, sin embargo, esta normativa fue actualizada en el año 2021, por lo que, como oportunidad de mejora, se propone reelaborar esta clasificación, definiendo un total de nueve categorías de tráfico, en donde se dividen por niveles, solicitudes en EEA o EE/día y una descripción según su uso.

## 2.7 Diseño de pavimentos vehiculares según “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón “

El proceso de diseño de pavimentos vehiculares de adoquines de hormigón propuestos en manual del ICH (2013) se basa esencialmente en la normativa BS 7533, la cual ofrece soluciones desde solicitaciones peatonales, hasta patios de carga con predominancia de vehículos pesados. Este método contempla dos grandes grupos, el primero orientado al tráfico pesado, sin considerar la operación de maquinaria especial, si no que más a una alta demanda de Ejes Equivalentes diarios. El segundo grupo considera niveles de tráfico, medio, liviano y peatonal.

Si el tipo de tráfico es pesado, es decir, correspondiente a la categoría I, se tienen las siguientes opciones de diseño:

- Adoquines de hormigón con base, subbase y suelo mejorado.
- Adoquines de hormigón con base y subbase.

En el caso de considerar un mejoramiento de suelo, se deben determinar los espesores de cada capa como se muestra en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6 Determinación de espesores de subbase y suelo mejorado (ICH, 2013).**

Nivel de tráfico	Espesor en mm de subbase/mejoramiento según CBR en %					
	<2%	2%	3%	4%	5-10%	10-15%
<60 EE/día	150/210	150/180	150/180	150/0	150/0	150/0
<200 EE/día	150/370	150/250	150/170	150/160	150/150	150/150
<500 EE/día	150/470	150/340	150/250	150/220	150/200	150/150
<1000 EE/día	150/600	150/450	150/350	150/300	150/250	150/180
>1000 EE/día	200/600	200/450	150/450	150/350	150/300	150/250

Por otro lado, si no se requiere mejoramiento de suelo, se considera la Tabla 2.7 para determinar

los espesores de cada capa del pavimento.

**Tabla 2.7 Determinación de espesor de subbase granular (ICH, 2013).**

Nivel de tráfico	Espesor en mm de subbase granular según CBR en %					
	<2%	2%	3%	4%	5-10%	10-15%
<60 EE/día	Requiere mejoramiento de subrasante	250	190	160	150	150
<200 EE/día		310	240	210	180	150
<500 EE/día		350	270	230	200	150
<1000 EE/día		400	310	270	225	150
>1000 EE/día		450	350	310	270	225

En la Tabla 2.8, se muestran los valores de los espesores de la base (granular, tratada con cemento y asfalto), cama de arena y adoquín, según el nivel de tráfico acumulado, medido en EEA.

**Tabla 2.8 Determinación de espesor de base, cama de arena y adoquín de hormigón. (ICH, 2013).**

Nivel de tráfico	Espesor de capa en mm según nivel de tráfico acumulado (EEA)			
	0,5-1,5 x 10 <sup>6</sup>	1,5-4 x 10 <sup>6</sup>	4-8 x 10 <sup>6</sup>	8,12 x 10 <sup>6</sup>
Base granular (CBR = 80%)	390	390-480	540	690-750
Base tratada con cemento	130	130-160	180	230-250
Base tratada con asfalto	130	130-160	150-170	170-190
Cama de arena	30	30	30	30
Adoquín	60	60	80	80

Si el tipo de tráfico es medio, liviano o peatonal, se determinan los espesores de la subbase, base, cama de arena y adoquín, según la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9 Espesores de la subbase, base tratada, cama de arena y adoquines para tráficos medios, livianos y peatonales (ICH, 2013)**

Tipo de tráfico			Espesor de subbase granular, en mm, según CBR, en %					Espesor de base tratada (mm)	Espesor de cama de arena (mm)	Clase de adoquín mínima
			2	3	4	5	≥6%			
Medio	II	IIA	400	350	250	150	150	150	40	80
		IIB								
Liviano	III	IIIA	350	300	225	150	150	100	40	60
		IIIA	250	150	100	100	0	100	40	60
		IIIB	300	250	100	100	100	100	40	60
Peatonal	IV		200	150	100	100	100	100	40	60

Al igual que las solicitudes de tránsito, el diseño de pavimentos también se basa según lo establecido en la normativa del Reino Unido BS 7533, debido a la actualización de esta norma, como oportunidad de mejora, se propone a reducir todo el diseño en una sola tabla, en donde, se incluyen nuevas categorías de tráfico. Además, se proponen más soluciones, debido a que se consideran los casos de pavimentos confinados y no confinados, bases tratadas con asfalto y cemento y bases granulares para todo tipo solicitud vehicular. El diseño por proponer es para suelos naturales con CBR mayores o iguales al 3%, caso contrario, se debe realizar el mejoramiento de suelo sugerido en la Tabla 2.6.

Adicionalmente, se proponen distintos tipos de aparejos para los pavimentos de adoquines, según la demanda de tráfico, en base a lo establecido en la BS 7533.

## 2.8 Conclusiones

Las especificaciones de materiales, como dimensión, resistencia a la compresión, resistencia a ciclos hielo/deshielo, resistencia a la abrasión, absorción y resistencia al deslizamiento, están reguladas por normativas nacionales (MOP) e internacionales (ASTM, NTC, BSI y AS/NZS), las

cuales establecen tanto los valores mínimos como máximos aceptables, así como los métodos de ensayo correspondientes. Sin embargo, el manual debe referenciar normativas actualizadas, y considerar lo establecido en las normativas de nuestro país. Esto implica la posibilidad de modificar los métodos de ensayo para mejorar la precisión en la cuantificación de las especificaciones y los valores de aceptación.

El manual debe citar los documentos de referencia actualizados, los cuales establecen los requisitos y la gradación de materiales para las bases granulares, incluyendo aquellas tratadas con cemento, evaluando además la resistencia mínima característica conforme a las últimas versiones del Manual de Carreteras y las normativas británicas que guían el diseño de pavimentos de adoquines de hormigón.

En relación con las categorías de tráfico, se definen ocho clasificaciones distintas (IA, IB, IC, IIA, IIB, IIIA, IIB y IV). La normativa británica actualizada propone aumentar estas categorías, adaptando las solicitudes vehiculares y el procedimiento de diseño para pavimentos de adoquines destinados a tráfico vehicular.

Según las solicitudes de tráfico, se obtiene el dimensionamiento de cada capa estructural del pavimento, sin embargo, este procedimiento no tiene un orden lógico. Por lo que una oportunidad de mejora sería considerar todas las actualizaciones mencionadas anteriormente y proponer un método de diseño sistemático.

### **3. PROPUESTAS PARA EL MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTO DE ADOQUINES DE HORMIGÓN**

#### **3.1 Introducción**

Se presentan las propuestas para la actualización del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón” del ICH (2013). Las propuestas se enfocan en las especificaciones de materiales que componen la estructura del pavimento y adoquín, en la clasificación de las solicitudes vehiculares y en el proceso de diseño.

#### **3.2 Oportunidades de mejora a implementar en la nueva versión del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón”**

Se identifican las siguientes oportunidades de mejora a implementar en el Manual del ICH:

- Especificaciones de adoquines de hormigón: Para las especificaciones de los materiales, es necesario que el manual del ICH actualice las normativas de referencia y de los ensayos y evaluar si es que los criterios cambian. Otro aspecto importante, es que, en el presente año 2024, se publica la primera norma sobre adoquines en Chile, la cual debe ser incorporada como normativa de referencia.
- Especificaciones de bases granulares: Es necesario que el manual del ICH actualice los documentos que hacen referencia a los requisitos que debe cumplir la base granular, en cuanto a los materiales y la graduación.
- Especificaciones de bases granulares tratadas con cemento: Es necesario que el manual del ICH actualice los documentos que hacen referencia a los requisitos que debe cumplir en cuanto a los materiales. Adicionalmente, se debe verificar que, la resistencia característica exigida en la versión actualizada del Manual de Carreteras, coinciden con lo exigido en la norma británica BS 7533-101:2021, la cual define la composición y los espesores de cada

capa de pavimento de adoquín de hormigón para tráfico vehicular.

- Solicitaciones de diseño de tráfico vehicular: Se propone un nuevo sistema de categorías de tráfico vehicular con nueve grupos, uno más que en el sistema anterior. La categoría 9 corresponde al nivel de mayor tráfico y la categoría 1 al de menor tráfico, agrupados según Ejes Equivalentes Acumulados y uso.
- Procedimiento de diseño en pavimentos vehiculares y peatonales: Considerando las nuevas categorías de tráfico se propone un nuevo procedimiento de diseño sistemático que consiste en calcular los Ejes Equivalentes Acumulados de la pista vehicular para los años de vida útil propuestos. Con base en estos cálculos, se presentarán distintas opciones de solución, permitiendo seleccionar la más adecuada según las condiciones iniciales del terreno.

### 3.3 Especificaciones de adoquines de hormigón

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de las propuestas a las especificaciones de adoquines de hormigón con sus criterios de aceptación y sus normativas de referencias.

**Tabla 3.1 Resumen de propuesta de especificaciones de adoquines de hormigón. (Díaz, 2022), (INN, 2024).**

<b>Especificación</b>	<b>Criterio</b>	<b>Normativa de referencia</b>
Dimensión	Largo: variable $\pm 1,6$ mm Ancho: variable $\pm 1,6$ mm Espesor: mínimo 60 mm; variable $\pm 3,2$ mm Largo/Espesor $\leq 4$	ASTM C936/C936M-21a
Resistencia a la flexotracción	Mínimo individual: 3 MPa Mínimo promedio: 4 MPa	Ensayo: BSI 6717:2001 Valores: BSI 6717:2001
Resistencia a la compresión (5 clases)	Mínimo individual: 40 MPa Mínimo promedio: 45 MPa	NCh 3731-1 (2024)

<b>Especificación</b>	<b>Criterio</b>	<b>Normativa de referencia</b>
Resistencia a ciclos de hielo/deshielo	Pérdida de masa máxima: a) 225g/m <sup>2</sup> en 28 ciclos b) 500 g/m <sup>2</sup> en 49 ciclos	Ensayo: ASTM C1645-21a Valores: ASTM C936/C936M-21a
Resistencia a la Abrasión	Pérdida volumen: 15 cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> Pérdida de espesor: < 3 mm	Ensayo: ASTM 418-20 Valores: ASTM C936/C936M-21a
Absorción	Máximo individual: < 7 % Máximo promedio: < 5 %	Ensayo: ASTM C140/C140M-21 Valores: ASTM C936/C936M-21a
Resistencia al deslizamiento	Umbrales medios con SCRIM: >0,55 SFC (secciones rectas y R ≥ 600 m) >0,65 SFC (zonas de detención) >0,65 SFC (curvas horizontales) >0,65 SFC (aproximación a intersecciones)	Ensayo: M.C.-V.8(2023): 8.502.17 Valores: M.C.-V.6(2023): 6.203.303

A continuación, se detallan los cambios propuestos en cada especificación de los adoquines de hormigón:

- **Dimensión:** Se propone una actualización respecto a los valores del largo, ancho y espesor, que establece la norma ASTM C936 (American Society for Testing and Materials, 2021a, traducido al español como “Sociedad Americana para Pruebas y Materiales”), en comparación con lo inicialmente propuesto por la ICH (2013).
- **Resistencia a la flexotracción:** Esta especificación mantendrá los valores de resistencia a la flexotracción mínimo individual y promedio mencionado en el ICH (2013). Estos valores fueron obtenidos a través de ensayos establecidos en la normativa BSI 6717 (British Standards Institution, 2001)

Capítulo 3: Propuestas para el Manual de diseño de pavimento de adoquines de hormigón

- Resistencia a la compresión: Se propone una actualización respecto a los valores de resistencia a la compresión mínima individual y promedio según lo establecido en la nueva normativa chilena NCh 3731-1 (Instituto Nacional de Normalización, 2024).
- Resistencia a los ciclos de hielo/deshielo: Se propone la actualización de los valores y ensayos conforme a ASTM (2021a) y ASTM (2021b) respectivamente. En la normativa ASTM (2021b), se actualiza el ensayo que mide la resistencia a ciclos de hielo/deshielo, lo que conlleva a modificar los límites máximos de pérdida de masa de los adoquines de hormigón establecidos en ASTM (2021a). Estos valores mínimos se ajustan según la cantidad de ciclos realizados durante el ensayo según la normativa ASTM (2021b).
- Resistencia a la abrasión: Se propone que el manual actualice los valores y ensayos establecidos por las normas ASTM (2021a) y ASTM (2020a). Sin embargo, estos ensayos y valores no presentan variaciones con respecto a lo establecido por el ICH (2013).
- Absorción: Se propone que el manual actualice los valores y ensayos establecidos por las normas ASTM (2021a) y ASTM (2021c). La normativa de referencia que describe el ensayo se modifica según lo dispuesto en ASTM (2021a). Sin embargo, los valores de aceptación y los procedimientos de ensayo no presentan variaciones con respecto a lo establecido por el ICH (2013).
- Resistencia al deslizamiento: Se propone que el manual actualice los ensayos y valores establecidos en MOP (2021b) y MOP (2021c) respectivamente. Se modifica el método de ensayo de la resistencia al deslizamiento, donde se mide mediante la maquina *Sideway Coefficient Routine Investigation Machine* (Máquina de investigación de rutina de coeficiente lateral; SCRIM según sus iniciales en inglés) y el parámetro es expresado en *Sideway Force Coefficient* (Coeficiente de rozamiento transversal; SFC según sus iniciales en inglés).

### **3.4 Especificaciones de bases granulares**

Las bases granulares se utilizarán en la estructuración de pavimentos de solicitaciones de tráfico liviano y peatonal, los cambios que se proponen consisten en actualizar las normativas de referencia, pero los valores se mantienen.

En el diseño de vías administradas por la Dirección de Vialidad o por la Coordinación General de Concesiones, las bases granulares deben cumplir con las siguientes especificaciones mínimas según:

- **Materiales:** Debe cumplir con lo establecido en el Volumen 5 del Manual de Carreteras (Ministerio de Obras Públicas, 2023)
- **Graduación:** Debe cumplir con lo establecido en el Volumen 5 y 8 del Manual de Carreteras (Ministerio de Obras Públicas, 2023)

En el diseño de vías urbanas, las bases granulares deben cumplir con las siguientes especificaciones mínimas:

- **Materiales y graduación:** Debe cumplir con lo establecido en “Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación” (MINVU, 2018).

### **3.5 Especificaciones de bases granulares tratadas con cemento**

El manual debe actualizar las normativas que hacen referencia a las bases granulares tratadas con cemento.

La base granular tratada con cemento (BGTC) es un material que se utiliza en la estructuración el pavimento de adoquines de hormigón.

Las bases granulares tratadas con cemento se refieren a materiales dosificados deben cumplir una resistencia característica a la compresión a 7 días entre 2,5 y 4,5 MPa, con dosis de cemento inferiores al 5% en peso. (Ministerio de Obras Públicas, 2023)

El cemento hidráulico deberá ajustarse en lo que corresponda a lo especificado en NCh 148. En tanto a la resistencia característica de la base granular tratada con cemento, si bien el Manual de Carreteras establece un valor de referencia, en BSI (2021), se mantienen los valores que se establecen en ICH (2013) para la BGTC3, es decir, se pueden utilizar el otro tipo de bases tratadas con cemento, siempre y cuando se aplique el factor de espesor equivalente en función a su resistencia característica.

### **3.6 Propuestas de solicitudes de diseño en calles, caminos y pasajes: Actualización de las categorías de tráfico**

En el Manual de la ICH (2013), el diseño de pavimentos de adoquines para uso vehicular está basado en los estudios del Reino Unido, en la norma vigente para pavimentos de adoquines de ese país, BS 7533-101:2021, propone aumentar las categorías de tráfico y adaptarlas según el sistema de instalación no ligado y ligado. De esta manera se proponen 9 categorías de tráfico, según Ejes Equivalentes Acumulados o Ejes Estándares por día, dependiendo si se tiene un pavimento no confinado o confinado respectivamente, y también en base a una descripción cualitativa en el caso en que consideren pavimentos de uso peatonal, como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Categorías de tráfico según Ejes Estándar Acumulados para sistemas de instalación no confinado y confinado en pavimento de adoquines de hormigón. (BSI, 2021).**

Categoría de tráfico	Pavimento no ligado	Pavimento ligado	Aplicaciones
	Ejes Acumulados Estándar ( $\times 10^6$ )	Ejes Estándares por día	
9	$\leq 30$	$\leq 4.000$	Carreteras adoptadas y desarrollos

Categoría de tráfico	Pavimento no ligado	Pavimento ligado	Aplicaciones
	Ejes Acumulados Estándar ( $\times 10^6$ )	Ejes Estándares por día	
8	$\leq 10$	$\leq 1.400$	industriales por un alto número de vehículos comerciales.
7	$\leq 2,5$	$\leq 350$	
6	$\leq 0,5$	$\leq 70$	Carreteras adoptadas, desarrollos comerciales/industriales utilizados por un número moderado de vehículos comerciales, instalaciones industriales, áreas de estaciones de servicio, zonas peatonales con frecuentes intrusiones de vehículos comerciales
5	$\leq 0,05$	$\leq 7$	Zonas peatonales con intrusiones ocasionales de vehículos comerciales, estacionamientos con tráfico comercial ocasional
4	$\leq 0,007$	$\leq 1$	Áreas urbanas peatonales sin uso vehicular planificado, zonas peatonales utilizadas por vehículos comerciales ligeros, servicios de emergencia y vehículos de mantenimiento
3	0	$\leq 0$	Pequeños estacionamientos para automóviles, motocicletas y vehículos comerciales ligeros
2	0	$\leq 0$	Zonas peatonales y para ciclistas, incluyendo accesos domésticos

Categoría de tráfico	Pavimento no ligado	Pavimento ligado	Aplicaciones
	Ejes Acumulados Estándar (x10 <sup>6</sup> )	Ejes Estándares por día	
1	0	≤ 0	Uso exclusivo peatonal, incluyendo aplicaciones domésticas

Para el cálculo de las solicitaciones, se proyecta flujo de tránsito, por esta razón, se propone realizar una actualización respecto a las tasas de crecimiento vehiculares, según los estudios realizados para el Ministerio de Desarrollo Social de Chile (Ministerio de Desarrollo Social de Chile y Steer Davies Gleave, 2013). En la Tabla 3.3 se proporcionan los valores de las tasas de crecimiento para cada tipo de vehículo según el promedio de las tasas de crecimiento de todas las regiones de nuestro país.

**Tabla 3.3 Promedio de las tasas de crecimiento de tráfico por tipo de vehículo (Ministerio de Desarrollo Social de Chile y Steer Davies Gleave, 2013).**

Vehículo Tipo	Tasa de crecimiento (%)
Automóviles	7,6
Camionetas	7,6
Bus urbano	7,6
Camión de 2 ejes	2,5
Camión de + 2 ejes	8,9

### 3.7 Conclusiones

Para las especificaciones de adoquines de hormigón, se propone que el manual actualice sus valores según normativas o documentos de referencia actualizados. Esto incluye la implementación de la nueva normativa chilena para los valores de resistencia a la compresión del adoquín de hormigón. Además, se sugieren cambios en el ensayo y los valores de resistencia a ciclos de hielo/deshielo,

### Capítulo 3: Propuestas para el Manual de diseño de pavimento de adoquines de hormigón

así como en el método de ensayo y los valores de resistencia al deslizamiento. Para las especificaciones de dimensión, resistencia a la abrasión y absorción, se recomienda actualizar las normas que especifican valores y criterios de aceptación a sus versiones más recientes, aunque estos valores y criterios no se modificarán. Por otro lado, para la resistencia a la flexotracción, no se actualizará la norma que especifica ensayos y valores de aceptación.

Para las bases granulares tratadas con cemento, se propone mantener los valores de resistencia característica según lo establecido en el manual, pero con las referencias actualizadas propuestas por las normativas vigentes. En cuanto a la composición de materiales, se propone consultar lo establecido en las versiones vigentes del Manual de Carreteras.

En cuanto a las solicitudes de diseño, se propone aumentar el número de categorías de tráfico y modificar su enumeración. Esto se logrará mediante la obtención de los Ejes Equivalentes Acumulados. Posteriormente, se busca vincular directamente la categoría de tráfico con el dimensionamiento estructural de los pavimentos de adoquines de hormigón. Esta actualización permitirá sistematizar el proceso de dimensionamiento del pavimento.

Se propone actualizar las tasas de crecimiento vehicular por los valores más recientes utilizados por el Ministerio de Desarrollo Social.

## **4. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE TRÁFICO VEHICULAR – PEATONAL Y EJEMPLOS DE DISEÑO A INCORPORAR EN EL MANUAL**

### **4.1 Introducción**

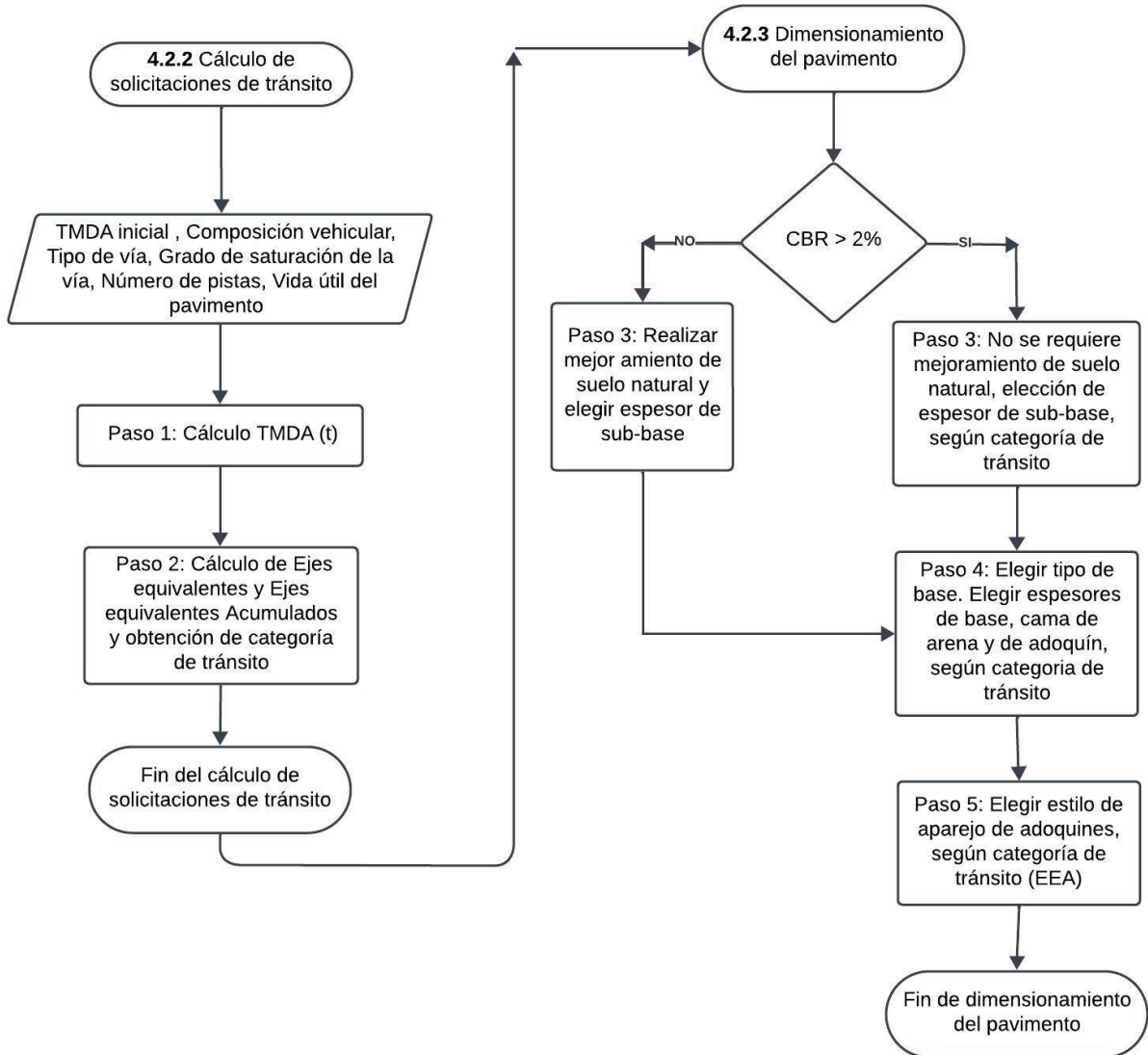
En este capítulo, se formula el procedimiento de diseño incorporando las mejoras propuestas en el capítulo 3 y se desarrollan ejemplos de diseño para pavimentos vehiculares, clasificados por tipo de tráfico: peatonal, liviano, medio y pesado. Los ejemplos se realizan utilizando el método no ligado, en el cual los adoquines se instalan sobre una cama de arena, asegurando resultados comparables con los establecidos por el ICH (2013).

### **4.2 Propuestas de procedimiento de diseño para pavimentos vehiculares y peatonales**

El proceso de diseño de pavimentos vehiculares comienza con el cálculo de las solicitaciones de tránsito, que incluye la TMDA inicial, la composición vehicular, el tipo de vía, el grado de saturación, el número de pistas y la vida útil del pavimento. Este cálculo se realiza en dos pasos: primero, se determina la TMDA y luego se calculan los ejes equivalentes acumulados para obtener la categoría de tránsito. A continuación, se dimensiona el pavimento considerando si el CBR del suelo natural es mayor o menor al 2%. Si es menor, se debe mejorar el suelo natural y elegir el espesor de la sub-base; si es mayor, no se requiere mejoramiento del suelo. Luego, se eligen los espesores de base, cama de arena y adoquín según la categoría de tránsito, finalizando con la

selección del estilo de aparejo de adoquines.

#### 4.2.1 Procedimiento sistematizado de diseño de pavimentos de uso vehicular y peatonal



**Figura 4.1 Diagrama de flujo del nuevo procedimiento de diseño de pavimento de adoquines de hormigón.**

Se caracteriza el tráfico previo a calcular las solicitudes, por lo que antes de comenzar el

procedimiento de diseño, estas son las variables que se deben considerar:

- Tránsito Medio Diario Anual inicial [TMDA inicial (veh/día)] y Composición vehicular (%): obtenidos del Plan Nacional de Censos en la Dirección de Vialidad, o a través de mediciones directas.
- Categoría de la vía (Expresa, troncal, colectora, de servicio, local y pasaje): obtenidos a través del Plan Maestro de la comuna en particular, de esta manera, se obtiene la estimación de la capacidad.
- Tasa de crecimiento por cada tipo de vehículo (*TC*): Los valores de referencia se pueden obtener según el Ministerio de Desarrollo Social, según la Tabla 3.3
- Factor de Ejes Equivalentes: Según Manual del ICH 2013.
- Factor de equivalencia: Los valores de referencia se pueden obtener según el Ministerio de Desarrollo Social. (MESPIVU, 2013).

Adicionalmente el proyectista debe definir los años de vida útil del pavimento.

#### **4.2.2 Cálculo de solicitudes de tránsito**

Previo al cálculo de la proyección del tráfico, es fundamental considerar datos como el flujo total y el grado de saturación. Estos permiten determinar el corte temporal en el cual se produce la saturación, durante el cual la tasa de crecimiento se hace nula hasta que se realice una reasignación del tráfico en la red.

Paso 1: La proyección de TMDA se realiza aplicando la Ecuación (4.1).

$$TMDA(t) = TMDA(0) \cdot (1 + TC)^t \quad (4.1)$$

En donde:

- TC: Corresponde a la tasa de crecimiento medido en (%).
- t: Corresponde al año de vida útil, donde el primer año es 0, el segundo año es 1, y así sucesivamente hasta el último año de vida útil.

Paso 2: Para conocer la demanda de tráfico en Ejes Equivalentes Acumulados en la vida de diseño, se deben considerar los datos mencionados inicialmente, provenientes de los estudios de demanda, de esta manera, aplicando la Ecuación (4.2), se obtienen los Ejes Equivalentes.

$$EE(t) = \frac{P_w \cdot [TMDA(t)] \cdot [\sum_j VP_j \cdot FEE_j]}{NP} \cdot 365 \quad (4.2)$$

En donde:

- $EE(t)$ : corresponde a los Ejes Equivalentes en el año t en la pista de diseño.
- $P_w$ : corresponde a la probabilidad de que el eje longitudinal derecho del vehículo circule a 0,5 m de la demarcación lateral derecha. Se puede asumir un valor entre 0,7 y 0,9.
- $TMDA(t)$ : corresponde al flujo total expresado en (veh/día-año)
- $VP_j$ : es el porcentaje de vehículos pesados tipo “j” en decimal.
- $FEE_j$ : es el Factor de Eje Equivalente del vehículo pesado “j”. Define el eje estándar como un eje simple de rueda doble (ESRD) de 8, 16 T (18 Kips, 80 kN)

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Posteriormente, aplicando la Ecuación (4.3) se calcula los Ejes Equivalentes Acumulados en la vida de diseño del pavimento.

$$EE(t + 1) = EE(t + 1) + EE(t); t \geq 0 \quad (4.3)$$

Una vez obtenido el resultado de los Ejes Equivalentes Acumulados, en el último año de la vida de diseño, se le asigna una categoría de tráfico, según la Tabla 3.2.

### 4.2.3 Dimensionamiento de los pavimentos de adoquines de hormigón

Paso 3 – 4: Si el CBR del suelo natural, es menor al 2%, es necesario realizar el mejoramiento de suelos de la Tabla 2.6, considerando los Ejes Equivalentes por día del último año de vida útil del pavimento.

Cuando el CBR del suelo natural es del 2% o mayor, se debe escoger entre dos tipos de soluciones, sistema ligado y no ligado, según la categoría de tráfico obtenida, se obtienen los espesores para cada capa del pavimento, a partir de las Tablas 4.1 y 4.2.

**Tabla 4.1 Espesores de subbase, base, cama de arena y adoquín de hormigón mínimos para una superficie no ligada. (BSI, 2021).**

Categoría de tráfico	Espesores (mm)					
	Subbase	Base granular	Base Asfáltica	Base CBGM	Cama de arena	Adoquín de hormigón
9	150	N/A	200	280	30	80
8	150	N/A	175	230	30	80
7	150	N/A	130	130	30	80

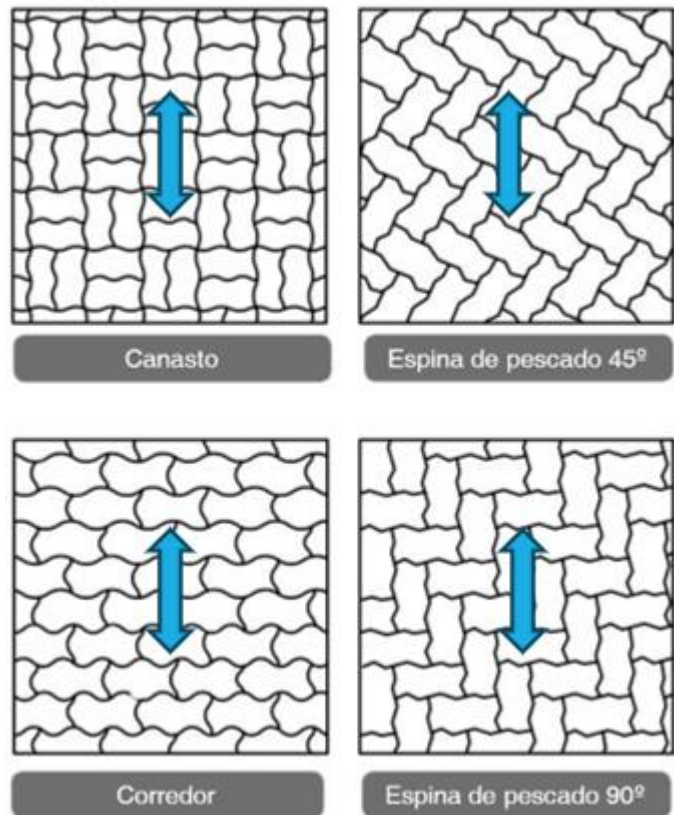
Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Categoría de tráfico	Espesores (mm)					
	Subbase	Base granular	Base Asfáltica	Base CBGM	Cama de arena	Adoquín de hormigón
6	150	N/A	100	130	30	60
5	150	N/A	80	130	30	60
4	300	150	60	130	30	60
3	250	100	N/A	N/A	30	50
2	150	0	N/A	N/A	30	50
1	150	0	N/A	N/A	30	50

**Tabla 4.2 Espesores de subbase, base, capa de mortero y adoquín de hormigón mínimos para una superficie ligada. (BSI, 2021).**

Categoría de tráfico	Espesores (mm)					
	Subbase	Base granular	Base Asfáltica	Base de hormigón	Capa de mortero	Adoquín de hormigón
7	150	N/A	200	150	40	80
6	150	N/A	200	150	40	60
5	150	N/A	200	150	40	60
4	150	N/A	150	100	40	60
3	150	N/A	150	100	40	50
2	150	100	80	100	40	50
1	150	75	60	100	40	50

Finalmente, se define el aparejo de los adoquines de hormigón, es decir, en qué forma se deben distribuir los adoquines, según la categoría de tráfico obtenida. En Chile existen cuatro tipos de aparejos típicos, los cuales son: Canasto, Espina de pescado 45°, Corredor y Espina de Pescado 90°



**Figura 4.2 Aparejos utilizados en Chile y el sentido de circulación de los vehículos.**

Paso 5: En la Tabla 4.3 se muestra la máxima categoría de tráfico para cada tipo de aparejo utilizado en el diseño de pavimento de adoquines en Chile.

**Tabla 4.3 Aparejo según categoría de tráfico (BSI, 2021).**

Aparejo	Máxima categoría de tráfico permitida para cada tipo de aparejo	
	Construcción de superficie no ligada	Construcción de superficie ligada
Espina de pescado 45°	9	7
Espina de pescado 90°	9	7

Aparejo	Máxima categoría de tráfico permitida para cada tipo de aparejo	
	Construcción de superficie no ligada	Construcción de superficie ligada
Corredor	5	7
Canasto	2	5

### 4.3 Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico peatonal

Se diseña un pavimento vehicular de uso exclusivo peatonal, en donde se tiene una vía de categoría pasaje, considerando un TMDA de 0 (veh/día). Para este caso particular, debido a que no se tienen solicitudes, no se calculan los ejes estándares. El terreno tiene CBR de subrasante del 3%, debido a que es mayor que el 2%, no requiere mejoramiento de suelo.

Debido a que el pavimento es de uso exclusivo peatonal, se considera la categoría de tráfico 1.

El dimensionamiento para este caso en particular es el siguiente:

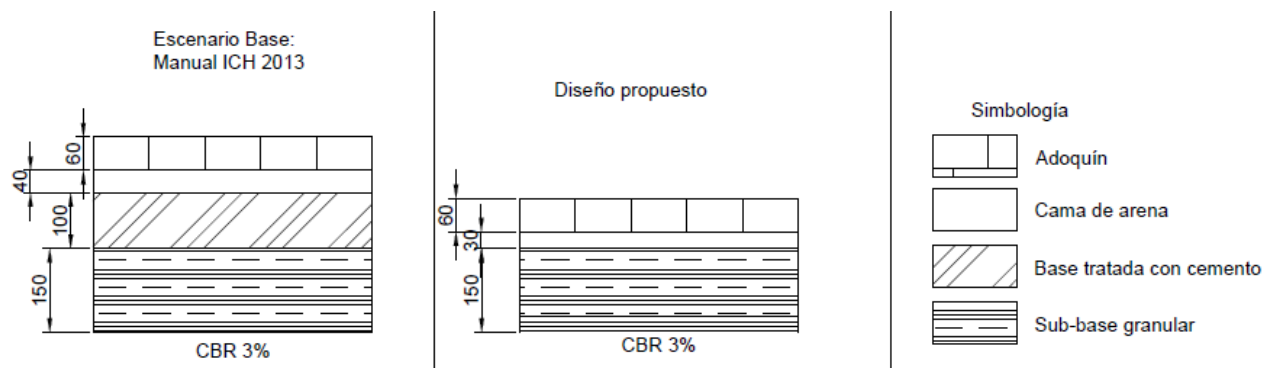
- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 60 mm
- Espesor cama de arena: 30 mm
- Espesor de base granular: 0 mm
- Espesor de sub-base granular: 150 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Por otro lado, según el Manual vigente del ICH, el dimensionamiento para categoría de tráfico peatonal (IV), es de la siguiente manera:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 60 mm
- Espesor cama de arena: 40 mm
- Espesor de base granular: 100 mm
- Espesor de sub-base granular: 150 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

Se comparan los dimensionamientos del pavimento con ambos métodos, como se muestra en la Figura 4.3.



**Figura 4.3 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico peatonal.**

En ambos diseños, el espesor del adoquín es el mismo, 60 mm. Sin embargo, en el diseño propuesto, la capa de arena es 10 mm más delgada. El espesor de la subbase granular se mantiene igual en ambos diseños, con 150 mm. El diseño propuesto elimina la necesidad de utilizar la base tratada con cemento. Esta modificación permite una reducción en la cantidad de materiales

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

utilizados, lo que conlleva a una disminución en el consumo de recursos materiales y económicos, así como en las labores de movimiento de tierras, sin comprometer la resistencia del pavimento.

#### 4.4 Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico liviano

Se diseña un pavimento vehicular de tráfico liviano de dos sentidos, en donde se tienen los siguientes datos:

- Tránsito Medio Diario Anual inicial: 12 (veh/día)
- Composición vehicular (%):

**Tabla 4.4 Composición vehicular para tráfico liviano**

<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión +2E</b>
64%	22%	4%	7%	3%

- Número de pistas [NP]: 1
- Categoría de la vía: Pasaje
- Vida útil del pavimento: 10 años

Se consideran las siguientes tasas de crecimiento (TC%), factores de equivalencia y FEE por cada tipo de vehículo.

**Tabla 4.5 Tasas de crecimiento, factor de equivalencia y FEE**

	<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión + 2E</b>
<b>Tasa de crecimiento</b>	6,91%	6,91%	6,48%	5,95%	5,95%
<b>Factor de equivalencia</b>	1	1	1,5	2	2,5
<b>FEE</b>	0	0	1,3	0,4	3

Paso 1: Se debe estimar el flujo vehicular, previo a calcular los Ejes Equivalentes, por lo que, se inicia calculando el TMDA inicial para cada tipo de vehículo en una pista, de la siguiente forma, para  $t > 0$ , aplicando la Ecuación (4.1).

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4.6 Proyección TMDA para tráfico liviano.**

<b>Año</b>	<b>TMDA (veh/día-año)</b>
<b>0</b>	7
<b>1</b>	7
<b>2</b>	8
<b>3</b>	8
<b>4</b>	9
<b>5</b>	9
<b>6</b>	10
<b>7</b>	11
<b>8</b>	11
<b>9</b>	12
<b>10</b>	13

Paso 2: Se debe estimar la demanda de tráfico en Ejes Equivalentes Acumulados hacia la vida de

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

diseño, considerando los datos de flujos obtenidos, se calculan los Ejes Equivalentes, según la Ecuación (4.2):

$$EE(t) = 0,9 \cdot (TMDA(t)) \cdot [(4\% \cdot 1,3) + (7\% \cdot 0,4) + (3\% \cdot 3)] \cdot 365$$

En donde se asume que  $P_w$  es 0,9 y que los vehículos pesados son los buses y camiones.

En paralelo, se calcula el valor acumulado de los ejes equivalentes hasta la vida de diseño, según la Ecuación (4.3).

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4.7 Ejes Equivalentes obtenidos para tráfico liviano.**

Año	EE (t)		
	Anual	Acumulado	Día
0	380	380	1
1	406	786	1
2	433	1.219	1
3	462	1.681	1
4	493	2.174	1
5	526	2.700	1
6	561	3.262	2
7	599	3.861	2
8	639	4.500	2
9	682	5.183	2
10	728	5.911	2

Se asigna una categoría de tráfico mediante los Ejes Equivalentes obtenidos en el último año de vida útil del pavimento. Al obtener 5.911 ejes equivalentes acumulados en el último año, se asigna la categoría de tráfico nivel 6, según lo establecido en la Tabla 4.1

Paso 3-4: Como el CBR del suelo natural es mayor al 2%, se obtiene el siguiente dimensionamiento

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

para cada capa del pavimento:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 60 mm
- Espesor cama de arena: 30 mm
- Espesor de base granular: 150 mm
- Espesor de base tratada con cemento: 130 mm
- Espesor de sub-base granular: 300 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

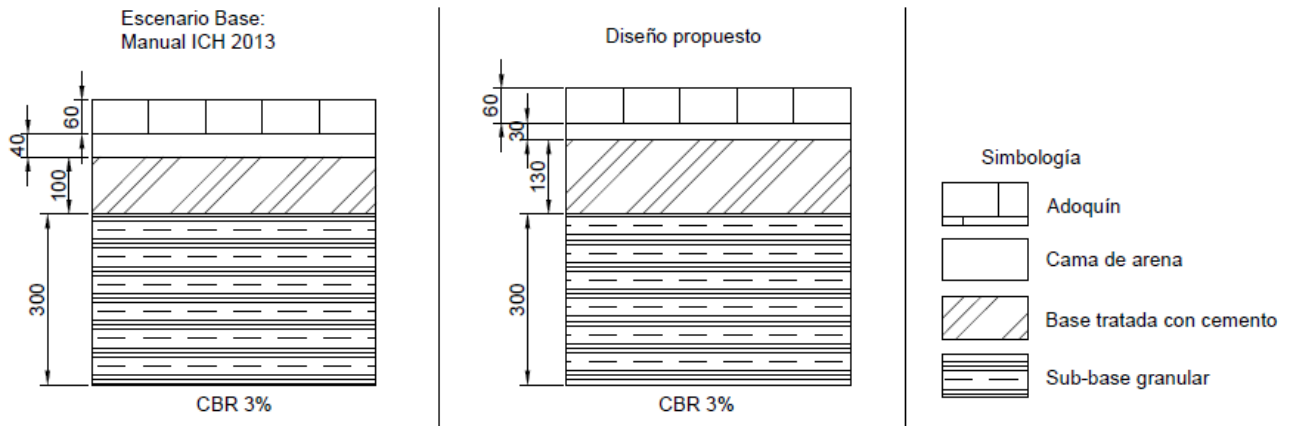
Paso 5: Como se tiene una categoría de tráfico nivel 4, el estilo de aparejo recomendado según la Tabla 4.3 es corredor, espina de pescado a 90° o 45°.

Por otro lado, según el Manual vigente del ICH, el dimensionamiento para categoría de tráfico liviano (IIIA), es de la siguiente manera considerando las mismas solicitaciones que en el diseño propuesto:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 60 mm
- Espesor cama de arena: 40 mm
- Espesor de base granular: 100 mm
- Espesor de sub-base granular: 300 mm

- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

Se comparan los dimensionamientos del pavimento con ambos métodos, como se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico liviano.**

En ambos diseños, el espesor del adoquín es el mismo, 60 mm. Sin embargo, en el diseño propuesto, la capa de arena es 10 mm más delgada, mientras que la base tratada con cemento es 30 mm más gruesa. El espesor de la sub-base granular se mantiene igual en ambos diseños, con 300 mm.

En este caso en particular, con el escenario base se obtiene un menor espesor a diferencia del escenario propuesto. Esto se debe a que en la categoría de tráfico 4, el dimensionamiento se hace en referencia a la base granular, esta al tener menor resistencia que la base tratada, no permite que se optimice el espesor de la subbase, considerando que se reduce en 10 mm la cama de arena y que permite el empleo de adoquines de 50 mm de espesor.

#### 4.5 Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico medio

Se diseña un pavimento vehicular de tráfico medio de dos sentidos, en donde se tienen los siguientes datos:

- Tránsito Medio Diario Anual inicial: 200 (veh/día)
- Composición vehicular (%):

**Tabla 4.8 Composición vehicular para tráfico medio.**

<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión +2E</b>
63%	20%	4%	8%	5%

- Número de pistas [NP]: 2
- Categoría de la vía: De servicio
- Vida útil del pavimento: 15 años

Se consideran las siguientes tasas de crecimiento (TC%), factores de equivalencia y FEE por cada tipo de vehículo.

**Tabla 4.9 Tasas de crecimiento, Factor de equivalencia y FEE.**

	<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión + 2E</b>
<b>Tasa de crecimiento</b>	6,91%	6,91%	6,48%	5,95%	5,95%
<b>Factor de</b>	1	1	1,5	2	2,5

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

	<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión + 2E</b>
<b>equivalencia</b>					
<b>FEE</b>	0	0	1,3	0,4	3

Paso 1: Se debe estimar el flujo vehicular, previo a calcular los Ejes Equivalentes, por lo que, se inicia calculando el TMDA inicial para cada tipo de vehículo en una pista, de la siguiente forma, para  $t > 0$ , aplicando la Ecuación (4.1).

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4.10 Proyección TMDA para tráfico medio.**

<b>Año</b>	<b>TMDA (veh/día- año)</b>
<b>0</b>	120
<b>1</b>	127
<b>2</b>	136
<b>3</b>	145
<b>4</b>	155
<b>5</b>	165
<b>6</b>	176
<b>7</b>	188
<b>8</b>	200
<b>9</b>	213
<b>10</b>	228
<b>11</b>	243
<b>12</b>	259
<b>13</b>	259
<b>14</b>	259
<b>15</b>	259

Paso 2: Se debe estimar la demanda de tráfico en Ejes Equivalentes Acumulados hacia la vida de diseño, considerando los datos de flujos obtenidos, se calculan los Ejes Equivalentes, según la

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Ecuación (4.2):

$$EE(t) = 0,9 \cdot (TMDA(t)) \cdot [(4\% \cdot 1,3) + (8\% \cdot 0,4) + (5\% \cdot 3)] \cdot 365/2$$

En donde se asume que  $P_w$  es 0,9 y que los vehículos pesados son los buses y camiones.

En paralelo, se calcula el valor acumulado de los ejes equivalentes hasta la vida de diseño, según la Ecuación (4.3).

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4.11 Ejes Equivalentes obtenidos para tráfico medio.**

Año	EE (por pista)		
	Anual	Acumulado	Día
<b>0</b>	4.593	4.593	13
<b>1</b>	4.898	9.491	13
<b>2</b>	5.224	14.716	14
<b>3</b>	5.572	20.288	15
<b>4</b>	5.943	26.231	16
<b>5</b>	6.339	32.570	17
<b>6</b>	6.761	39.331	19
<b>7</b>	7.211	46.542	20
<b>8</b>	7.692	54.234	21
<b>9</b>	8.204	62.438	22
<b>10</b>	8.751	71.189	24
<b>11</b>	9.335	80.524	26
<b>12</b>	9.957	90.481	27
<b>13</b>	9.957	100.439	27
<b>14</b>	9.957	110.396	27
<b>15</b>	9.957	120.353	27

Se asigna una categoría de tráfico mediante los Ejes Equivalentes obtenidos en el último año de vida útil del pavimento. Al obtener 120.353 ejes equivalentes acumulados en el último año, se

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

asigna la categoría de tráfico nivel 6, según lo establecido en la Tabla 4.1

Paso 3-4: Como el CBR del suelo natural es mayor al 2%, se obtiene el siguiente dimensionamiento para cada capa del pavimento:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 60 mm
- Espesor cama de arena: 30 mm
- Espesor de base asfáltica: 100 mm
- Espesor de base tratada con cemento: 130 mm
- Espesor de sub-base granular: 150 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

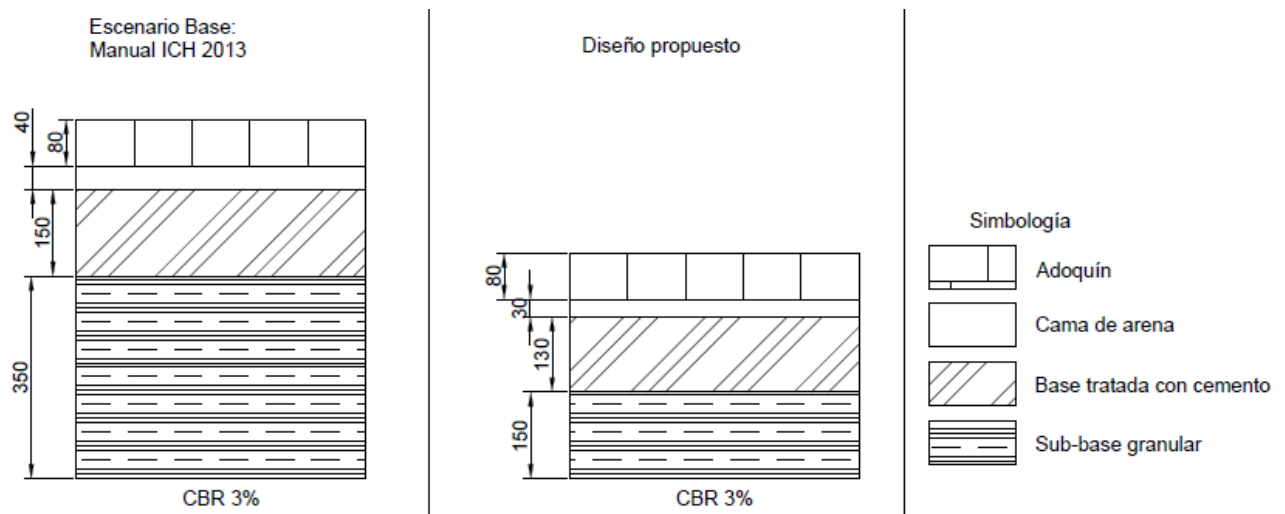
Paso 5: Como se tiene una categoría de tráfico nivel 6, el estilo de aparejo recomendado según la Tabla 4.3 es espina de pescado a 90° o 45°.

Por otro lado, según el Manual vigente del ICH, el dimensionamiento para categoría de tráfico medio (IIB), es de la siguiente manera, considerando las mismas solicitaciones que en el diseño propuesto:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 80 mm
- Espesor cama de arena: 40 mm
- Espesor de base granular: 150 mm

- Espesor de sub-base granular: 350 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

Se comparan los dimensionamientos del pavimento con ambos métodos, como se muestra en la Figura 4.5.



**Figura 4.5 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico medio.**

En ambos diseños, el espesor del adoquín es el mismo, 80 mm. Sin embargo, en el diseño propuesto, la capa de arena es 10 mm más delgada, la base tratada con cemento es 20 mm más delgada y la subbase granular es 200 mm más delgada. La disminución del espesor de las capas de pavimentos anteriormente mencionadas permite una reducción en la cantidad de materiales utilizados, lo que conlleva a una disminución en el consumo de recursos materiales y económicos, así como en las labores de movimiento de tierras, sin comprometer la resistencia del pavimento.

#### 4.6 Ejemplo de diseño de pavimentos vehiculares de tráfico pesado

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Se diseña un pavimento vehicular de tráfico medio de dos sentidos, en donde se tienen los siguientes datos:

- Tránsito Medio Diario Anual inicial: 5.200 (veh/día)
- Composición vehicular (%):

**Tabla 4.12 Composición vehicular para tráfico pesado.**

<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión +2E</b>
62%	20%	4%	8%	6%

- Número de pistas [NP]: 2
- Categoría de la vía: Colectora
- Vida útil del pavimento: 20 años

Se consideran las siguientes tasas de crecimiento, factores de equivalencia y FEE por cada tipo de vehículo.

**Tabla 4.13 Tasa de crecimiento, factor de equivalencia y FEE.**

	<b>Autos</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Buses</b>	<b>Camión 2E</b>	<b>Camión + 2E</b>
Tasa de crecimiento	6,91%	6,91%	6,48%	5,95%	5,95%
Factor de equivalencia	1	1	1,5	2	2,5
FEE	0	0	1,3	0,4	3

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Paso 1: Se debe estimar el flujo vehicular, previo a calcular los Ejes Equivalentes, por lo que, se inicia calculando el TMDA inicial para cada tipo de vehículo en una pista, de la siguiente forma, para  $t > 0$ , aplicando la Ecuación (4.1).

Obteniendo los siguientes resultados, consideran que el flujo de saturación se producirá en el año 7:

**Tabla 4.14 Proyección TMDA para tráfico pesado.**

<b>Año</b>	<b>TMDA (veh/día-año)</b>
<b>0</b>	3.630
<b>1</b>	3.871
<b>2</b>	4.128
<b>3</b>	4.402
<b>4</b>	4.694
<b>5</b>	5.006
<b>6</b>	5.338
<b>7</b>	5.501
<b>8</b>	5.501
<b>9</b>	5.501
<b>10</b>	5.501
<b>11</b>	5.501
<b>12</b>	5.501
<b>13</b>	5.501
<b>14</b>	5.501
<b>15</b>	5.501
<b>16</b>	5.501
<b>17</b>	5.501
<b>18</b>	5.501
<b>19</b>	5.501
<b>20</b>	5.501

Paso 2: Se debe estimar la demanda de tráfico en Ejes Equivalentes Acumulados hacia la vida de diseño, considerando los datos de flujos obtenidos, se calculan los Ejes Equivalentes, según la

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Ecuación (4.2):

$$EE(t) = 0,9 \cdot (TMDA(t)) \cdot [(4\% \cdot 1,3) + (8\% \cdot 0,4) + (5\% \cdot 3)] \cdot 365/2$$

En donde se asume que  $P_w$  es 0,9 y que los vehículos pesados son los buses y camiones.

En paralelo, se calcula el valor acumulado de los ejes equivalentes hasta la vida de diseño, según la Ecuación (4.3).

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4.15 Ejes Equivalentes obtenidos para tráfico pesado.**

Año	EE (por pista)		
	Anual	Acumulado	Día
0	157.404	157.404	431
1	167.849	325.253	460
2	178.989	504.242	490
3	190.872	695.114	523
4	203.547	898.661	558
5	217.067	1.115.728	595
6	231.488	1.347.216	634
7	238.549	1.585.765	654
8	238.549	1.824.315	654
9	238.549	2.062.864	654
10	238.549	2.301.413	654
11	238.549	2.539.962	654
12	238.549	2.778.512	654
13	238.549	3.017.061	654
14	238.549	3.255.610	654
15	238.549	3.494.159	654
16	238.549	3.732.709	654
17	238.549	3.971.258	654
18	238.549	4.209.807	654
19	238.549	4.448.356	654

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Año	EE (por pista)		
	Anual	Acumulado	Día
20	238.549	4.686.906	654

Se asigna una categoría de tráfico mediante los Ejes Equivalentes obtenidos en el último año de vida útil del pavimento. Al obtener 4.686.906 ejes equivalentes acumulados en el último año, se asigna la categoría de tráfico nivel 8, según lo establecido en la Tabla 4.1

Paso 3-4: Como el CBR del suelo natural es mayor al 2%, se obtiene el siguiente dimensionamiento para cada capa del pavimento:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 80 mm
- Espesor cama de arena: 30 mm
- Espesor de base asfáltica: 175 mm
- Espesor de base tratada con cemento: 230 mm
- Espesor de sub-base granular: 150 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

Paso 5: Como se tiene una categoría de tráfico nivel 8, el estilo de aparejo recomendado según la tabla 4.3 es espina de pescado a 90° o 45°.

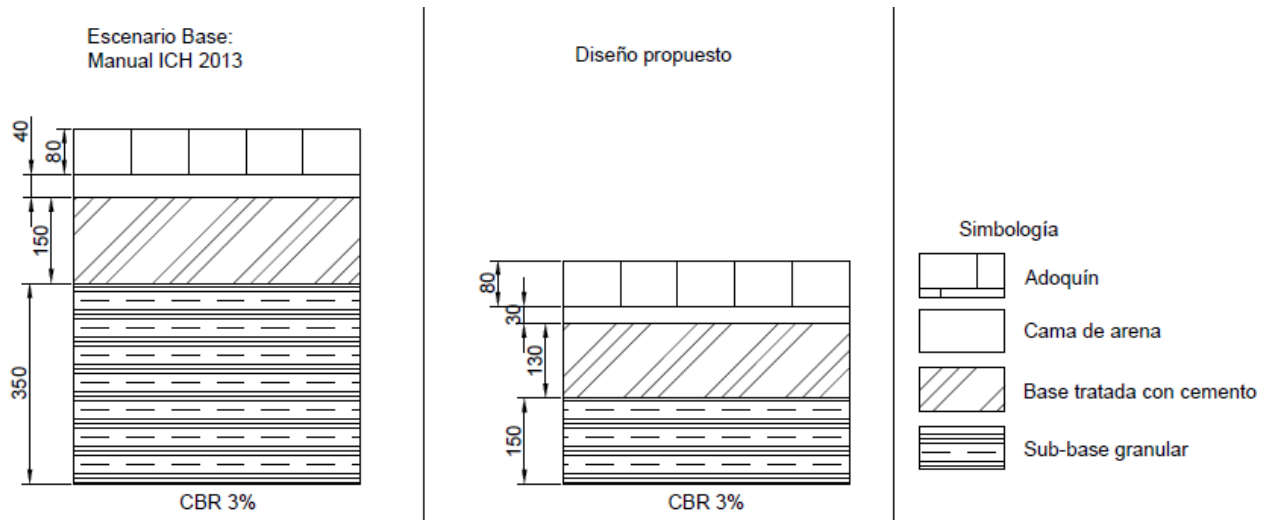
Por otro lado, según el Manual vigente del ICH, el dimensionamiento para categoría de tráfico pesado (IB), es de la siguiente manera, considerando las mismas solicitaciones que en el diseño propuesto:

- Espesor mínimo de adoquín de hormigón: 80 mm
- Espesor cama de arena: 40 mm
- Espesor de base granular: 150 mm

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

- Espesor de sub-base granular: 350 mm
- Espesor de mejoramiento de suelo: Sin mejoramiento de suelo

Se comparan los dimensionamientos del pavimento con ambos métodos, como se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6 Comparación de los espesores de todas las capas de pavimento entre escenario base y diseño propuesto para tráfico pesado.**

En ambos diseños, el espesor del adoquín es el mismo, 80 mm. Sin embargo, en el diseño propuesto, la capa de arena es 10 mm más delgada, la base tratada con cemento es 20 mm más delgada y la subbase granular es 200 mm más delgada, obteniendo exactamente las mismas diferencias que en el ejemplo de aplicación para tráfico medio. La disminución del espesor de las capas de pavimentos anteriormente mencionadas permite una reducción en la cantidad de materiales utilizados, lo que conlleva a una disminución en el consumo de recursos materiales y económicos, así como en las labores de movimiento de tierras, sin comprometer la resistencia del pavimento.

#### **4.7 Conclusiones**

La oportunidad de mejora a implementar en el procedimiento de diseño se debe a la actualización de la normativa de referencia de la BSI, así se obtiene un nuevo dimensionamiento de cada capa que compone el pavimento de adoquín de hormigón, basado en las nuevas categorías de tráfico. La propuesta de diseño se formula considerando todas las normativas y documentos vigentes en el año 2024.

Se propone un nuevo procedimiento de diseño sistemático, que contiene el detalle del cálculo de las solicitaciones, con un número reducido de tablas, proporcionando adicionalmente los estilos de aparejo que deben tener los adoquines según el nivel solicitación, con espesores de subbase reducidos, y ejemplos resueltos siguiendo esta nueva metodología en conjunto de ilustraciones de como debiese ser cada capa del pavimento.

Los ejemplos resueltos, se hicieron considerando un sistema no ligado y un CBR del suelo natural del 3%. Se realizó una comparación con los resultados obtenidos con la nueva propuesta de diseño y con lo descrito en el Manual de la ICH.

El diseño propuesto mejora significativamente la relación directa entre el dimensionamiento de los pavimentos y las categorías de tráfico. A diferencia del diseño del Manual 2013, donde esta relación no era de forma directa, por lo que el nuevo diseño permite un dimensionamiento más preciso y eficiente de las capas de pavimento según el tipo de tráfico.

El nuevo diseño elimina la dependencia del CBR de la subrasante, lo cual representa una ventaja importante en terrenos donde el CBR puede variar considerablemente.

Se logra una reducción significativa en la cantidad de pasos y tablas necesarias para el dimensionamiento, simplificando así el proceso. Esta simplificación no solo ahorra tiempo y

recursos, sino que también reduce la posibilidad de errores en la aplicación del diseño.

A diferencia del diseño del Manual 2013, que no definía con exactitud el dimensionamiento para tráfico liviano, el diseño propuesto proporciona un enfoque más preciso y detallado. Esto asegura que los pavimentos destinados a tráfico liviano sean diseñados de manera adecuada, mejorando su durabilidad y desempeño.

El diseño propuesto optimiza el espesor de la subbase granular, evitando la sobredimensión que caracterizaba al diseño del Manual 2013. Esto no solo reduce costos de material y construcción, sino que también mejora la eficiencia estructural del pavimento.

El nuevo diseño introduce la provisión de sistemas de aparejo de adoquines, lo cual no estaba contemplado en el Manual 2013. Esta incorporación mejora la estética, funcionalidad y resistencia del pavimento, adaptándose mejor a las necesidades específicas de cada proyecto.

Para la sollicitación de tráfico pesado, se obtuvo un espesor de subbase reducido en un 57%, en comparación con la metodología propuesta por la ICH, considerando que los espesores de la base granular tratada con cemento, la cama de arena y del adoquín se mantienen sin alteración.

Para la sollicitación de tráfico medio, se disminuyen los espesores de cada capa de pavimento, siendo la más significativa de la subbase, la cual se reduce en un 57%. Otro aspecto a considerar es que, en la metodología vigente, el dimensionamiento para los dos niveles de tráfico medio es completamente igual.

Para el tráfico liviano, se considera una sollicitación nivel 4, en este nivel en particular, se considera un dimensionamiento con bases granulares, granulares tratadas con cemento y tratadas con asfalto, por este motivo se obtiene un espesor de la subbase de 300 mm, manteniéndose sin alteración en comparación con lo propuesto en el Manual, sin embargo, la base tratada con hormigón aumenta su espesor en un 30%, mientras que cama de arena se reduce en un 25%, el espesor del adoquín se mantiene en ambos casos.

Capítulo 4: Propuesta de procedimiento de diseño de tráfico vehicular – peatonal y ejemplos de diseño a incorporar en el manual

Por último, con los niveles de tráfico exclusivamente peatonales, nivel 1, se mantiene el espesor de la subbase, pero no requiere ningún tipo de base, en comparación con lo descrito en el manual, la cual exige bases tratadas para todos los pavimentos peatonales.

## 5. CONCLUSIONES

Se identificaron diversas oportunidades de mejora en el diseño de pavimentos de adoquines, particularmente en la revisión y actualización de normativas nacionales e internacionales que establecen criterios de aceptación y métodos de ensayo para especificaciones de materiales como resistencia a la compresión, ciclos hielo/deshielo, abrasión, absorción y deslizamiento. La propuesta incluye adaptar estos métodos de ensayo a estándares más contemporáneos y específicos.

Para las especificaciones anteriormente mencionadas se tiene como oportunidad de mejora, una actualización con respecto a las normativas de referencia que definen los criterios de aceptación y los ensayos anteriormente mencionados, principalmente debido a que este año se publicó la primera normativa en Chile que define las especificaciones de los adoquines de hormigón.

El Manual debe actualizar los documentos de referencia que establecen los requisitos de materiales y graduación para las bases granulares. De la misma manera con las bases granulares tratadas con cemento, y adicionalmente, se evalúa la resistencia mínima característica, según lo que establece la versión actualizada del Manual de Carreteras y la normativa británica que define el procedimiento de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. Sin embargo, ningún valor presenta variación.

Se formuló un proceso de diseño sistemático que incorpora la normativa de adoquines de hormigón del Reino Unido actualizada, ofreciendo métodos claros para calcular las solicitaciones de tráfico y determinar los espesores mínimos de cada capa del pavimento. Este enfoque busca simplificar y optimizar el dimensionamiento estructural del pavimento, considerando el aumento de las categorías de tráfico y actualizadas.

El nuevo proceso de diseño se relaciona directamente con las categorías de tráfico, por lo que se obtiene una reducción en el número de pasos a realizar para obtener el dimensionamiento de los

pavimentos de adoquines de hormigón. Esto ocurre debido a que el diseño propuesto solo requiere dos tablas de dimensionamiento, una para el mejoramiento de suelos en el caso de requerirlo, mientras que la segunda entrega los espesores de todas las capas del pavimento.

El diseño propuesto no depende del CBR de la subrasante, siempre y cuando este sea mayor o igual al 2%. Otro aspecto importante por mencionar es que este nuevo proceso de diseño propone estilos de aparejo de los adoquines, dependiendo de la categoría de tráfico obtenida.

El diseño propuesto simplifica el proceso de diseño mediante la reducción de pasos y tablas. Además, proporciona un dimensionamiento más preciso para tráfico liviano y optimiza el espesor de la sub-base granular, evitando la sobredimensión del diseño anterior. Finalmente, incorpora sistemas de aparejo de adoquines, mejorando la funcionalidad y resistencia del pavimento.

El propósito del método propuesto consiste en evitar el sobredimensionamiento del espesor de la subbase granular, lográndose en todos los casos excepto cuando se obtiene la categoría 4 de tráfico. Esta reducción de espesores conlleva una disminución tanto en el consumo de recursos materiales y económicos como en el movimiento de suelos.

Desde una perspectiva económica, el nuevo diseño de pavimentos presenta ventajas significativas al reducir el espesor de las capas de pavimento. Esta optimización disminuye el consumo de materiales, lo cual resulta en una reducción de los costos de construcción y mantenimiento. Además, al simplificar el proceso de diseño y eliminar la sobredimensión de la subbase granular, se optimizan los recursos, generando ahorros adicionales. En conjunto, estos factores contribuyen a una mayor eficiencia económica, haciendo que el nuevo diseño sea una opción más rentable y sostenible a largo plazo.

## 6. REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials. (2020a). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*. ASTM Standard C148-20. Estados Unidos.

American Society for Testing and Materials. (2021a). *Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units*. ASTM Standard C936/C936M-21a. Estados Unidos.

American Society for Testing and Materials. (2021b). *Standard Test Method for Freeze-thaw and De-icing Salt Durability of Solid Concrete Interlocking Paving Units*. ASTM Standard C1645-21. Estados Unidos.

American Society for Testing and Materials. (2021c). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*. ASTM Standard C140/C140M-21. Estados Unidos.

British Standards Institution (2013). *Hydraulically bound mixtures- Specifications*. BS EN 14227-1:2013. Reino Unido.

British Standards Institution. (2001). *Precast, unreinforced concrete paving blocks-Requirements and test methods*. BSI 6717:2001. Reino Unido.

British Standards Institution (2021). *Pavements constructed with clay, concrete or natural Stone paving units. Code of practice for the structural design of pavements using modular paving units*. BS 7533-101:2021. Reino Unido.

Díaz, S. (2022). *Actualización del método de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón del “Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón”*. Universidad de Concepción.

## Referencias

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2013). Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón. Santiago.

MIDEPLAN (1992). Inversión Pública, Eficiencia y Equidad. Ministerio de Planificación Nacional. Chile.

Ministerio de Desarrollo Social de Chile y Steer Davies Gleave. (2013). *Estimación de Parámetros de Tránsito Generado en Proyectos de Vialidad Interurbana* (Informe Final). Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2010). Instrucciones y Criterios de diseño. Volumen 3. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2010a). Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Volumen 5. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2010b). Especificaciones y métodos de Muestreo, Ensayo y Control. Volumen 8. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2023). Instrucciones y Criterios de diseño. Volumen 3. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2023a). Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Volumen 5. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2023b). Especificaciones y métodos de Muestreo, Ensayo y Control. Volumen 8. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2023c). Seguridad Vial. Volumen 6. Manual de Carreteras. Chile.

## Referencias

Ministerio de Obras Públicas. (2023a). Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Volumen 5. Manual de Carreteras. Chile.

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2021). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile).

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1131679&idParte=10023917&idVersion=2021-09-14> .

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2008). Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación. Santiago.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2018). Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación. Santiago.

NHI (1993). AASHTO Design Procedure for New Pavements. National Highways Institute. Estados Unidos.

Rada, G. Smith, D. Miller, J. y Witczak, M. (1990). Structural Design of Concrete Block Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 116(5), 615-635.

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

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : María Paz Puentes Ríos  
**Título de la memoria** : Actualización de la guía chilena de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón para calles, caminos y pasajes

**Fecha de la presentación oral** :

**Profesor(es) Guía** : Tomás Echaveguren Navarro  
**Profesor(es) Revisor(es)** : Luis Merino Quilodrán  
**Concepto** :  
**Calificación** :

<b>Resumen</b>
<p>Los pavimentos de adoquines de hormigón ofrecen múltiples ventajas, como durabilidad en ambientes agresivos, rápida puesta en operación, fácil mantenimiento, seguridad vial y reutilización. En 2013, Chile no contaba con normas para su diseño, por lo que el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH) publicó la segunda edición del “Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón”, proponiendo un método de diseño para uso vehicular.</p> <p>Con el tiempo, se identificó una brecha en el estado del arte, especialmente tras la publicación de la primera norma nacional de adoquines de hormigón y por la actualización del método de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón del Reino Unido del 2021. Este trabajo analiza el Manual del ICH para proponer mejoras en especificaciones de adoquines, solicitudes de diseño y procedimientos de pavimentación, y presenta ejemplos de diseño para distintos tipos de tráfico vehicular y peatonal.</p> <p>Se concluye que los cambios en el estado del arte se deben a actualizaciones en las normas de especificaciones de materiales y solicitudes de diseño. Se propone relacionar directamente las categorías de tráfico con el dimensionamiento del pavimento para sistematizar el proceso de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón.</p>