

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Ing. Sergio Vargas Tejada



**IMPACTO EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS
DEBIDO A LA ACTUALIZACIÓN DE FACTORES
CAMIÓN EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JORGE IVÁN FLORES DÍAZ

CONCEPCIÓN, MARZO 2015

Con todo el amor y dedicación a Leopoldo Díaz Villablanca (Q.E.P.D), quien fue realmente el mejor padre y abuelo, el hombre más importante en mi vida y que de alguna forma sigue viviendo en mi persona a través de la importancia de sus palabras y acciones a lo largo de mi vida junto a él.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco a Dios por darme fortaleza y sabiduría, sobre todo en la adversidad, en el largo camino para convertirme en profesional. Agradezco a mi familia, especialmente a mi madre Lily Díaz Aburto y a mi abuela Sonia Aburto Vargas, por entregarme el valioso regalo de la educación, por ser el pilar fundamental en mi vida y por su constante consejo y apoyo incondicional en todos los sentidos posibles.

También agradezco al profesor Sergio Vargas por guiarme en este trayecto final de mi formación universitaria, por su valioso tiempo y buena disposición, por su profesionalismo y pedagogía que inspiran a trabajar con él y sobre todo por entregarme las herramientas necesarias para el desarrollo de esta memoria. De igual forma se agradece al Profesor Patricio Álvarez y Profesora Gilda Espinoza por su tiempo y paciencia como parte de la comisión de este trabajo de tesis, y también se agradece a todos los profesores del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío-Bío que de una u otra forma aportaron en mi formación académica y profesional en estos seis años de estudio y trabajo.

Finalmente agradezco a todos mis compañeros y amigos, por darme la confianza y el apoyo necesario en las buenas y malas situaciones a lo largo de este proceso, que está llegando a su fin para comenzar una nueva etapa en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	1
<i>1.2.1 Objetivo general.</i>	<i>1</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos.</i>	<i>1</i>
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO	2
2. SÍNTESIS DE ANTECEDENTES	4
2.1 INTRODUCCIÓN	4
2.2 FACTORES CAMIÓN ACTUALIZADOS	4
<i>2.2.1 Factor Camión</i>	<i>4</i>
<i>2.2.2 Factores Camión Manual de Carreteras</i>	<i>5</i>
<i>2.2.3 Actualización de FC.</i>	<i>5</i>
<i>2.3.1 Métodos empíricos</i>	<i>5</i>
<i>2.3.2 Métodos Mecanicistas</i>	<i>5</i>
2.4 PARÁMETROS DE DISEÑO	6
<i>2.4.1 Tránsito</i>	<i>6</i>
<i>2.4.2 Comportamiento del Pavimento</i>	<i>6</i>
<i>2.4.3 Confiabilidad</i>	<i>6</i>
<i>2.4.4 Subrasante y Drenaje</i>	<i>6</i>
3. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TRÁNSITO PESADO	7
3.1 INTRODUCCIÓN	7
3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN	7
3.3 IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES	7

3.4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO	8
3.5 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE TRÁNSITO PESADO DE LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO.....	8
4. MATRIZ DE DISEÑO.....	10
4.1 INTRODUCCIÓN.....	10
4.2 CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO.....	10
<i>4.2.1 Niveles de tránsito</i>	<i>10</i>
<i>4.2.2 Vida de diseño</i>	<i>10</i>
<i>4.2.3 Carga por eje.....</i>	<i>11</i>
4.3 CONDICIONES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	11
<i>4.3.1 Capas Asfálticas</i>	<i>11</i>
<i>4.3.2 Subrasante y clima según zona geográfica</i>	<i>11</i>
<i>4.3.3 Bases y Sub-bases.....</i>	<i>12</i>
<i>4.3.4 Índice de Serviciabilidad.....</i>	<i>12</i>
<i>4.3.5 Sentido de Pista</i>	<i>12</i>
4.4 CONDICIONES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.	12
<i>4.4.1 Tipo de Hormigón.....</i>	<i>12</i>
<i>4.4.2 Subrasante y clima según zona geográfica.</i>	<i>12</i>
<i>4.4.3 Sub-base</i>	<i>13</i>
<i>4.4.4 Índice de Serviciabilidad.....</i>	<i>13</i>
<i>4.4.5 Longitud de losa</i>	<i>13</i>
4.5 MATRIZ DE DISEÑO	14
5. PROPUESTA DE DISEÑO	15
5.1 INTRODUCCIÓN.....	15
5.2 ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE LA VÍA	15

5.3 CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS	17
5.4 CÁLCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES (NE).....	18
5.5 CÁLCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS RÍGIDOS (D).	18
6. ANÁLISIS COMPARATIVO	20
6.1 INTRODUCCIÓN.....	20
6.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	22
6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	23
6.5 IMPACTO EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	24
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXOS	30
ANEXO A	31
ANEXO B	36
ANEXO C	45
ANEXO D	47
ANEXO E	51
ANEXO F	54
ANEXO G.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución porcentual de TMDAC	9
Tabla 2. Distribución porcentual por categoría de TMDAC	9
Tabla 3. Niveles de tránsito	10
Tabla 4. Vida de diseño	10
Tabla 5. Niveles de carga por eje	11
Tabla 6. Subrasante y clima según zona geográfica	11
Tabla 7. Sentido de pista	12
Tabla 8. Subrasante y clima según zona geográfica	13
Tabla 9. Longitudes de losas	13
Tabla 10. Matriz de diseño para pavimentos flexibles	14
Tabla 11. Matriz de diseño para pavimentos rígidos	14
Tabla 12. Resumen verificación de capacidad	16
Tabla 13. Resumen EEac para pavimentos rígidos utilizando FC del MOP	17
Tabla 14. Resultados NE total para pavimentos flexibles en la zona de Chillán	18
Tabla 15. Resultados espesores de losa para pavimentos rígidos en la zona de Concepción	19
Tabla 16. Test de igualdad de medias	21
Tabla 17. Estructuración promedio de pavimentos flexibles	24
Tabla 18. Estructuración promedio de pavimentos rígidos	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de Trabajo	2
Figura 2. Esquema general cálculo de FC	4
Figura 3. Ubicación de estaciones de control	8
Figura 4. Comparación Espesores de Losa según Zona Geográfica	20
Figura 5. Comparación NE total.....	22
Figura 6. Comparación Espesores de Losa.....	23

IMPACTO EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DEBIDO A LA ACTUALIZACIÓN DE FACTORES CAMIÓN EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO

Autor: Jorge Iván Flores Díaz

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: jiflores@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Ph.D. Sergio Vargas Tejeda

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: svargas@ubiobio.cl

RESUMEN

En Chile, el diseño de pavimentos se rige por el método AASHTO, el cual requiere el cálculo de ejes equivalentes acumulados durante la vida útil, los ejes equivalentes se obtienen en base a los Factores Camión (FC). Actualmente el Manual de Carreteras propone FC calculados con información de la década del 90, sin embargo, existe una base de datos actualizada de FC de pavimentos flexibles (Torres, 2014) y de pavimentos rígidos (Pastrana, 2014), para la región del Bío-Bío.

En este estudio se evaluó el impacto en el diseño de pavimentos, debido a la actualización de FC, respecto de los FC propuestos por el Manual de Carreteras. En primer lugar se obtuvo una distribución porcentual de tránsito de vehículos pesados característicos de la región, se calcularon los ejes equivalentes acumulados para diferentes vidas de diseño, y se obtuvieron los diseños de pavimentos mediante PAVIVIAL para distintos escenarios de evaluación. Los resultados obtenidos fueron comparados con los diseños de pavimentos calculados mediante FC propuestos por el Manual de Carreteras evaluando el impacto en el diseño de pavimentos al utilizar FC actualizados.

Los principales resultados indican que el diseño de pavimentos tiene variaciones significativas al modificar las condiciones de tránsito, representadas principalmente por los FC. En términos generales, se tiene que utilizando FC actualizados se obtienen diseños de pavimentos de mayor dimensión respecto de los calculados según el Manual de Carreteras, con diferencias de entre un 10% a un 20% aproximadamente. Finalmente se recomienda realizar un estudio de evaluación económica de inversión y mantenimiento de los diseños calculados.

Palabras clave: ejes equivalentes acumulados, pavimentos flexibles y rígidos, factores camión.

6174 palabras texto + 24 tablas o ilustraciones*250 = 12174

ABSTRACT

In Chile, pavement design is governed by the AASHTO method, which requires the calculation of equivalent axes accumulated over the lifetime, the equivalent axes are obtained based on the factors Truck (FC). Currently the manual of roads, proposes FC calculated with data from the 90s, however, there is an updated database of FC flexible pavement (Torres, 2014) and rigid pavements (Pastrana, 2014), for the “región del Bío-Bío”.

This study evaluated the impact in pavement design, because updating FC regarding the FC proposed by the Manual for Roads. First, a percentage distribution of heavy vehicle traffic characteristic of the region was obtained, were calculated cumulative equivalent axle for different design lives, and were obtained pavement designs by PAVIVIAL for different evaluation scenarios. The results were compared with pavement designs calculated by FC proposed by the Manual for Roads, evaluating the impact on pavement design, using updated FC.

The main results indicate that pavement design has significant variations by changing traffic conditions, represented mainly by FC. In general, must be updated using FC, pavement designs thicker obtained respect to those calculated according to the Manual for Roads, with differences of between 10% to about 20%. Finally is recommended a study of economic evaluation of investment and maintenance of the calculated designs.

Keywords: equivalent axes accumulated, flexible and rigid pavements, truck factors.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Actualmente el diseño de pavimentos en Chile, se basa en el método AASHTO (1993) para pavimentos flexibles, y en el método AASHTO (1998) para pavimentos rígidos; que corresponden a un método empírico y empírico mecanicista respectivamente. Estos métodos requieren del cálculo de ejes equivalentes, para lo cual es necesario conocer los factores camión (FC) que dependen de la flota vehicular respectiva. Pastrana (2014) y Torres (2014); proponen factores camión actualizados para la región del Bío-Bío, los cuales fueron calculados en base a métodos mecanicista-empíricos, sin embargo, actualmente no se ha evaluado el impacto en el diseño de pavimentos, que sería generado por la utilización de estos factores camión en la región del Bío-Bío.

Al utilizar FC distintos a los recomendados por el Manual de Carreteras, se obtienen diferentes diseños de pavimentos, y por consiguiente, se tienen distintos costos de inversión y de mantenimiento en dichos diseños. Por ello es necesario evaluar el impacto de actualizar los FC, en el diseño de pavimentos en la región.

Por las razones mencionadas, este trabajo presenta una evaluación del impacto en el diseño de pavimentos rígidos y flexibles debido a la utilización de FC actualizados respecto de los FC propuestos por el Manual de Carreteras en la región del Bío-Bío, desde el punto de vista de la estructuración del pavimento, integrando los principales parámetros que intervienen en cada uno de los tipos de pavimentos mencionados.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general.*

Evaluar el impacto que genera la actualización de factores camión (FC), en el diseño de pavimentos rígidos y flexibles en la región del Bío-Bío.

1.2.2 *Objetivos específicos.*

- a) Sintetizar los antecedentes previos respecto de los FC actualizados, del método de diseño, y de los parámetros de diseño.
- b) Establecer distribuciones de tránsito pesado característico de la Región del Bío-Bío en base a información del Plan Nacional de Censos de Vialidad.

- c) Definir escenarios de evaluación para el diseño de pavimentos.
- d) Diseñar las soluciones de pavimentos para los escenarios propuestos, considerando FC del Manual de Carreteras Volumen N°3 (MCV3) y FC actualizados.
- e) Comparar las soluciones de pavimentos obtenidas utilizando FC propuestos del MCV3, respecto de las soluciones obtenidas utilizando FC actualizados.
- f) Evaluar el impacto que generaría la aplicación de FC actualizados, desde el punto de vista de la estructuración del pavimento.

1.3 Metodología de Trabajo

La metodología propuesta para esta investigación consta de 5 etapas como se muestra en la Figura 1, cada una de ellas dividida en dos o tres sub-etapas, con el fin de obtener un hito final de cada una de las etapas, que está directamente relacionado con los objetivos planteados anteriormente.

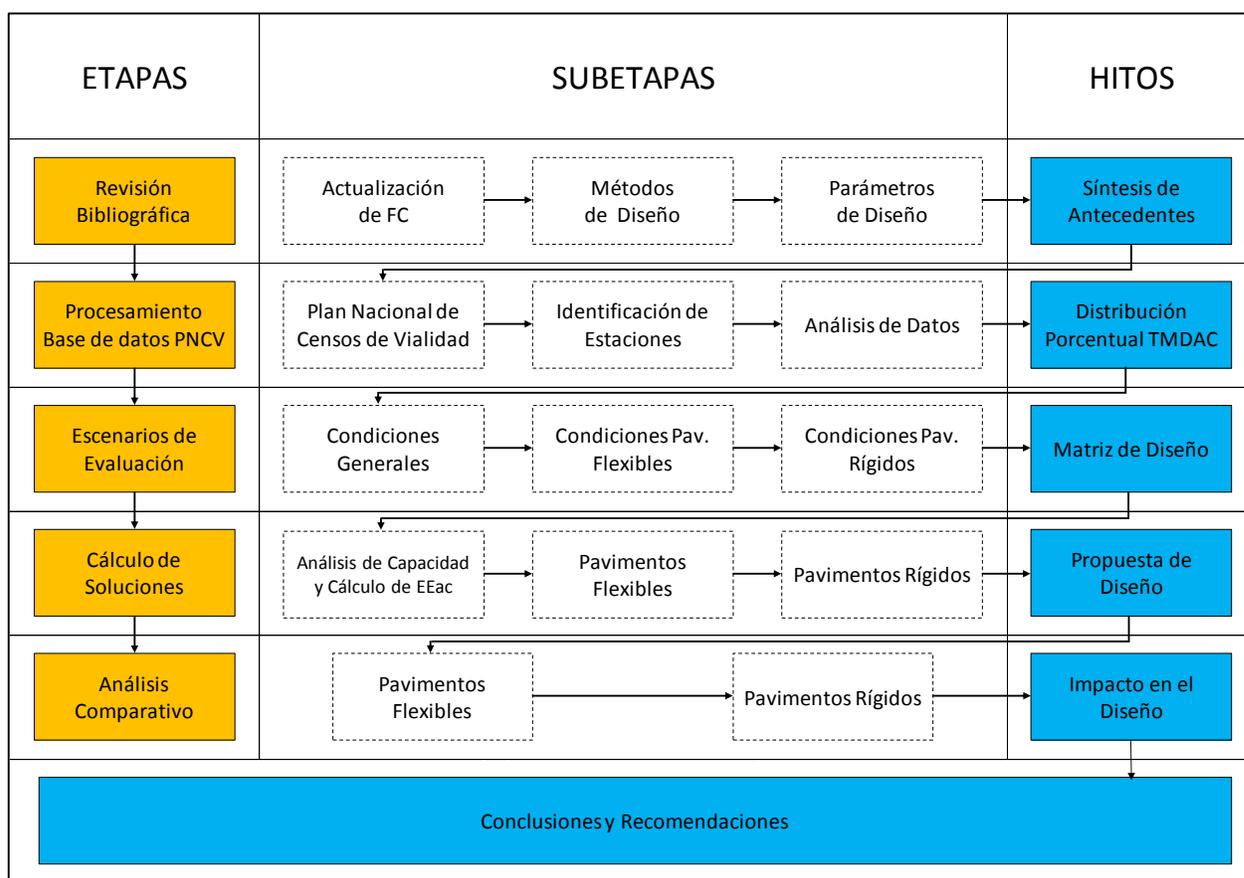


Figura 1. Metodología de trabajo

La primera etapa se refiere a una revisión bibliográfica y se divide en tres sub-etapas, que tienen por objetivo estudiar los aspectos básicos referidos al diseño de pavimentos para este trabajo, como describir antecedentes respecto de los factores camión actualizados para la región del Bío-Bío, los métodos de diseño a utilizar, y los parámetros de diseño. Como resultado se obtuvo una síntesis de antecedentes.

La segunda etapa se refiere al procesamiento de bases de datos del Plan Nacional de Censos de Vialidad (PNCV), respecto del tránsito medio diario anual (TMDA) y tránsito pesado medio diario anual (TMDAC) correspondientes. Se seleccionó una muestra de estaciones de control de censo de 24 horas, con el fin de obtener una distribución porcentual de tránsito pesado respecto del TMDA y a su vez, una distribución porcentual de los vehículos pesados característicos de la Región del Bío-Bío respecto del TMDAC.

En la tercera etapa “escenarios de evaluación” se establecen distintas combinaciones de variables de evaluación, según las características de la región, para utilizar en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos. Se establecieron condiciones de diseño como la materialidad de las capas de pavimento, vida de diseño, niveles de tránsito, como también se evaluaron distintas zonas geográficas y en algunos casos, diferentes sentidos de tránsito. El resultado final de esta etapa fue la elaboración de una matriz de diseño.

La cuarta etapa se refiere al cálculo de soluciones de pavimentos en base a las solicitudes requeridas para la región, tanto para pavimentos rígidos como flexibles. Se verificó que la capacidad de la vía no sea superada, se calcularon las solicitudes de tránsito (EEac) y se calcularon espesores de losa y números estructurales respectivamente, considerando los FC propuestos por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y los FC actualizados para la región. El hito final de esta etapa es una propuesta de diseño de pavimentos para la Región del Bío-Bío en base a los resultados obtenidos.

En la quinta y última etapa se realizó un análisis comparativo entre los diseños obtenidos, respecto de la utilización de FC actualizados y de la utilización de FC propuesto por el MOP, tanto para pavimentos flexibles como pavimentos rígidos. De esta manera, se obtuvo una evaluación del impacto que generaría la utilización de FC actualizados respecto de FC propuestos por el MOP, desde el punto de vista de la estructuración de pavimentos basada en la propuesta de diseño obtenida en la cuarta etapa. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para este estudio.

2. SÍNTESIS DE ANTECEDENTES

2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se presenta un resumen de la información básica requerida para el desarrollo de la presente investigación. Se definen antecedentes respecto de los factores camión actualizados para la región del Bío-Bío, los métodos de diseños, y los parámetros de diseño respectivos. En el Anexo A se presentan tablas que resumen esta síntesis de antecedentes.

2.2 Factores Camión Actualizados

2.2.1 Factor Camión

El FC es un factor que representa el daño ocasionado por vehículos pesados cuando estos pasan sobre el pavimento. Esta representación se realiza en función de una unidad patrón llamada Eje Equivalente (EE) también llamado eje estándar. Un EE es un eje simple de rodado doble (ESRD) que transmite una carga de 8.16 toneladas al pavimento. En otras palabras, que un vehículo pesado tenga un FC igual a 3.0, quiere decir que el daño producido por éste, equivale al daño de 3.0 pasadas de un EE. Este valor se puede calcular como la sumatoria de los factores de ejes equivalentes (FEE) de cada eje (Ec.1), de un vehículo. El FEE se define como el daño producido en el pavimento con el paso de un eje cualquiera dividido por el daño que se produce con el paso de un eje estándar (Ec.2). En la figura 2 se muestra un esquema general del cálculo de FC.

$$FC = \sum FEE_i \quad \text{Ec. (1)}$$

$$FEE = \frac{\text{Daño}_{eje_i}}{\text{Daño}_{eje_{st}}} \quad \text{Ec. (2)}$$

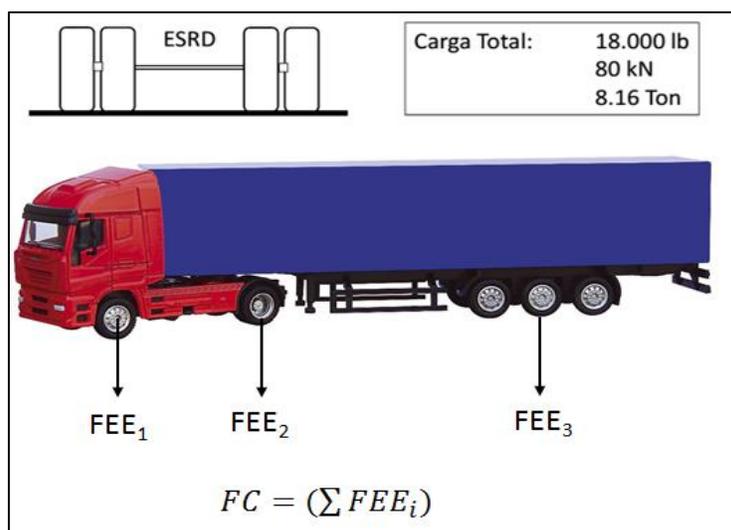


Figura 2. Esquema general cálculo de FC

2.2.2 Factores Camión Manual de Carreteras

Los FC propuestos por el Manual de Carreteras, dependen del tipo de pavimento; rígido o flexible, del tipo de vehículo pesado a evaluar, del sentido de tránsito de pista, y del índice de serviciabilidad final. Éstos FC se presentan en la Tabla 3.603.202 C “Ejes Equivalentes por Vehículo” del Manual de Carreteras Volumen N°3 (MCV3).

2.2.3 Actualización de FC

Pastrana (2014) propone FC actualizados para pavimentos rígidos, mientras que Torres (2014) propone FC actualizados para pavimentos flexibles. En sus respectivos trabajos, consideran un flujo de vehículos pesados característicos de la Región del Bío-Bío, por lo tanto, en este estudio se considera dicha flota vehicular que consiste en camión de dos ejes (categoría 1), camión de tres ejes (categoría 2), tracto camión más semirremolque (categorías 7 y 8), camión de tres ejes más semirremolque (categoría 10), camión de dos ejes más semirremolque (categoría 13), bus de dos ejes (categoría 73) y bus de tres ejes (categoría 74).

2.3 Método de Diseño

2.3.1 Métodos empíricos

Los métodos empíricos corresponden a procedimientos derivados básicamente de la experiencia, la principal debilidad de este tipo de procedimientos radica en las dificultades que presenta su adaptación a condiciones y realidades diferentes a las que existían en el lugar donde se realizaron las experiencias.

2.3.2 Métodos Mecanicistas

También llamados métodos teóricos, corresponden a procedimientos puramente analíticos, que se basa en que un pavimento puede modelarse como sistema multicapas. Estos tipos de procedimientos permiten calcular muy exactamente tensiones, deformaciones, y deflexiones originadas por las solicitaciones en cualquier punto de la estructura.

Su principal debilidad es que el diseño de pavimentos también depende de otros factores que no pueden ser modelados con exactitud. Esta debilidad se soluciona utilizando correlaciones empíricas; generando así los llamados métodos mecanicista-empíricos (M-E).

En este trabajo se utilizaron los métodos propuestos por el Manual de Carreteras, estos son; el método AASHTO (1993) para pavimentos flexibles, y el método AASHTO (1998) para pavimentos rígidos. El método AASHTO (1993) corresponde a un método empírico.

Sin embargo debido a las debilidades que este tipo de método presenta; fue necesario complementarlo con modelos matemáticos calibrados de acuerdo a las características de nuestro país, mientras que el método AASHTO (1998) corresponde a un método mecanicista-empírico; también con precisiones y complementos que se ajustan a la realidad chilena.

2.4 Parámetros de Diseño

A continuación se presentan los parámetros más importantes que intervienen en el diseño de pavimentos, según los métodos mencionados anteriormente propuestos por el Manual de Carreteras.

2.4.1 Tránsito

El tránsito está caracterizado por los siguientes factores: Tránsito Medio Diario Anual (TMDA), tasas de crecimiento, factor de ejes equivalentes (FEE), factor de pista de diseño, factor de dirección (Fd), y la capacidad de la vía.

2.4.2 Comportamiento del Pavimento

Este parámetro se caracteriza a través del índice de Serviciabilidad presente (pa) y el índice de rugosidad internacional (IRI).

2.4.3 Confiabilidad

Uno de los grandes problemas que se debe afrontar en el diseño de pavimentos, es la variabilidad de prácticamente todos los factores que intervienen, esta problemática generalmente es absorbida por factores de seguridad estadísticos definidos principalmente en base a la experiencia.

2.4.4 Subrasante y Drenaje

El método AASHTO para pavimentos flexibles, caracteriza los suelos de la subrasante mediante el módulo resiliente (M_r) y para pavimentos rígidos, caracteriza los suelos de la subrasante mediante el parámetro llamado Módulo de Reacción de la Subrasante (k). Por otra parte, el exceso de agua producido, puede generar deterioros en la estructura, por lo que es conveniente drenar el agua fuera de la estructura del pavimento. El método AASHTO considera los efectos del drenaje modificando los coeficientes estructurales (pavimentos flexibles) y los modelos de escalonamiento de juntas (pavimentos rígidos).

3. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TRÁNSITO PESADO

3.1 Introducción

En el presente capítulo se determina la distribución porcentual de tránsito de los vehículos característicos de la Región del Bío-Bío. A partir de esta información se obtuvo una base de datos actualizada de las solicitudes a considerar en el diseño de pavimentos para la Región del Bío-Bío.

3.2 Fuentes de información

Para obtener la distribución porcentual del tránsito pesado de la Región del Bío-Bío se utilizaron los datos del Plan Nacional de Censos de vialidad (PNCV) de la Dirección de Vialidad como fuente de información. El PNCV se realiza en cada año par y contempla tres muestras que se toman en verano (enero-abril), invierno (mayo-agosto) y primavera (septiembre-diciembre). Estas temporadas son representativas para la gran mayoría de los caminos censados. Las fechas en que se toman estas muestras se han establecido según estos tres períodos representativos del año.

3.3 Identificación de Estaciones

La información del PNCV contempla 109 estaciones de control de censo de tránsito en la Región del Bío-Bío, de las cuales 16 corresponden a estaciones de 24 horas de medición, el resto son asimilables a los puntos de 24 horas y se miden durante 12 horas, para transformar el tránsito de estas estaciones a 24 horas se utiliza factores de expansión diaria basados en las estaciones asimilables de 24 horas respectivas. Para este trabajo se utilizó sólo la información de estaciones de 24 horas y se escogieron las 6 estaciones con más tránsito controlado. Esta información se encuentra disponible en la página web de la Dirección de Vialidad (<http://www.vialidad.cl/>). Las estaciones de control escogidas se muestran en la Figura 3, los puntos negros y números rojos corresponden a la ubicación de la estación y su nombre, respectivamente.

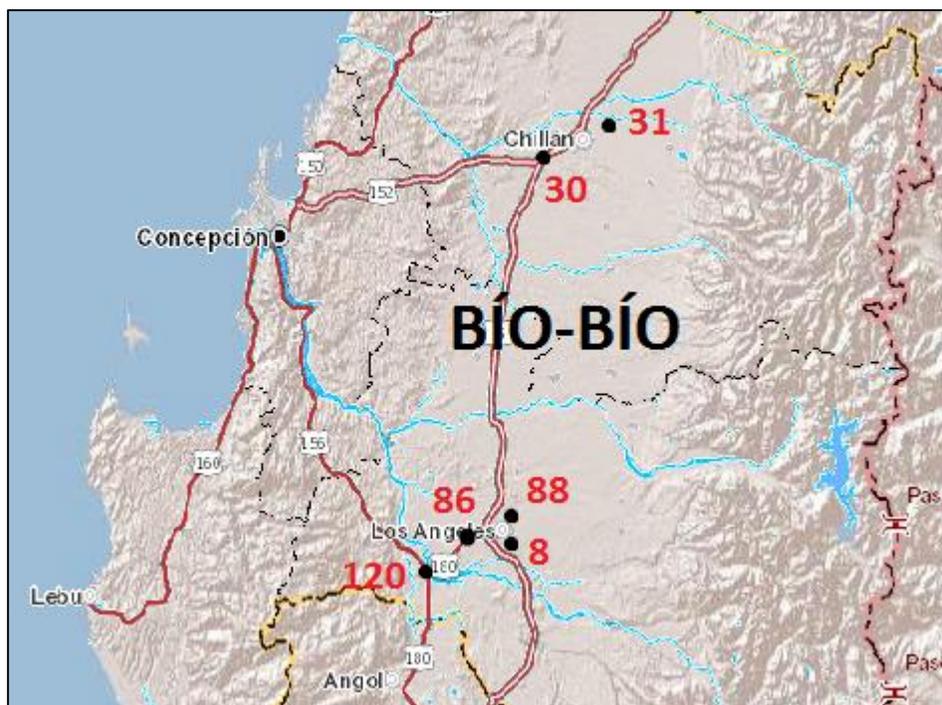


Figura 3. Ubicación de Estaciones de Control

3.4 Metodología de Cálculo

Para calcular la distribución porcentual de los vehículos pesados característicos de la Región del Bío-Bío; primero se procesaron los datos de los puntos escogidos de los años 2008, 2010 y 2012, luego se calculó el Tránsito Pesado Medio Diario Anual (TMDAC) promedio de cada estación de control y la distribución porcentual de cada tipo de vehículo pesado respecto del TMDAC. Con los cálculos realizados de todas las estaciones se procedió a calcular la distribución porcentual promedio de cada tipo de vehículo pesado entre todas estas estaciones de control. Además se incluyó el TMDA total para obtener la distribución porcentual promedio entre tránsito pesado y tránsito liviano en la red vial de la Región del Bío-Bío. Finalmente se repitió el procedimiento mencionado para todos los años escogidos y se obtuvo la distribución porcentual del TMDAC de la Región del Bío-Bío. Sin embargo, esta distribución porcentual se subdivide en las categorías de vehículos pesados característicos de la Región del Bío-Bío cuya proporción se obtuvo al procesar los datos de Encuestas Origen/Destino (EOD) del trabajo de Pastrana (2014).

3.5 Distribución Porcentual de Tránsito Pesado de la Región del Bío-Bío

Se obtuvo que el tránsito de vehículos en la Región del Bío-Bío se distribuye en un 75% de vehículos livianos y un 25% de vehículos pesados. En la Tabla 1 se presenta la distribución porcentual del tránsito pesado. La información completa del cálculo se puede apreciar en el Anexo B.

Tabla 1. Distribución porcentual de TMDAC

Tipo de Vehículo Pesado	Distribución Porcentual Promedio (%)
Camión de 2 Ejes	34
Camión de más de 2 Ejes	14
Semirremolque	12
Remolque	17
Locomoción Colectiva	23

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 2 se presenta la distribución porcentual por categoría del tránsito pesado. El procesamiento de datos de las EOD se puede observar en el Anexo B.

Tabla 2. Distribución porcentual por categoría de TMDAC

Tipo de Vehículo Pesado	Categoría	Distribución Porcentual Promedio (%)
Camión de 2 Ejes	1	34
Camión de más de 2 Ejes	2	14
Semirremolque	7	6
	8	6
Remolque	10	9
	13	8
Locomoción Colectiva	73	16
	74	7

Fuente: Elaboración propia

4. MATRIZ DE DISEÑO

4.1 Introducción

En este capítulo se definen diferentes escenarios para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos en la Región del Bío-Bío, tales como niveles de tránsito, configuraciones de tránsito característico, materiales de las capas que conforman el pavimento, dimensiones, zonas geográficas, vida de diseño, entre otros.

4.2 Condiciones generales de diseño.

4.2.1 Niveles de tránsito

Se utilizaron niveles bajo, medio y alto para evaluar distintos estándares de camino, que están asociados a las solicitudes del camino (EEac), estas a su vez dependen de la distribución porcentual de tránsito en la región. Los niveles de tránsito están definidos por Valdebenito (2011) y fueron adaptados por Pastrana (2014) para la matriz de evaluación. Ver Tabla 3.

Tabla 3. Niveles de tránsito

Nivel	TMDAC (veh./día)	Nomenclatura en Matriz de Diseño	Tipo de camino	Factor de Pista	Factor de Dirección
Bajo	246	B	Bidireccional	1	0,5
Medio	658	M	Unidireccional	0,94	1
Alto	1451	A	Unidireccional	0,94	1

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 Vida de diseño

Se muestran tres valores de vida de diseño del pavimento; bajo, medio y alto. Estos valores definen la cantidad de ejes acumulados durante la respectiva vida de diseño, dependiendo del nivel de tránsito esperado y de la distribución del tránsito en la región. Esta información ha sido extraída y adaptada desde el MCV3 del MOP y se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Vida de diseño

Nivel	Vida de Diseño (años)	Nomenclatura en Matriz de Diseño
Bajo	10	V10
Medio	15	V15
Alto	20	V20

Fuente: MCV3, MOP (2014)

4.2.3 Carga por eje

Las cargas por eje utilizadas fueron extraídas del trabajo de tesis de Pastrana (2014), y se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Niveles de carga por eje

Nivel de Carga	Carga a Utilizar	Nomenclatura en Matriz de Diseño
Bajo	Percentil 15	P15
Medio	Media	P50
Alto	Percentil 85	P85

Fuente: Pastrana (2014)

4.3 Condiciones de Diseño de Pavimentos Flexibles

4.3.1 Capas Asfálticas

Se consideran tres capas asfálticas en la estructura del pavimento flexible las cuales son; un base asfáltica de coeficiente estructural 0,33; una capa intermedia o bínder de coeficiente estructural 0,41; y una carpeta asfáltica de coeficiente estructural 0,43. Cada una de las capas debe tener un espesor mínimo de 50 milímetros.

4.3.2 Subrasante y clima según zona geográfica

La subrasante para pavimentos flexibles está caracterizada por el Módulo Resiliente que se correlaciona con la capacidad de soporte (CBR) del suelo de fundación. Para la matriz de diseño se escogieron los datos de subrasante y clima para una zona costera (Concepción) y una zona intermedia (Chillán), obtenidos a través de la Guía de Diseño (MINVU, 2007) y del MCV3. Dichos datos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Subrasante y clima según zona geográfica

Zona Geográfica	CBR(%)	Mr(Mpa)	TMAPA (°C)
Concepción	16	101	12,6
Chillán	10	77	13,8

Fuente: Elaboración propia

El módulo resiliente fue obtenido mediante las siguientes correlaciones.

$$M_r = 17.652 \times (CBR)^{0,64} \quad (Mpa) \quad 2\% < CBR \leq 12\% \quad \text{Ec. (3)}$$

$$M_r = 22.065 \times (CBR)^{0,55} \quad (Mpa) \quad 12\% < CBR \leq 80\% \quad \text{Ec. (4)}$$

4.3.3 Bases y Sub-bases

Según disposición del MCV3 ambas capas deben ser granulares y tener un espesor mínimo de 150 milímetros cada una. Además la sub-base debe tener un CBR mínimo de 40% y coeficiente estructural de 0,12; mientras que la base debe contar al menos con un 80% de CBR y coeficiente estructural de 0,13.

4.3.4 Índice de Serviciabilidad

Para pavimentos flexibles, el MCV3 recomienda un índice de serviciabilidad inicial (p_i) de 4,2 y serviciabilidad final (p_f) de 2,0.

4.3.5 Sentido de Pista

Se consideran 2 sentidos de pista; que son, con tránsito acercándose a Santiago, y tránsito alejándose de Santiago, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Sentido de pista

Pista	Nomenclatura en Matriz de Diseño
Alejándose de Santiago	12
Acercándose a Santiago	34

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Condiciones de Diseño de Pavimentos Rígidos.

4.4.1 Tipo de Hormigón

Para el diseño se utilizó hormigón H-40 con una resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de 40 Mpa registrada a los 28 días. El módulo de elasticidad del hormigón utilizado fue de 29000 Mpa y coeficiente de poisson de 0,15 según consideraciones del MCV3. La resistencia a la flexotracción tomada a los 28 días se consideró de 5 Mpa, la cual está dentro del rango de vías principales y autopistas en la tabla 3.604.207.A del MCV3 (2014). Además se utilizaron losas de hormigón del tipo JPCP (hormigón simple sin barras de traspaso de carga), sin presencia de drenes laterales y presencia de bermas tipo borde libre.

4.4.2 Subrasante y clima según zona geográfica.

La subrasante para pavimentos rígidos está caracterizada por el Módulo de Reacción de la Subrasante (k) que se correlaciona con la capacidad de soporte (CBR) del suelo de fundación.

Para la matriz de diseño se utilizaron los datos de clima y subrasante para una zona costera (Concepción) y una zona intermedia (Chillán), obtenidos a través de la Guía de Diseño (MINVU, 2007) y del MCV3. Dichos datos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Subrasante y clima según zona geográfica

Zona Geográfica	CBR(%)	k(Mpa/m)	V. Viento (nudos)	T° Media (°C)	PP. Media (mm)	N5 (días)
Concepción	16	66	9,1	12,4	1087,2	78
Chillán	10	55	5,6	12,7	1163	56

Fuente: Elaboración propia

El módulo de Reacción de la subrasante fue obtenido mediante las siguientes correlaciones.

$$k = 2.55 + 52.5 \times \log(CBR) \quad (Mpa/m) \quad CBR \leq 10\% \quad \text{Ec. (5)}$$

$$k = 46,0 + 9.08 \times (\log(CBR))^{4,34} \quad (Mpa/m) \quad CBR > 10\% \quad \text{Ec. (6)}$$

4.4.3 Sub-base

El material de sub-base se consideró como un suelo granular con un CBR mínimo de 50%, espesor de 150mm, un módulo de elasticidad de 207,75 Mpa y coeficiente de fricción medio de 1.4 según las disposiciones del MCV3.

4.4.4 Índice de Serviciabilidad

Para pavimentos rígidos, el MCV3 recomienda un índice de serviciabilidad inicial (p_i) de 4,5 y serviciabilidad final (p_f) de 2,0.

4.4.5 Longitud de losa

Se consideraron tres largos de losa en este estudio, los cuales fueron extraídos del trabajo de tesis de Pastrana (2014). La tabla 15 presenta las longitudes de losa utilizadas.

Tabla 9. Longitudes de losas

Nivel	Longitud de Losa (m)	Nomenclatura en Matriz de Diseño
Corta	3	L1
Mediana	4	L2
Larga	5	L3

Fuente: Pastrana (2014)

4.5 Matriz de Diseño

El hito final de esta etapa fue la elaboración de una matriz de diseño en base a escenarios de evaluación representativos de la Región del Bío-Bío. Como se consideran parámetros diferentes para cada tipo de pavimento; se obtuvieron matrices de diseño diferentes para pavimentos flexibles y rígidos, en estas matrices de diseño se calcularon las estructuraciones respectivas del tipo de pavimento. En el caso de pavimentos flexibles, la matriz de diseño muestra el número estructural (NE) calculado para cada escenario de evaluación, mientras que para pavimentos rígidos se calcularon los espesores (D) de losas, respectivos de cada escenario. En las Tablas 11 y 12 se presentan un fragmento de las respectivas matrices de diseño, las matrices completas se pueden apreciar en el Anexo C.

Tabla 10. Matriz de diseño para pavimentos flexibles

ZONA GEOGRÁFICA (CO o CH)										
		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	12	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	34	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18
Pi ↓	12	N19	N20	N21	N22	N23	N24	N25	N26	N27
	34	N28	N29	N30	N31	N32	N33	N34	N35	Nn

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Matriz de diseño para pavimentos rígidos

		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	L1	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
	L2	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
	L3	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27
Pi ↓	L1	D28	D29	D30	D31	D32	D33	D34	D35	D36
	L2	D37	D38	D39	D40	D41	D42	D43	D44	Dn

Fuente: Elaboración propia

Pi: Nivel de carga por eje, con $i = 15, 50, 85$.

Nn: Escenario correspondiente a la combinación n, con $n = [1 - 72]$.

Dn: Escenario correspondiente a la combinación n, con $n = [1 - 108]$.

5. PROPUESTA DE DISEÑO

5.1 Introducción

En este capítulo se explica el procedimiento para el cálculo de espesores, tanto en pavimentos de asfalto como de hormigón, y válido tanto para factores camión propuestos por el MCV3 como para factores camión actualizados. Además se presentan los resultados obtenidos para la matriz de diseño presentada en el capítulo anterior, lo que deriva en una propuesta de diseño de pavimentos para la Región del Bío-Bío. Para realizar este procedimiento se utilizó el software PAVIVIAL, sin embargo este software no realiza análisis de capacidad de la vía, por lo tanto fue necesario verificar manualmente que la capacidad de la vía no se vea superada.

5.2 Análisis de Capacidad de la vía

Es importante verificar que la capacidad de la vía no sea superada nunca durante la vida de diseño. Para realizar este análisis se siguieron los siguientes pasos.

Primero, con los datos obtenidos en el capítulo 3 de distribuciones porcentuales de tránsito, se establecieron los TMDA de cada tipo de vehículo para los distintos niveles de tránsito de la matriz de diseño (B, M, A), y luego se calculó el volumen horario utilizando la siguiente expresión.

$$VH = 0,12 \times (TMDA_i \times F_i) \quad (\text{Veh. equivalente/hora/pista}) \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

VH: Volumen horario

TMDA_i: TMDA del vehículo tipo “i”

F_i: Factor de Vehículo equivalente del vehículo tipo “i”

Luego, se proyectó el tránsito para las distintas vidas de diseño presentadas en el capítulo anterior (10, 15 y 20 años) a través de las siguientes expresiones.

$$TMDA_1 = TMDA_0 \times (1 + i)^n \quad (\text{Veh./día}) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$TMDA_{A(N,i)} = TMDA \times \frac{(1+i)^N - 1}{i} \times 365 \quad (\text{Veh./día}) \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

TMDA₀: TMDA del año en estudio

$TMDA_1$: TMDA del año de puesta en servicio de la vía

i: Tasa de crecimiento regional

n: período de tiempo entre el año de estudio y el año de puesta en servicio

$TMDA_{A(N,i)}$: TMDA acumulado al año N

N: período de tiempo entre el año de puesta en servicio y el año de vida de diseño

Cabe destacar que para este trabajo se consideró el año 2014 como el año de estudio, y se utilizó como supuesto que el año de puesta en servicio será el año 2016. Luego se repitió el cálculo de volumen horario (VH) para los años de la vida de diseño y finalmente se comparó con la capacidad máxima de la vía según MCV3. En la Tabla 12 se presenta un resumen con los resultados obtenidos, el detalle de todos los resultados se puede observar en el Anexo D.

Tabla 12. Resumen verificación de capacidad

TRÁNSITO ALTO			
AÑO	TMDA TOTAL	VH	CAPACIDAD
2014	5804	908	2200
2016	6181	967	2200
2025	8241	1304	2200
2030	9704	1549	2200
2035	11458	1849	2200
TRÁNSITO MEDIO			
AÑO	TMDA TOTAL	VH	CAPACIDAD
2014	2632	412	2200
2016	2803	439	2200
2025	3737	591	2200
2030	4401	703	2200
2035	5196	839	2200
TRÁNSITO BAJO			
AÑO	TMDA TOTAL	VH	CAPACIDAD
2014	984	154	1400
2016	1048	164	1400
2025	1397	221	1400
2030	1645	263	1400
2035	1943	314	1400

Fuente: Elaboración propia

Se observa claramente que la capacidad de la vía nunca es superada para los tránsitos señalados.

5.3 Cálculo de Ejes Equivalentes Acumulados

El software PAVIVIAL calcula ejes equivalentes acumulados en la vida de diseño sólo para una flota vehicular tipo, pero no considera la flota vehicular utilizada en los FC actualizados, y para efectos de este trabajo se necesita obtener este tipo de solicitud para una flota vehicular característica de la región del Bío-Bío, por lo tanto, fue necesario realizar el cálculo de ejes equivalentes acumulados en forma manual, tanto para pavimentos rígidos como para pavimentos flexibles. Para llevar a cabo este cálculo primero fue necesario proyectar el tránsito a los respectivos años de la vida de diseño con las ecuaciones (8) y (9). Luego se procedió a calcular los ejes equivalentes para cada año de la vida de diseño con la siguiente ecuación.

$$EE = (TMDA_i \times FC_i) \times 365 \times Fp \times Fd \quad (\text{Ejes Equivalentes}) \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

TMDA_i: TMDA del vehículo pesado tipo i

EE: Ejes equivalentes o estándar

FC: Factor camión del vehículo pesado tipo i

Fp: Factor de pista de diseño

Fd: Factor de dirección.

A continuación se presenta como ejemplo una tabla resumen con los Ejes Equivalentes acumulados calculados para pavimentos flexibles utilizando FC propuestos por el MOP (Ver Tabla 13). El resumen completo se puede apreciar en el Anexo E.

Tabla 13. Resumen EEac para pavimentos rígidos utilizando FC del MOP

Combinación	EEac
D(82,91,100)	1.155.994
D(83, 92, 101)	5.813.050
D(84, 93, 102)	12.818.747
D(85,94,103)	1.966.505
D(86, 95, 104)	9.888.800
D(87, 96, 105)	21.806.457
D(88,97,106)	2.995.284
D(89, 98, 107)	15.062.141
D(90, 99, 108)	33.214.539

Fuente: Elaboración propia

5.4 Cálculo de espesores de pavimentos flexibles (NE).

Para el cálculo de Números estructurales de pavimentos flexibles mediante PAVIVIAL se utilizan como variables de entrada las condiciones y parámetros de diseño respectivos mostrados en el capítulo 4, y los Ejes Equivalentes calculados para pavimentos flexibles.

A continuación se presentan los resultados de números estructurales totales para la matriz de diseño en la zona de Chillán (Ver Tabla 14). El método de cálculo y todos los resultados obtenidos se pueden apreciar en el Anexo F.

Tabla 14. Resultados NE_{total} para pavimentos flexibles en la zona de Chillán

CHILLÁN										
		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	12	104	104	104	104	104	107	104	104	114
	34	104	104	104	104	104	107	104	104	114
P50	12	104	104	114	104	109	122	104	116	128
	34	104	104	114	104	109	122	104	116	127
P85	12	104	114	125	104	120	135	104	127	145
	34	104	114	126	104	120	137	104	127	145
MOP	12	104	104	107	104	104	114	104	107	120
	34	104	104	104	104	104	112	104	107	116

Fuente: Elaboración propia

5.5 Cálculo de espesores de pavimentos rígidos (D).

Para el cálculo de espesores de losa de pavimentos rígidos mediante PAVIVIAL se utilizan como variables de entrada las condiciones y parámetros de diseño respectivos mostrados en el capítulo 4, y los ejes equivalentes calculados para pavimentos rígidos.

A continuación se presentan los resultados de espesores de losa para la matriz de diseño en la zona de Concepción (Ver Tabla 15). El método de cálculo y todos los resultados obtenidos se pueden apreciar en el Anexo F.

Tabla 15. Resultados espesores de losa para pavimentos rígidos en la zona de Concepción

CONCEPCIÓN										
		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	L1	180	180	180	180	180	190	180	180	200
	L2	180	180	180	180	180	190	180	180	210
	L3	180	180	180	180	180	200	180	190	210
P50	L1	180	180	200	180	190	230	180	200	240
	L2	180	180	210	180	200	230	180	210	250
	L3	180	180	210	180	200	250	180	220	260
P85	L1	180	200	240	180	230	270	180	240	290
	L2	180	210	250	180	240	280	180	260	300
	L3	180	220	260	180	250	290	190	270	<u>300</u>
MOP	L1	180	180	210	180	200	240	180	220	260
	L2	180	180	210	180	200	240	180	230	270
	L3	180	190	220	180	210	250	180	240	280

Fuente: Elaboración propia

6. ANÁLISIS COMPARATIVO

6.1 Introducción

En este capítulo se sintetizan y comparan los resultados de espesores de losa y NE_{total} , utilizando FC actualizados y utilizando FC propuestos por el MOP respectivamente. Se comparan estadísticamente distintos escenarios, y se aprecian las diferencias que existen de las soluciones promedio de pavimentos de dichos escenarios. Los resultados se presentan en gráficos box-plot o diagrama de cajas obtenidos a través del software InfoStat.

6.2 Análisis Estadístico

Para saber si existen diferencias significativas entre las soluciones de pavimentos comparando distintos escenarios; se realizó un test de igualdad de medias mediante la “prueba t” realizada a través del software InfoStat.

En la Figura 4 se presentan los resultados de los espesores de pavimentos rígidos comparando diferentes zonas geográficas (Concepción y Chillán) con su respectivo test de igualdad de medias.

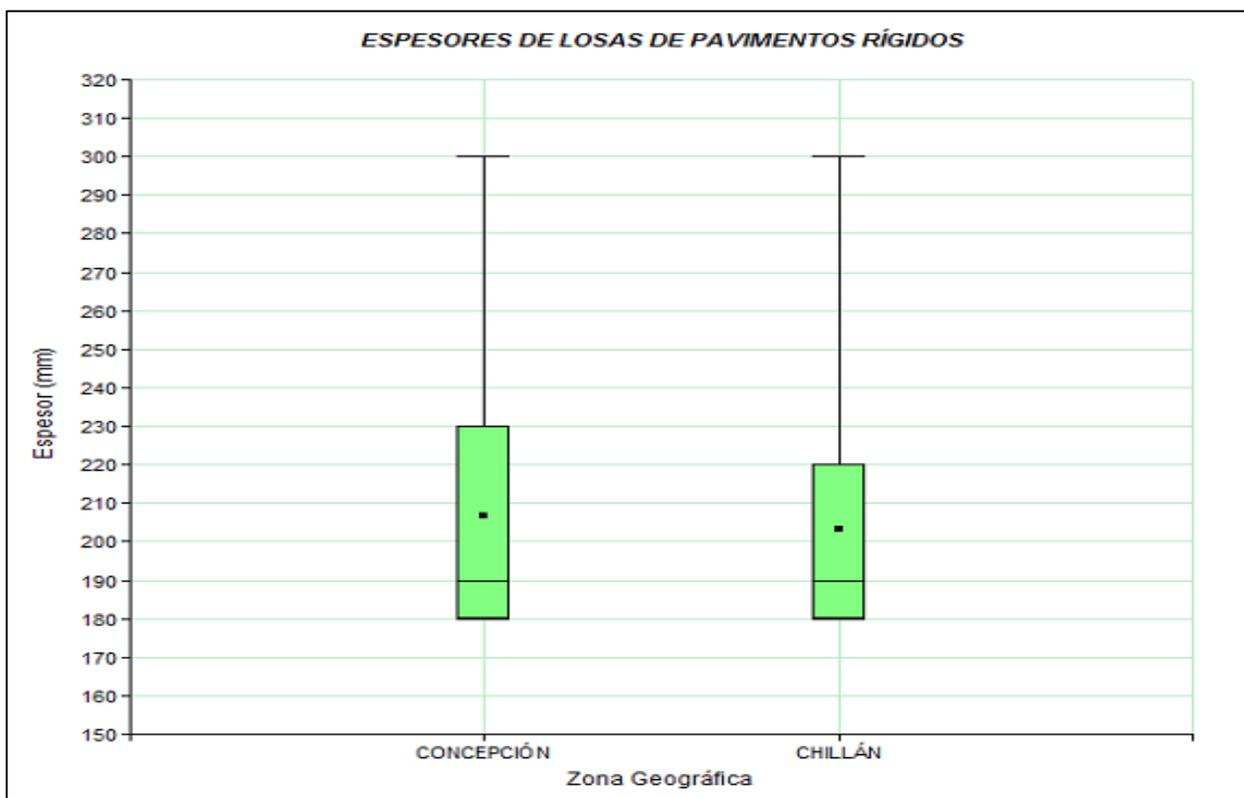


Figura 4. Comparación Espesores de losa según Zona Geográfica

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura 4, se puede observar a simple vista que los resultados son muy semejantes entre ambas zonas geográficas. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado. (Ver Tabla 16).

Tabla 16. Test de Igualdad de Medias (Prueba t)

Prueba t para muestras Independientes		
Variable: Espesor - Clasificación: Zona Geográfica		
Zona:	Chillán	Concepción
n:	108	108
Media:	210	210
Diferencia de Medias	0	
LI (95)	-12,48	
LS (95)	4,89	
t	-0,86	
p-valor	0,3897	

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 16, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de ambas muestras son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos en Chillán y Concepción. Este análisis permite agrupar en una única base de datos todos los resultados de Chillán y Concepción. Se realizó el mismo análisis para comparar otros parámetros como los niveles de tránsito o los FC utilizados, tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos. Los detalles de dicho análisis se presentan en el Anexo G.

6.3 Análisis Comparativo de Pavimentos Flexibles

Una vez realizado el análisis estadístico anterior en los diferentes parámetros de diseño de pavimentos flexibles, se procedió a comparar los escenarios donde sí existen diferencias significativas entre las medias de NE_{total} calculadas. Los resultados respectivos se presentan en el siguiente diagrama de cajas. (Ver Figura 5).

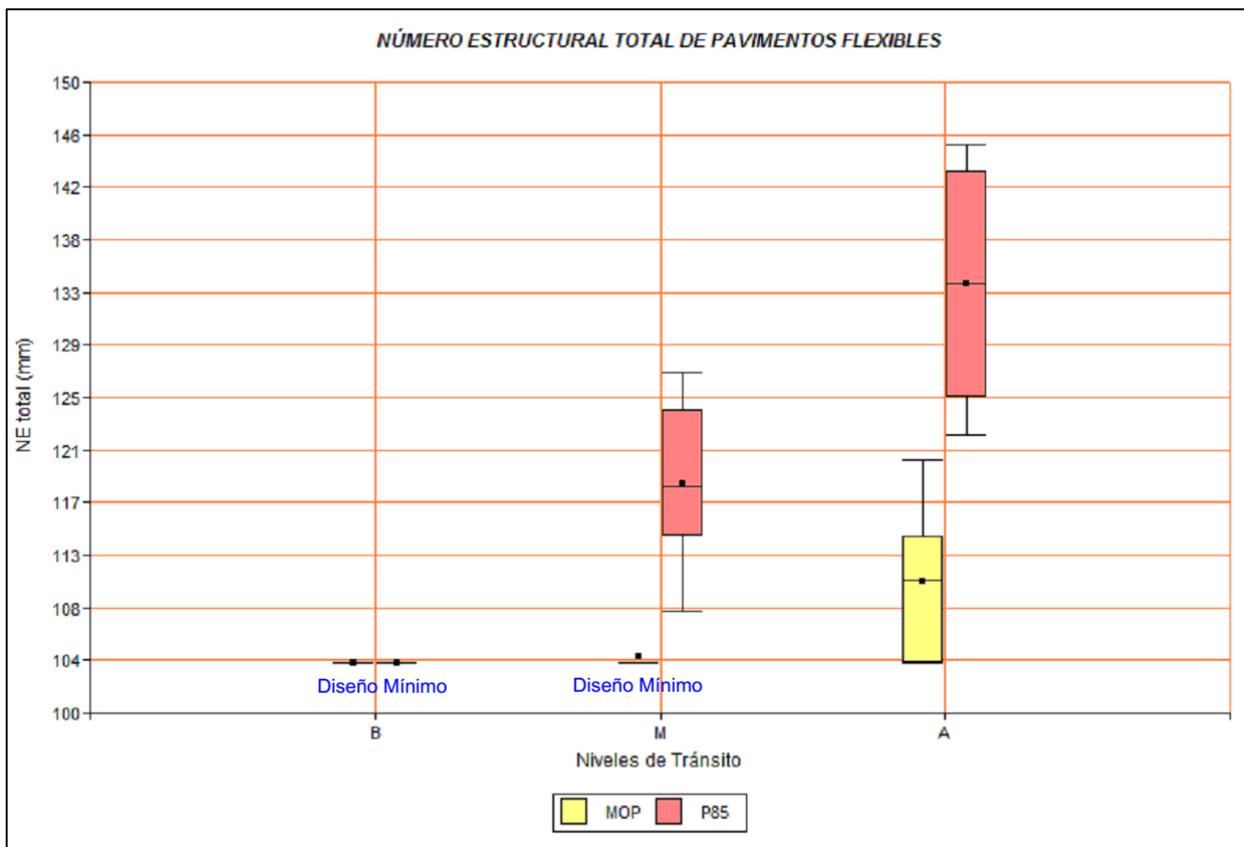


Figura 5. Comparación NE_{total}

Como se puede observar en la Figura 5 se comparan NE_{total} para diferentes niveles de tránsito, y para diferentes FC, ya que en esas circunstancias existen diferencias significativas en el diseño de pavimentos flexibles en la región del Bío-Bío. Se aprecia que los números estructurales más elevados se dan en condiciones de tránsito alto y para niveles de carga por eje también altos (P85) siendo en promedio 135 mm. aproximadamente, mientras que los números estructurales más bajos se dan para niveles de tránsito bajo independiente de los niveles de carga por eje, correspondientes a 104 mm. aproximadamente. Cabe destacar, que no se muestran comparaciones con niveles de carga por eje P50 y P15, ya que en promedio son muy similares a las soluciones calculadas utilizando FC MOP.

6.4 Análisis Comparativo de Pavimentos Rígidos

Una vez realizado el análisis estadístico anterior en los diferentes parámetros de diseño de pavimentos rígidos, se procedió a comparar los escenarios donde sí existen diferencias significativas entre las medias de espesores de losa calculados. Los resultados respectivos se presentan en el siguiente diagrama de cajas. (Ver Figura 6).

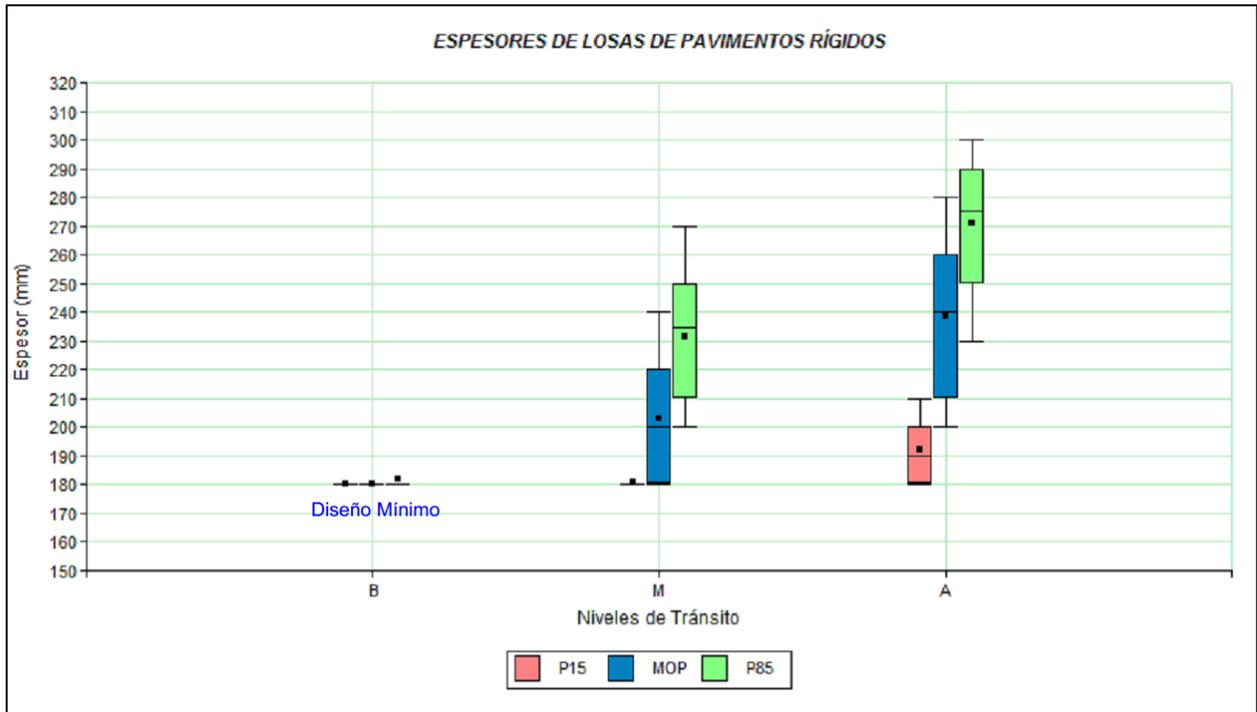


Figura 6. Comparación Espesores de Losa

Como se puede observar en la Figura 6 se comparan espesores de losa para diferentes niveles de tránsito, y para diferentes FC, ya que en esas circunstancias existen diferencias significativas en el diseño de pavimentos rígidos en la región del Bío-Bío. Se aprecia que los espesores de losas más elevados se dan en condiciones de tránsito alto y para niveles de carga por eje también altos (P85) siendo en promedio 280 mm. Mientras que los espesores de losas más bajos se dan para niveles de tránsito bajo independiente de los niveles de carga por eje, y corresponden a 180 mm. aproximadamente. Cabe destacar, que no se muestran comparaciones con niveles de carga por eje P50, ya que en promedio los resultados son muy similares a las soluciones calculadas utilizando FC MOP.

6.5 Impacto en el Diseño de Pavimentos

El impacto que genera utilizar FC actualizados en el diseño de pavimentos en la región del Bío-Bío respecto de utilizar FC recomendados por el MOP, se aprecia en términos de la estructuración de pavimentos, es decir, en términos de número estructural en pavimentos flexibles y de espesores de losa en pavimentos rígidos. Basado en el análisis comparativo anterior; se presenta un resumen de las estructuraciones promedio utilizadas en pavimentos flexibles y rígidos respectivamente. (Ver Tabla 17 y 18).

Tabla 17. Estructuración promedio de pavimentos flexibles

NE total Promedio (mm)					
	B		M		A
MOP	104		105		111
P85	104		118		135
Estructuración Pavimentos Flexibles (mm)					
	Capas Granulares		Capas Asfálticas		
NE	Sub-base	Base	Base Asfáltica	Capa Intermedia	Carpeta Asfáltica
104	150	150	50	50	50
111	150	150	50	55	65
118	150	150	50	60	80
135	150	150	60	75	100

Fuente: Elaboración propia

Para niveles de tránsito bajo no existe diferencia en el diseño ya que en ambos casos se adopta un diseño mínimo. Para niveles de tránsito medio se observa que al utilizar FC actualizados con niveles de carga por eje P85 el NE es superior en 13 mm. al NE calculado utilizando FC propuestos por el MOP. Y para niveles de tránsito alto realizando la misma analogía que en tránsito medio; se observa un NE 24 mm. más alto en promedio. Esta diferencia de números estructurales se aplica en los espesores de capas asfálticas. En términos generales, si se utilizan FC propuestos por el MOP se obtienen diseños sub-dimensionados respecto de los FC actualizados para el diseño de pavimentos flexibles en la región del Bío-Bío.

Tabla 18. Estructuración promedio de pavimentos rígidos

Espesor Promedio (mm)				Pavimentos Rígidos (mm)	
	B	M	A	Esp. Losa	Esp. Sub-base
				180	150
MOP	180	210	240	190	150
				200	150
P15	180	190	200	210	150
				240	150
P85	190	240	280	280	150

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 18, para niveles de tránsito bajo no existe diferencia en el diseño ya que en ambos casos se adopta un diseño mínimo. Para niveles de tránsito medio se observa que al utilizar FC actualizados con niveles de carga por eje P85 el espesor de losa es superior en 30 mm. al espesor calculado utilizando FC propuestos por el MOP y a su vez, este último es 20 mm. superior al espesor calculado utilizando FC actualizados para niveles de carga por eje P15. Y para niveles de tránsito alto se observa que al utilizar FC actualizados con niveles de carga por eje P85 el espesor de losa es superior en 40 mm. al espesor calculado utilizando FC propuestos por el MOP y a su vez, este último es 40 mm. superior al espesor calculado utilizando FC actualizados para niveles de carga por eje P15. En términos generales, si se utilizan FC propuestos por el MOP se obtienen diseños sub-dimensionados respecto de los FC actualizados con altos niveles de carga por eje (P85), para el diseño de pavimentos rígidos en la región del Bío-Bío.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se calculó la estructuración de pavimentos para distintas zonas de la región del Bío-Bío, bajo distintos estados de carga y niveles de tránsito. A continuación se enuncian las conclusiones más importantes de este trabajo:

De la síntesis de antecedentes se puede concluir que el diseño de pavimentos está condicionado por múltiples y variables parámetros, generando incertidumbre en la confiabilidad de los métodos de diseño utilizados en nuestro país, sin embargo se cuenta con amplias bases de datos y factores de seguridad empíricos para absorber dicha incertidumbre y lograr un diseño integral de pavimentos.

De la distribución porcentual de tránsito pesado en la región del Bío-Bío, se puede concluir que existen bases de datos confiables que entregan la distribución del tránsito en la zona. Los resultados indican que la mayor cantidad de vehículos que circulan por la red vial de la región corresponden a vehículos livianos, sin embargo, son los vehículos pesados los que influyen en el diseño de pavimentos, de los cuales el camión de dos ejes (C2E) y los vehículos pesados de locomoción colectiva (BUSES), tienen la mayor participación en el tránsito pesado de la red vial de la región del Bío-Bío.

Para el cálculo de espesores fue necesario construir una matriz de diseño que incluyera la variabilidad de carga, la variabilidad de tránsito y los distintos parámetros y condiciones de diseño. Para ello se definieron 3 estratigrafías de carga: liviana, media y pesada, para cada condición de diseño, y tres niveles de tránsito: bajo, medio y alto. Lo anterior, dio como resultado una matriz de diseño, la cual arrojó 72 casos de diseño de pavimentos flexibles y 108 casos de diseño de pavimentos rígidos, para diferentes zonas geográficas definidas.

En base a esta matriz de diseño se calcularon las soluciones de pavimentos flexibles y rígidos considerando las disposiciones del Manual de Carreteras, además se realizó un análisis comparativo y estadístico entre los resultados obtenidos utilizando FC actualizados para distintos niveles de carga y los resultados obtenidos utilizando FC recomendados por el Manual de Carreteras, concluyendo lo siguiente:

- No existen diferencias significativas en las soluciones promedio calculadas para distintas zonas geográficas, como tampoco las hay para diferentes condiciones de diseño como el sentido por pista en el caso de pavimentos flexibles, o la longitud de las losas en el caso de pavimentos rígidos.

- Sí existen diferencias significativas en las soluciones promedio calculadas, para diferentes niveles de tránsito y para distintos FC utilizados, cumpliéndose la premisa de que el tránsito es el factor individual más influyente en el cálculo de soluciones de diseño de pavimentos.

Respecto del diseño de pavimentos flexibles se enuncian las siguientes conclusiones:

- No existen diferencias significativas entre las soluciones de NE calculadas en base a FC para niveles de carga liviana (P15) y niveles de carga media (P50) respecto de las soluciones en base a FC propuestos por el manual de carreteras del MOP. Sí las hay considerando las soluciones en base a FC para niveles de carga pesada (P85) respecto de las soluciones en base a FC (MOP).
- Al realizar la comparación global considerando diferencias significativas que arrojó el análisis estadístico, se aprecia que las soluciones más altas de NE se dan para las condiciones de tránsito alto, así como también para los niveles de carga por eje pesados (P85).
- Para niveles de tránsito bajo el NE tiende al mínimo, independiente de las demás condiciones de diseño. El NEt mínimo es de 104 mm.
- Para niveles de tránsito medio, al utilizar FC para niveles de carga pesada (P85) se obtiene un NE de 118 mm. que es aproximadamente 12,4% más alto que el NE de 105 mm. utilizando FC propuestos por el manual de carreteras del MOP.
- Para niveles de tránsito alto, al utilizar FC para niveles de carga pesada (P85) se obtiene un NE de 135 mm. que es aproximadamente 21,6% más alto que el NE de 111 mm. utilizando FC propuestos por el Manual de Carreteras del MOP.

Respecto del diseño de pavimentos rígidos se enuncian las siguientes conclusiones:

- No existen diferencias significativas entre las soluciones de espesores de losa calculados en base a FC para niveles de carga media (P50) respecto de las soluciones en base a FC propuestos por el Manual de Carreteras del MOP. Sí las hay considerando las soluciones en base a FC para niveles de carga pesada (P85) respecto de las soluciones en base a FC (MOP).
- Al realizar la comparación global considerando diferencias significativas que arrojó el análisis estadístico, se aprecia que los diseños de mayor espesor de losa se da para las condiciones de tránsito alto, así como también para los niveles de carga por eje altos (P85).

- Para niveles de tránsito bajo el espesor de losa tiende al valor mínimo recomendado, independiente de las demás condiciones. El espesor mínimo recomendado es de 180 mm.
- Para niveles de tránsito medio, al utilizar FC para niveles de carga pesada (P85) se obtiene un espesor de losa de 240 mm. que es aproximadamente 14,3% más alto que el espesor de losa de 210 mm. utilizando FC del MOP, y éste a su vez es aproximadamente un 11% más alto que el espesor de losa de 190 mm. utilizando FC para niveles de carga liviana (P15).
- Para niveles de tránsito alto, al utilizar FC para niveles de carga pesada (P85) se obtiene un espesor de losa de 280 mm. que es aproximadamente 16,7% más alto que el espesor de losa de 240 mm. utilizando FC del MOP, y éste a su vez es un 20% más alto que el espesor de losa de 200 utilizando FC para niveles de carga liviana (P15).

Finalmente el análisis comparativo permite establecer las siguientes recomendaciones:

- En términos generales utilizar FC propuestos por el Manual de Carreteras entrega un diseño sub-dimensionado respecto de los diseños que entrega utilizar FC actualizados para altos niveles de carga (P85), por lo tanto se recomienda utilizar FC actualizados para el diseño de pavimentos en la región del Bío-Bío.
- La recomendación anterior se establece debido a que si se sub-dimensiona la estructura de pavimento, podrían generarse deterioros prematuros en la estructura ocasionando gastos que pueden ser evitados mejorando la estructuración del pavimento en cuestión.

Para trabajos futuros siguiendo la misma línea de investigación se recomienda lo siguiente:

- Ampliar la base de datos del PNCV con más estaciones de control, o con información de plazas de peaje y otros instrumentos de medición, con el fin de obtener una distribución de tránsito más precisa y representativa de la región.
- Evaluar las eventuales diferencias que podrían haber en el diseño si se evaluaran zonas climáticas más extremas o vías en que el tránsito pesado tenga una participación mayor al promedio.
- Evaluar económicamente los costos de inversión y costos de mantenimiento, respecto de la utilización de FC actualizados en el diseño de pavimentos en la región.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MOP (2014a) Manual de Carreteras Volumen N°3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile
- MOP (2014b) Manual de Carreteras Volumen N°5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas.
- Pastrana, F. (2013) Propuesta de Factor Camión para el Diseño de Pavimentos Rígidos en la Región del Bío-Bío. Memoria de título Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Torres, H. (2014) Propuesta de Factor Camión para el Diseño de Pavimentos Flexibles en la Región del Bío-Bío. Memoria de título Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- MINVU (2008). Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación. Publicación técnica n°332. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- MINVU (2007). Guía de Diseño de Pavimentación. Estudio: “Investigación de bases y sub-bases de pavimentación. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos.
- MOP Departamento de Estadísticas y Censos de Tránsito. Dirección de vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile.
- Aburto, H (2012). Evaluación del impacto estructural del transporte de alto tonelaje en pavimentos rígidos. Memoria de título Ingeniero Civil, Universidad del Bío Bío, Concepción. Chile
- Garnica, P (2010). Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos. Quinta conferencia magistral “Alfonso Rico Rodríguez”.
- Riffo, K. (2013). Análisis de Modelos de Desempeño de MEPDG para el diseño de Pavimentos Rígidos en la Región del Bío-Bío. Memoria de título Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Valdebenito, C. (2011). “Caracterización del flujo vehicular de la red vial básica en la región del Bío-Bío”. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío, Concepción.

ANEXOS

ANEXO A

Síntesis de Antecedentes

Tabla A1. FC propuestos por manual de carreteras

Pistas	Camión Simple		Camión Múltiple		Buses	
	pf = 2,0	pf = 2,5	pf = 2,0	pf = 2,5	pf = 2,0	pf = 2,5
Pavimentos Rígidos						
12	0,47	0,47	3,39	3,30	1,50	1,48
34	0,23	0,22	2,57	2,49	1,34	1,32
Pavimentos Flexibles						
12	0,57	0,56	2,77	2,61	1,61	1,54
34	0,30	0,30	2,30	2,16	1,38	1,33

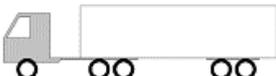
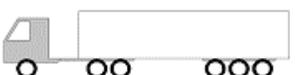
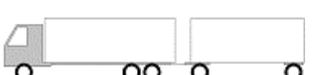
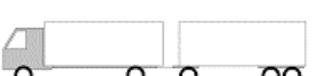
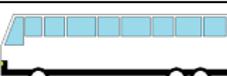
Fuente: MCV3, MOP (2014)

12: Pista o pistas con tránsito alejándose de Santiago.

34: Pista o pistas con tránsito acercándose a Santiago.

pf: Serviciabilidad final

Tabla A2. Vehículos pesados predominantes en la región del Bío-Bío

Tipo de Vehículo	Categoría	Configuración	Descripción	%
C2E (Camión Simple)	1		Camión de 2 ejes	100%
C+2E (Camión Múltiple)	2		Camión de 3 ejes	66%
	7		Tracto camión + Semirremolque	
	8		Tracto camión + Semirremolque	
	10		Camión de 3 ejes + Semirremolque	
	13		Camión de 2 ejes + Semirremolque	
BUS	73		Bus de 2 ejes	72%
	74		Bus de 3 ejes	

Fuente: Pastrana (2014)

Tabla A3: FC actualizados para pavimentos rígidos.

Modelo de "Vesic y Saxena"										
		L1			L2			L3		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
K1	B	0,09874	0,69816	3,07215	0,09222	0,67274	3,03363	0,08867	0,66048	3,08996
	M	0,08839	0,64957	2,96873	0,08083	0,62005	2,90617	0,07706	0,60551	2,88115
	A	0,08170	0,62054	2,89270	0,07416	0,58720	2,82334	0,06998	0,57011	2,79149
K2	B	1,03422	1,58596	2,29964	0,98270	1,64498	2,78140	0,95036	1,62690	2,82860
	M	0,87945	1,38512	2,06152	0,81472	1,43194	2,57792	0,78681	1,44021	2,75160
	A	0,77524	1,24756	1,89966	0,71020	1,29857	2,45492	0,68183	1,33166	2,76424
K7	B	0,59543	0,97392	1,80381	0,56449	0,98871	1,97647	0,54508	0,97273	1,98227
	M	0,50750	0,85142	1,61110	0,46917	0,85707	1,78283	0,45199	0,85295	1,83534
	A	0,44850	0,76757	1,44761	0,41026	0,77514	1,66254	0,39369	0,78158	1,76833
K8	B	0,77963	1,32301	2,08828	0,77590	1,56649	2,76215	0,76423	1,68670	3,15485
	M	0,66543	1,16235	1,87327	0,65390	1,40180	2,56298	0,65128	1,57834	3,11164
	A	0,58920	1,05624	1,73599	0,57941	1,31177	2,49784	0,58438	1,57190	3,27945
K10	B	1,57152	3,61684	7,94407	1,53557	3,80322	8,71479	1,49872	3,80119	8,83821
	M	1,37615	3,37661	7,75996	1,32585	3,55988	8,60099	1,29975	3,61247	8,89551
	A	1,24546	3,21275	7,63063	1,19648	3,40934	8,53571	1,17559	3,51802	9,03366
K13	B	0,91226	3,01714	8,03391	0,85245	3,07039	8,64236	0,82286	3,05248	8,73971
	M	0,78977	2,83553	7,87242	0,71802	2,87706	8,53134	0,68830	2,88264	8,76317
	A	0,70756	2,71077	7,75622	0,63470	2,75676	8,46506	0,60110	2,78494	8,85640
K73	B	2,57328	3,84221	5,87927	2,45352	3,73893	5,81831	2,39819	3,69204	5,79095
	M	2,32113	3,60520	5,68391	2,17618	3,46593	5,57831	2,12079	3,41449	5,54290
	A	2,14974	3,43765	5,53727	2,00086	3,28877	5,41774	1,93679	3,22583	5,37028
K74	B	1,78583	2,15206	2,87757	1,87393	2,62511	4,16660	1,82361	2,61449	4,18502
	M	1,51342	1,89568	2,60139	1,55051	2,35527	3,86839	1,52651	2,48575	4,22610
	A	1,33084	1,72576	2,42463	1,34826	2,18817	3,68189	1,33290	2,42734	4,30540
Modelo de "Majid Zadeh & Ilives"										
		L1			L2			L3		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
K1	B	0,08030	0,64714	3,17458	0,07455	0,62176	3,13352	0,07144	0,60958	3,19500
	M	0,07113	0,59874	3,06380	0,06454	0,56959	2,99773	0,06128	0,55529	2,97149
	A	0,06525	0,57007	2,98307	0,05873	0,53741	2,91062	0,05515	0,52077	2,97764
K2	B	1,03243	1,61773	2,37602	0,97126	1,65760	2,86340	0,93604	1,63453	2,92204
	M	0,86729	1,39773	2,11054	0,79271	1,42306	2,63268	0,76179	1,42601	2,81810
	A	0,75718	1,24798	1,93044	0,68289	1,27765	2,49475	0,65111	1,30499	2,82987
K7	B	0,57092	0,95960	1,84251	0,53543	0,95934	1,98700	0,51509	0,94024	1,98686
	M	0,48075	0,82989	1,63006	0,43800	0,81899	1,76874	0,41966	0,81030	1,81352
	A	0,42082	0,74163	1,48322	0,37843	0,73231	1,63390	0,35942	0,73256	1,73046
K8	B	0,75775	1,31062	2,11241	0,74363	1,53552	2,79335	0,72814	1,64462	3,18781
	M	0,63878	1,13931	1,87866	0,61688	1,36050	2,57919	0,60988	1,52624	3,13925
	A	0,56002	1,02623	1,72832	0,54015	1,26392	2,50371	0,53976	1,51410	3,31812
K10	B	1,54974	3,65415	8,43670	1,49831	3,82226	9,24862	1,45712	3,81524	9,38353
	M	1,33846	3,38746	8,23236	1,27202	3,55001	9,11987	1,24133	3,59965	9,44596
	A	1,19835	3,20661	8,08900	1,13390	3,38330	9,04806	1,10773	3,49150	9,60460
K13	B	0,88291	3,01222	8,55662	0,81948	3,04745	9,18721	0,78854	3,02492	9,29205
	M	0,75424	2,81394	8,37923	0,67913	2,83533	9,06275	0,64843	2,83583	9,31543
	A	0,66871	2,67863	8,25165	0,59311	2,70461	8,99022	0,55870	2,72715	9,42072
K73	B	2,62515	4,02892	6,37194	2,49311	3,91359	6,30483	2,43231	3,86144	6,27492
	M	2,34799	3,76484	6,15353	2,19016	3,61113	6,03790	2,13016	3,55472	5,99990
	A	2,16151	3,57980	5,99078	2,00095	3,41696	5,86127	1,93230	3,34868	5,81095
K74	B	1,83025	2,20682	2,98003	1,89724	2,68689	4,39457	1,84096	2,67321	4,41587
	M	1,53258	1,92332	2,67160	1,54698	2,38771	4,05989	1,51747	2,52637	4,46972
	A	1,33492	1,73614	2,47437	1,33054	2,20438	3,85273	1,30923	2,4617	4,57036

Fuente: Pastrana (2014)

Tabla A4: FC Actualizados para pavimentos flexibles.

Grietas de Fatiga										
Vehículos	Pistas	B			M			A		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
K1	12	0,27	1,05	3,14	0,23	0,97	3,21	0,21	0,95	3,28
	34	0,26	0,84	2,80	0,23	0,78	2,82	0,20	0,74	2,85
K2	12	1,00	2,30	5,16	0,93	2,26	5,35	0,88	2,23	5,54
	34	1,40	2,70	6,02	1,35	2,68	6,28	1,32	2,68	6,51
K7	12	0,78	2,30	6,53	0,70	2,17	6,60	0,66	2,08	6,64
	34	1,08	1,90	5,01	1,01	1,82	4,98	0,97	1,77	4,99
K8	12	2,02	5,83	10,15	1,88	3,94	10,44	1,79	3,93	10,72
	34	1,88	7,01	11,84	1,76	3,43	12,28	1,69	3,41	12,68
K10	12	2,03	6,21	11,44	1,90	6,24	11,87	1,81	6,26	12,31
	34	1,82	5,73	11,18	2,03	5,73	11,65	1,96	5,75	12,07
K13	12	3,58	7,20	11,24	3,46	7,30	11,74	3,38	7,38	12,16
	34	1,24	5,99	11,04	1,15	6,01	11,51	1,11	6,00	11,90
K73	12	1,63	3,27	4,41	1,58	3,35	4,62	1,54	3,41	4,79
	34	1,98	3,52	4,57	1,96	3,62	4,79	1,95	3,70	4,98
K74	12	1,92	3,72	4,99	1,88	3,84	5,27	1,86	3,96	5,53
	34	2,42	4,80	6,26	2,39	5,05	6,72	2,38	5,29	7,15
Ahuellamiento										
Vehículos	Pistas	B			M			A		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
K1	12	0,27	0,79	3,43	0,08	0,66	3,63	0,08	0,66	3,64
	34	0,08	0,45	2,89	0,08	0,45	2,90	0,08	0,44	2,90
K2	12	0,80	1,93	5,89	0,51	1,77	6,27	0,51	1,76	6,26
	34	1,00	2,44	7,84	0,99	2,45	7,87	0,99	2,45	7,89
K7	12	0,90	1,81	6,45	0,34	1,37	6,66	0,34	1,37	6,66
	34	0,64	1,34	4,60	0,64	1,34	4,61	0,64	1,34	4,61
K8	12	1,65	5,18	11,33	1,04	2,95	12,14	2,71	2,95	12,16
	34	1,10	6,71	15,19	1,09	2,81	15,24	1,09	2,85	15,28
K10	12	1,57	5,93	14,38	1,12	6,06	15,69	1,12	6,05	15,73
	34	1,44	5,49	15,07	1,44	5,50	15,15	1,44	5,50	15,20
K13	12	2,95	7,34	14,10	2,63	7,67	15,44	2,62	7,68	15,49
	34	0,81	5,73	14,54	0,81	5,80	14,79	0,81	5,81	14,84
K73	12	1,31	3,59	5,70	1,23	3,80	6,20	1,22	3,81	6,22
	34	1,75	4,18	6,35	1,75	4,19	6,39	1,75	4,20	6,42
K74	12	1,62	3,80	5,87	1,42	3,84	6,15	1,40	3,78	6,06
	34	2,09	5,81	8,89	2,09	5,76	8,82	2,08	5,66	8,60

Fuente: Torres (2014)

Tabla A5. Tasas de crecimiento regional según tipo de vehículo

Tipo de Vehículo	V. Livianos	C2E	C+2E	Remolques y Semirremolques	Buses
Tasa de Crecimiento (i)	3,2	1,7	6,1	5,3	1,1

Fuente: Valdebenito (2011)

Tabla A6. Nivel de confianza y valores del So

Asfalto							
EE solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Zr	So en función del coeficiente de variación de los suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 5	60	-0,253	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
5 - 15	70	-0,524	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
15 - 30	75	-0,674	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
30 - 50	80	-0,841	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49
50 - 70	85	-1,037	0,42	0,43	0,44	0,47	0,48
70 - 90	90	-1,282	0,40	0,41	0,42	0,45	0,46
Hormigón							
EE solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Zr	So en función del coeficiente de variación de los suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 15	60	-0,253	0,35	0,36	0,37	0,39	0,40
15 - 30	70	-0,524	0,35	0,36	0,37	0,39	0,40
30 - 50	75	-0,674	0,34	0,35	0,36	0,38	0,39
50 - 70	80	-0,841	0,32	0,33	0,34	0,37	0,38
70 - 90	85	-1,037	0,30	0,31	0,32	0,35	0,36

Fuente: MCV3, Mop (2014).

Tabla A7. Coeficientes de drenaje de bases y subbases

COEFICIENTES DE DRENAJE (m)						
REGIÓN	PRECIP.	BASE PERMEABLE	BASE: FINOS HASTA 10%		BASE: MAS 10% FINOS	
			SUBRAS. GRAN.	SUBRAS. FINOS	SUBRAS. GRAN	SUBRAS. FINOS
IV	<= 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,05
	> 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,05 - 0,80
V a VI	<= 150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,00
	> 150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
VII a IX	<= 350 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,00	0,80
	> 350 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,25 - 1,15	1,00 - 0,80	0,80
X	<= 1500 mm	1,40 - 1,35	1,15 - 1,00	1,15	1,00 - 0,80	0,80 - 0,60
	> 1500 mm	1,40 - 1,30	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	0,80	0,60
XI a XII	<= 500 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
	> 500 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,15	0,80	0,80

Base permeable: menos de 3% de finos y/o coeficiente de permeabilidad > 0,01 cm/s
 Subras Gran.: subrasante granular, máximo 35% pasa tamiz de 0,08
 Subras Finos: subrasante de suelo fino.

Fuente: MCV3, Mop (2014).

ANEXO B

Distribución Porcentual de TMDAC

Tabla B1: Síntesis PNCV año 2012.

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
008	01	RUTA 5	<i>Distr. Porct.(%)</i>	1005 32	586 18	537 17	515 16	537 17	3180 25	12819 75
	02	RUTA 5	<i>Distr. Porct.(%)</i>	935 29	603 19	565 17	543 17	591 18	3237 27	11822 73
	03	RUTA 172	<i>Distr. Porct.(%)</i>	603 42	79 6	31 2	27 2	696 48	1436 11	12596 89
	04	Q-45	<i>Distr. Porct.(%)</i>	390 34	143 12	96 8	136 12	383 33	1148 14	8293 86
			Distr. Porct. Prom.(%)	34	14	11	12	29	19	81
			Desv. Stdr.	5,65	6,20	7,33	6,89	14,83	7,91	7,91
ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
030	01	N-66-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	601 61	92 9	81 8	93 9	123 12	990 14	6858 86
	02	N-66-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	263 58	45 10	53 12	24 5	71 16	456 14	3295 86
	03	N-60-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	378 58	57 9	44 7	77 12	94 14	650 16	3957 84
			Distr. Porct. Prom.(%)	59	9	9	9	14	15	85
			Desv. Stdr.	1,63	0,55	2,50	3,33	1,60	1,35	1,35
ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
031	01	N-49	<i>Distr. Porct.(%)</i>	465 46	99 10	22 2	25 2	400 40	1011 13	7892 87
	02	N-49	<i>Distr. Porct.(%)</i>	367 43	82 10	36 4	42 5	321 38	848 17	4968 83
	03	N-45	<i>Distr. Porct.(%)</i>	302 50	114 19	41 7	40 7	107 18	604 13	4533 87
			Distr. Porct. Prom.(%)	46	13	4	5	32	14	86
			Desv. Stdr.	3,38	5,28	2,31	2,09	12,15	2,32	2,32

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
086	01	RUTA 180		874	681	942	1003	1044	4544	13658
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	19	15	21	22	23	33	67
	02	RUTA 180		649	557	869	883	746	3704	9964
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	18	15	23	24	20	37	63
	03	Q-184		349	194	196	237	390	1366	5093
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	26	14	14	17	29	27	73
			Distr. Porct. Prom.(%)	21	15	20	21	24	32	68
			Desv. Stdr.	4,23	0,47	4,68	3,36	4,28	5,23	5,23

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
088	01	Q-35		505	255	159	219	163	1301	9545
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	39	20	12	17	13	14	86
	02	Q-35		283	132	83	96	89	683	5598
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	41	19	12	14	13	12	88
	03	Q-15		260	171	96	156	93	776	4522
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	34	22	12	20	12	17	83
			Distr. Porct. Prom.(%)	38	20	12	17	13	14	86
			Desv. Stdr.	4,04	1,49	0,11	3,03	0,52	2,55	2,55

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
120	01	RUTA 180		493	817	812	865	452	3439	8089
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	14	24	24	25	13	43	57
	02	RUTA 180		409	758	734	712	176	2789	6185
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	15	27	26	26	6	45	55
	03	R-164		219	478	621	537	297	2152	3761
			<i>Distr. Porct.(%)</i>	10	22	29	25	14	57	43
			Distr. Porct. Prom.(%)	13	24	26	25	11	48	52
			Desv. Stdr.	2,50	2,54	2,62	0,29	4,15	7,85	7,85

	C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
dist porc total 2012 promedio (%)	35	16	14	15	20	24	76
Desv. Stdr.	16,69	5,49	7,87	7,75	9,01	13,79	13,79

Tabla B2: Síntesis PNCV año 2010.

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
008	01	RUTA 5	<i>Distr. Porct.(%)</i>	1062 33	513 16	465 14	624 19	593 18	3257 25	12804 75
	02	RUTA 5	<i>Distr. Porct.(%)</i>	1012 29	555 16	505 15	771 22	623 18	3466 28	12442 72
	03	RUTA 172	<i>Distr. Porct.(%)</i>	539 44	69 6	27 2	34 3	568 46	1237 11	10928 89
	04	Q-45	<i>Distr. Porct.(%)</i>	335 28	132 11	91 8	277 23	344 29	1179 16	7453 84
			Distr. Porct. Prom.(%)	33	12	10	17	28	20	80
			Desv. Stdr.	6,99	4,90	5,92	9,62	13,15	7,83	7,83
ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
030	01	N-66-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	283 54	58 11	15 3	36 7	134 25	526 16	3393 84
	02	N-66-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	138 53	29 11	11 4	15 6	69 26	262 14	1914 86
	03	N-60-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	160 55	32 11	6 2	25 9	68 23	291 18	1604 82
			Distr. Porct. Prom.(%)	54	11	3	7	25	16	84
			Desv. Stdr.	1,16	0,04	1,08	1,44	1,53	2,24	2,24
ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
031	01	N-49	<i>Distr. Porct.(%)</i>	395 40	116 12	27 3	54 5	403 41	995 15	6766 85
	02	N-49	<i>Distr. Porct.(%)</i>	294 33	132 15	52 6	96 11	311 35	885 20	4384 80
	03	N-45	<i>Distr. Porct.(%)</i>	250 39	138 22	50 8	91 14	109 17	638 16	3919 84
			Distr. Porct. Prom.(%)	37	16	5	10	31	17	83
			Desv. Stdr.	3,60	5,08	2,59	4,46	12,27	2,82	2,82

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
086	01	RUTA 180		781 <i>Distr. Porct.(%)</i> 19	573 14	829 21	794 20	1032 26	4009 37	10845 63
	02	RUTA 180		623 <i>Distr. Porct.(%)</i> 19	528 16	803 24	724 22	689 20	3367 42	8055 58
	03	Q-184		269 <i>Distr. Porct.(%)</i> 27	92 9	107 11	136 13	405 40	1009 28	3633 72
			Distr. Porct. Prom.(%)	22	13	18	18	29	36	64
			Desv. Stdr.	4,45	3,46	6,92	4,23	10,18	7,13	7,13

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
088	01	Q-35		449 <i>Distr. Porct.(%)</i> 36	224 18	149 12	222 18	220 17	1264 15	8183 85
	02	Q-35		270 <i>Distr. Porct.(%)</i> 36	137 18	98 13	101 14	135 18	741 15	5066 85
	03	Q-15		248 <i>Distr. Porct.(%)</i> 36	123 18	75 11	148 21	104 15	698 17	4032 83
			Distr. Porct. Prom.(%)	36	18	12	17	17	16	84
			Desv. Stdr.	0,53	0,47	1,25	3,79	1,73	1,38	1,38

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
120	01	RUTA 180		387 <i>Distr. Porct.(%)</i> 12	514 16	757 23	1210 37	412 13	3280 44	7428 56
	02	RUTA 180		323 <i>Distr. Porct.(%)</i> 11	501 17	760 26	1016 34	361 12	2961 48	6120 52
	03	R-164		172 <i>Distr. Porct.(%)</i> 9	288 15	541 29	779 41	109 6	1889 58	3236 42
			Distr. Porct. Prom.(%)	11	16	26	37	10	50	50
			Desv. Stdr.	1,37	0,87	2,78	3,50	3,82	7,30	7,30

	C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
dist porc total 2010 promedio (%)	32	14	12	18	23	26	74
Desv. Stdr.	14,76	2,69	8,47	10,60	8,07	14,17	14,17

Tabla B3: Síntesis PNCV año 2008.

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
008	01	RUTA 5	<i>Distr. Porct.(%)</i>	963 30	395 12	494 15	729 23	648 20	3229 25	12838 75
	02	RUTA 5	<i>Distr. Porct.(%)</i>	844 25	412 12	504 15	779 23	884 26	3423 26	13175 74
	03	RUTA 172	<i>Distr. Porct.(%)</i>	481 34	92 6	29 2	39 3	791 55	1432 11	12497 89
	04	Q-45	<i>Distr. Porct.(%)</i>	352 25	161 11	127 9	419 29	362 25	1421 18	7872 82
			Distr. Porct. Prom.(%)	28	11	10	19	32	20	80
			Desv. Stdr.	4,32	2,75	6,19	11,56	15,94	6,81	6,81
ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
030	01	N-66-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	260 52	41 8	12 2	30 6	159 32	502 18	2770 82
	02	N-66-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	139 53	17 7	7 3	13 5	84 32	260 16	1603 84
	03	N-60-O	<i>Distr. Porct.(%)</i>	128 50	25 10	6 2	19 7	76 30	254 21	1222 79
			Distr. Porct. Prom.(%)	52	8	2	6	31	18	82
			Desv. Stdr.	1,54	1,65	0,18	1,25	1,24	2,29	2,29
ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIRREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
031	01	N-49	<i>Distr. Porct.(%)</i>	397 39	103 10	44 4	40 4	437 43	1021 17	6078 83
	02	N-49	<i>Distr. Porct.(%)</i>	293 34	94 11	63 7	78 9	326 38	854 23	3699 77
	03	N-45	<i>Distr. Porct.(%)</i>	255 44	73 13	56 10	72 12	127 22	583 17	3419 83
			Distr. Porct. Prom.(%)	39	11	7	8	34	19	81
			Desv. Stdr.	4,72	1,23	2,66	4,26	11,04	3,56	3,56

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
086	01	RUTA 180		715 <i>Distr. Porct.(%)</i> 20	467 13	715 20	821 23	809 23	3527 39	9130 61
	02	RUTA 180		540 <i>Distr. Porct.(%)</i> 18	433 15	701 24	731 25	577 19	2982 43	6972 57
	03	Q-184		237 <i>Distr. Porct.(%)</i> 28	89 10	107 13	143 17	272 32	848 30	2804 70
			Distr. Porct. Prom.(%)	22	13	19	22	25	37	63
			Desv. Stdr.	5,17	2,06	5,59	4,11	6,56	6,38	6,38

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
088	01	Q-35		323 <i>Distr. Porct.(%)</i> 46	60 9	48 7	106 15	158 23	695 12	5927 88
	02	Q-35		186 <i>Distr. Porct.(%)</i> 50	31 8	29 8	43 11	86 23	375 10	3844 90
	03	Q-15		165 <i>Distr. Porct.(%)</i> 44	34 9	21 6	69 19	83 22	372 15	2454 85
			Distr. Porct. Prom.(%)	47	9	7	15	23	12	88
			Desv. Stdr.	2,64	0,44	1,05	3,54	0,32	2,73	2,73

ESTACIÓN DE CONTROL	RAMA O ACCESO	ROL		C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
120	01	RUTA 180		400 <i>Distr. Porct.(%)</i> 13	501 17	586 19	1071 36	455 15	3013 45	6668 55
	02	RUTA 180		338 <i>Distr. Porct.(%)</i> 12	472 17	620 23	934 34	376 14	2740 49	5543 51
	03	R-164		191 <i>Distr. Porct.(%)</i> 13	221 15	353 24	593 41	103 7	1461 53	2743 47
			Distr. Porct. Prom.(%)	13	16	22	37	12	49	51
			Desv. Stdr.	0,49	1,08	2,40	3,41	4,31	4,04	4,04

	C2E	C+2E	SEMIREMOLQUE	REMOLQUE	LOCOMOCIÓN COLECTIVA	TMDAC	TMDA
dist porc total 2008 promedio (%)	33	11	11	18	26	26	74,0
Desv. Stdr.	15,02	2,99	7,61	11,00	8,22	14,14	14,14

Tabla B4: Síntesis EOD año 2007.

AÑO 2007						
Categoría / Estación	SEMIRREMOLQUE		REMOQLUE		LOCOMOCIÓN COLECTIVA	
	7	8	10	13	73	74
Quinta N-S	38	100	41	13	154	63
Quinta S-N	76	106	58	54	134	45
Chmv. B-C	41	61	36	50	42	4
Chmv. C-B	42	61	27	32	52	3
Chillán N-S	32	49	53	21	42	28
Chillán S-N	85	93	56	14	50	38
Quepe N-S	77	191	31	32	68	58
Quepe S-N	182	97	50	16	74	62
total	573	758	352	232	616	301
total	1331		584		917	
Distr. Porct.(%)	43	57	60	40	67	33

Tabla B5: Síntesis EOD año 2009.

AÑO 2009						
Categoría / Estación	SEMIRREMOLQUE		REMOQLUE		LOCOMOCIÓN COLECTIVA	
	7	8	10	13	73	74
Quinta N-S	54	52	20	34	75	41
Quinta S-N	68	58	28	30	86	38
Chmv. B-C	50	64	45	48	56	4
Chmv. C-B	63	53	26	31	51	5
Chillán N-S	26	50	18	10	21	11
Chillán S-N	12	30	16	8	27	14
Quepe N-S	179	119	72	148	145	47
Quepe S-N	138	75	66	29	95	33
total	590	501	291	338	556	193
total	1091		629		749	
Distr. Porct.(%)	54	46	46	54	74	26

Tabla B6: Síntesis EOD año 2011.

AÑO 2011						
	SEMIRREMOLQUE		REMOQLUE		LOCOMOCIÓN COLECTIVA	
Categoría / Estación	7	8	10	13	73	74
Quinta N-S	87	53	28	30	83	57
Quinta S-N	88	59	46	14	46	35
Chmv. B-C	54	22	26	39	45	8
Chmv. C-B	91	77	22	15	39	5
Chillán N-S	46	32	20	6	17	19
Chillán S-N	51	54	14	4	33	8
Quepe N-S	148	84	36	41	109	28
Quepe S-N	101	93	74	25	99	30
total	666	474	266	174	471	190
total	1140		440		661	
Distr. Porct.(%)	58	42	60	40	71	29

Tabla B7: Síntesis EOD promedio.

PROMEDIO 2007-2009-2011						
Categoría	7	8	10	13	73	74
Distr. Porct.(%)	52	48	56	44	71	29

ANEXO C

Matriz de Diseño

Tabla C1: Matriz de diseño para pavimentos flexibles

ZONA GEOGRÁFICA (CO o CH)										
		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	12	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	34	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18
P50	12	N19	N20	N21	N22	N23	N24	N25	N26	N27
	34	N28	N29	N30	N31	N32	N33	N34	N35	N36
P85	12	N37	N38	N39	N40	N41	N42	N43	N44	N45
	34	N46	N47	N48	N49	N50	N51	N52	N53	N54
MOP	12	N55	N56	N57	N58	N59	N60	N61	N62	N63
	34	N64	N65	N66	N67	N68	N69	N70	N71	N72

Tabla C2: Matriz de diseño para pavimentos rígidos

ZONA GEOGRÁFICA (CO o CH)										
		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	L1	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
	L2	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
	L3	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27
P50	L1	D28	D29	D30	D31	D32	D33	D34	D35	D36
	L2	D37	D38	D39	D40	D41	D42	D43	D44	D45
	L3	D46	D47	D48	D49	D50	D51	D52	D53	D54
P85	L1	D55	D56	D57	D58	D59	D60	D61	D62	D63
	L2	D64	D65	D66	D67	D68	D69	D70	D71	D72
	L3	D73	D74	D75	D76	D77	D78	D79	D80	D81
MOP	L1	D82	D83	D84	D85	D86	D87	D88	D89	D90
	L2	D91	D92	D93	D94	D95	D96	D97	D98	D99
	L3	D100	D101	D102	D103	D104	D105	D106	D107	D108

ANEXO D

Análisis de Capacidad de la Vía

Tabla D1: Análisis de capacidad de la vía para tránsito alto

TRÁNSITO ALTO												
año	vl	k1	k2	k7	k8	k10	k13	k73	k74	TMDA	TMDAc	VH
2014	4353	493	203	87	87	131	116	232	102	5804	1451	908
2016	4636	525	216	93	93	139	124	247	108	6181	1545	967
2017	4784	534	230	98	98	146	130	250	109	6380	1595	999
2018	4938	543	244	103	103	154	137	253	111	6585	1647	1032
2019	5096	553	258	108	108	162	144	256	112	6797	1702	1067
2020	5259	562	274	114	114	171	152	258	113	7017	1759	1103
2021	5427	572	291	120	120	180	160	261	114	7245	1818	1140
2022	5600	581	309	126	126	190	169	264	116	7481	1880	1179
2023	5780	591	327	133	133	200	177	267	117	7725	1946	1219
2024	5965	601	347	140	140	210	187	270	118	7979	2014	1261
2025	6156	611	369	148	148	221	197	273	119	8241	2086	1304
2026	6353	622	391	155	155	233	207	276	121	8513	2161	1349
2027	6556	632	415	164	164	245	218	279	122	8795	2239	1396
2028	6766	643	440	172	172	258	230	282	123	9087	2322	1445
2029	6982	654	467	181	181	272	242	285	125	9390	2408	1496
2030	7205	665	496	191	191	287	255	288	126	9704	2499	1549
2031	7436	677	526	201	201	302	268	291	127	10030	2594	1605
2032	7674	688	558	212	212	318	282	295	129	10367	2693	1662
2033	7920	700	592	223	223	335	297	298	130	10718	2798	1722
2034	8173	712	628	235	235	352	313	301	132	11081	2908	1784
2035	8435	724	666	247	247	371	330	304	133	11458	3023	1849

Tabla D2: Análisis de capacidad de la vía para tránsito medio

TRÁNSITO MEDIO												
año	vl	k1	k2	k7	k8	k10	k13	k73	k74	TMDA	TMDAc	VH
2014	1974	224	92	39	39	59	53	105	46	2632	658	412
2016	2102	238	98	42	42	63	56	112	49	2803	701	439
2017	2170	242	104	44	44	66	59	113	50	2893	723	453
2018	2239	246	110	47	47	70	62	115	50	2986	747	468
2019	2311	251	117	49	49	74	65	116	51	3082	772	484
2020	2385	255	124	52	52	78	69	117	51	3182	797	500
2021	2461	259	132	54	54	82	73	118	52	3285	824	517
2022	2540	264	140	57	57	86	76	120	52	3392	853	534
2023	2621	268	148	60	60	91	80	121	53	3503	882	553
2024	2705	273	158	64	64	95	85	122	54	3618	913	572
2025	2791	277	167	67	67	100	89	124	54	3737	946	591
2026	2881	282	177	70	70	106	94	125	55	3861	980	612
2027	2973	287	188	74	74	111	99	126	55	3988	1015	633
2028	3068	292	200	78	78	117	104	128	56	4121	1053	655
2029	3166	297	212	82	82	123	110	129	57	4258	1092	679
2030	3268	302	225	87	87	130	116	131	57	4401	1133	703
2031	3372	307	238	91	91	137	122	132	58	4548	1176	728
2032	3480	312	253	96	96	144	128	134	58	4701	1221	754
2033	3591	317	268	101	101	152	135	135	59	4860	1269	781
2034	3706	323	285	107	107	160	142	137	60	5025	1319	809
2035	3825	328	302	112	112	168	150	138	60	5196	1371	839

Tabla D3: Análisis de capacidad de la vía para tránsito bajo

TRÁNSITO BAJO												
año	vl	k1	k2	k7	k8	k10	k13	k73	k74	TMDA	TMDAc	VH
2014	738	84	34	15	15	22	20	39	17	984	246	154
2016	786	89	37	16	16	24	21	42	18	1048	262	164
2017	811	91	39	17	17	25	22	42	19	1082	270	169
2018	837	92	41	17	17	26	23	43	19	1116	279	175
2019	864	94	44	18	18	28	24	43	19	1152	288	181
2020	892	95	46	19	19	29	26	44	19	1190	298	187
2021	920	97	49	20	20	31	27	44	19	1228	308	193
2022	949	99	52	21	21	32	29	45	20	1268	319	200
2023	980	100	56	23	23	34	30	45	20	1310	330	207
2024	1011	102	59	24	24	36	32	46	20	1353	341	214
2025	1044	104	62	25	25	38	33	46	20	1397	354	221
2026	1077	105	66	26	26	40	35	47	20	1443	366	229
2027	1111	107	70	28	28	42	37	47	21	1491	380	237
2028	1147	109	75	29	29	44	39	48	21	1541	394	245
2029	1184	111	79	31	31	46	41	48	21	1592	408	254
2030	1222	113	84	32	32	49	43	49	21	1645	424	263
2031	1261	115	89	34	34	51	45	49	22	1700	440	272
2032	1301	117	95	36	36	54	48	50	22	1758	457	282
2033	1343	119	100	38	38	57	50	50	22	1817	474	292
2034	1386	121	106	40	40	60	53	51	22	1879	493	303
2035	1430	123	113	42	42	63	56	52	23	1943	513	314

ANEXO E
Cálculo de Ejes Equivalentes
Acumulados

Tabla E1. Resumen EEac para pavimentos rígidos utilizando FC actualizados

Combinación	EEac	Combinación	EEac	Combinación	EEac
D1	559.826	D28	1.077.597	D55	2.287.678
D2	2.465.712	D29	4.982.241	D56	11.013.088
D3	4.918.915	D30	10.334.942	D57	23.515.229
D4	918.955	D31	1.778.104	D58	3.770.890
D5	4.043.290	D32	8.215.834	D59	18.147.764
D6	8.059.146	D33	17.033.780	D60	38.740.871
D7	1.350.502	D34	2.626.295	D61	5.561.500
D8	5.935.592	D35	12.126.773	D62	26.755.961
D9	11.820.201	D36	25.128.384	D63	57.103.398
D10	541.424	D37	1.108.981	D64	2.467.033
D11	2.337.474	D38	5.107.912	D65	11.921.798
D12	4.625.632	D39	10.619.106	D66	25.640.624
D13	888.340	D40	1.831.788	D67	4.076.494
D14	3.831.081	D41	8.433.715	D68	19.704.523
D15	7.575.106	D42	17.529.209	D69	42.390.861
D16	1.304.879	D43	2.708.496	D70	6.027.753
D17	5.621.075	D44	12.464.656	D71	29.143.564
D18	11.104.752	D45	25.900.696	D72	62.714.346
D19	527.111	D46	1.103.911	D73	2.505.663
D20	2.276.924	D47	5.148.655	D74	12.274.885
D21	4.490.889	D48	10.845.101	D75	26.958.484
D22	864.726	D49	1.824.080	D76	4.142.184
D23	3.731.347	D50	8.506.039	D77	20.313.074
D24	7.353.998	D51	17.920.057	D78	44.656.074
D25	1.269.992	D52	2.698.099	D79	6.127.679
D26	5.473.970	D53	12.579.216	D80	30.082.081
D27	10.779.878	D54	26.505.306	D81	66.199.006

Tabla E2. Resumen EEac para pavimentos flexibles utilizando FC actualizados

Combinación	EEac	Combinación	EEac	Combinación	EEac
N1	723.213	N19	1.771.698	N37	3.325.605
N2	3.437.138	N20	8.535.405	N38	17.311.746
N3	7.297.092	N21	18.868.745	N39	39.376.251
N4	1.210.003	N22	2.969.943	N40	5.583.533
N5	5.748.846	N23	14.288.658	N41	29.063.974
N6	12.201.080	N24	31.576.104	N42	66.106.859
N7	1.812.382	N25	4.456.531	N43	8.391.140
N8	8.608.156	N26	21.412.326	N44	43.676.201
N9	18.263.841	N27	47.301.941	N45	99.342.851
N10	682.801	N28	1.771.534	N46	3.381.872
N11	3.372.297	N29	8.262.540	N47	17.630.513
N12	7.226.876	N30	18.285.701	N48	40.132.883
N13	1.133.212	N31	2.966.216	N49	5.682.952
N14	5.598.443	N32	13.790.815	N50	29.627.644
N15	11.993.561	N33	30.506.004	N51	67.441.292
N16	1.684.150	N34	4.446.364	N52	8.548.911
N17	8.322.649	N35	20.608.282	N53	44.571.169
N18	17.823.986	N36	45.565.682	N54	101.456.476

Tabla E3. Resumen EEac para pavimentos flexibles utilizando FC del MOP

Combinación	EEac
N55	1.021.646
N56	5.137.467
N57	11.328.973
N58	1.726.532
N59	8.682.071
N60	19.145.418
N61	2.612.751
N62	13.138.527
N63	28.972.647
N64	822.862
N65	4.137.858
N66	9.124.669
N67	1.393.606
N68	7.007.912
N69	15.453.618
N70	2.113.550
N71	10.628.237
N72	23.437.040

ANEXO F

Cálculo de Soluciones

Método de cálculo de pavimentos flexibles

El método de diseño se basa en un enfoque empírico recomendado por el MCV3 que es el AASHTO (1993). El programa PAVIVIAL trabaja resolviendo la siguiente ecuación de diseño para obtener el NE de pavimentos flexibles.

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} \cdot 10^{(-16,40 + Z_r \cdot S_0)} \cdot Mr^{2,32} \cdot \left[\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right]^{1/\beta} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\beta = 0,40 + \left[\frac{97,81}{NE + 25,4} \right]^{5,19} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

EE: ejes equivalentes acumulados durante la vida de diseño

NE: número estructural (mm)

$$NE = a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot h_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot h_3 \cdot m_3$$

a_i, h_i : coeficiente estructural y espesor (mm) de cada una de las capas que componen el pavimento

m_j : coeficiente de drenaje de las capas no tratadas (bases y subbases)

Z_r : coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte

S_0 : desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo

Mr : módulo resiliente del suelo de subrasante (MPa)

p_i : índice de serviciabilidad inicial

p_f : índice de serviciabilidad final

Además del NE_{total} , PAVIVIAL también calcula el $NE_{asfalto}$ (sobre la base), y se trabajó iterando entre diferentes estructuraciones de pavimento para lograr el diseño adecuado para los números estructurales calculados.

Tabla F1. Resultados NE_{total} para pavimentos flexibles en la zona de Concepción

		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	12	104	104	104	104	104	104	104	104	109
	34	104	104	104	104	104	104	104	104	109
P50	12	104	104	110	104	107	118	104	111	124
	34	104	104	109	104	104	118	104	111	124
P85	12	104	109	122	104	116	133	104	124	143
	34	104	108	122	104	116	133	104	124	143
MOP	12	104	104	104	104	104	109	104	104	116
	34	104	104	104	104	104	107	104	104	112

Tabla F2. Resultados NE_{asfalto} para pavimentos flexibles en la zona de Chillán

		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	12	59	59	59	59	59	62	59	59	69
	34	59	59	59	59	59	62	59	59	69
P50	12	59	59	69	59	64	77	59	71	83
	34	59	59	69	59	64	77	59	71	82
P85	12	59	69	80	59	75	90	59	82	100
	34	59	69	81	59	75	92	59	82	100
MOP	12	59	59	62	59	59	69	59	62	75
	34	59	59	59	59	59	67	59	62	71

Tabla F3. Resultados NE_{asfalto} para pavimentos flexibles en la zona de Concepción

		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	12	59	59	59	59	59	59	59	59	64
	34	59	59	59	59	59	59	59	59	64
P50	12	59	59	65	59	62	73	59	66	79
	34	59	59	64	59	59	73	59	66	79
P85	12	59	64	77	59	71	88	59	79	98
	34	59	63	77	59	71	88	59	79	98
MOP	12	59	59	59	59	59	64	59	59	71
	34	59	59	59	59	59	62	59	59	67

Método de cálculo de pavimentos rígidos

El método de diseño se basa en un enfoque mecanicista-empírico recomendado por el MCV3 que es el AASHTO (1998). El programa trabaja resolviendo la siguiente ecuación de diseño para obtener el espesor de losa de pavimentos rígidos.

$$\log EE = \log R + \frac{G}{F} + (5,065 - 0,03295 \cdot p_f^{2,4}) \cdot \left(\log \left(\frac{S_c'}{\sigma_t'} \right) - \log \left(\frac{4,754}{\sigma_t} \right) \right) + Z_r \cdot S_0 \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\log R = 5,85 + 7,35 \cdot \log \left(\left(\frac{D}{25,4} \right) + 1 \right) - 4,62 \cdot \log \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right) + 3,28 \cdot \log(L_2) \quad \text{Ec. (14)}$$

$$F = 1,00 + \frac{3,63 \cdot \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right)^{5,2}}{\left(\left(\frac{D}{25,4} \right) + 1 \right)^{8,46} \cdot L_2^{3,52}} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$G = \log \left(\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right) \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde:

EE: ejes equivalentes acumulados durante la vida de diseño

Z_r: coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte

S₀: desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo

D: espesor de losa (mm).

S_c' : resistencia media a la flexotracción del hormigón a los 28 días, con carga en los tercios, (MPa).

L₁: carga de eje simple, 80 kN.

L₂: código de eje simple = 1

p_i: índice de serviciabilidad inicial

p_f: índice de serviciabilidad final

σ_t' : tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, en MPa, considerando efectos de temperatura

σ_t: tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, en MPa, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de la prueba AASHTO

Además de calcular el espesor de losa, PAVIVIAL también verifica que el escalonamiento en la junta de las losas no sea mayor a 6 mm. y comprueba que las tensiones máximas de esquina sea menores que la tensiones máximas de borde y cumplir con el supuesto de diseño que el pavimento fallará por agrietamiento de borde antes que por agrietamiento de esquina.

Tabla F4. Resultados espesores de losa para pavimentos rígidos en la zona de Chillán

		V10			V15			V20		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
P15	L1	180	180	180	180	180	190	180	180	200
	L2	180	180	180	180	180	190	180	180	200
	L3	180	180	180	180	180	190	180	180	210
P50	L1	180	180	190	180	190	220	180	200	230
	L2	180	180	200	180	190	230	180	210	240
	L3	180	180	210	180	200	230	180	210	250
P85	L1	180	200	230	180	220	260	180	240	280
	L2	180	200	240	180	230	270	180	250	290
	L3	180	210	250	180	240	280	190	260	300
MOP	L1	180	180	200	180	190	230	180	220	250
	L2	180	180	210	180	200	240	180	220	260
	L3	180	180	210	180	200	240	180	230	270

ANEXO G

Análisis Comparativo

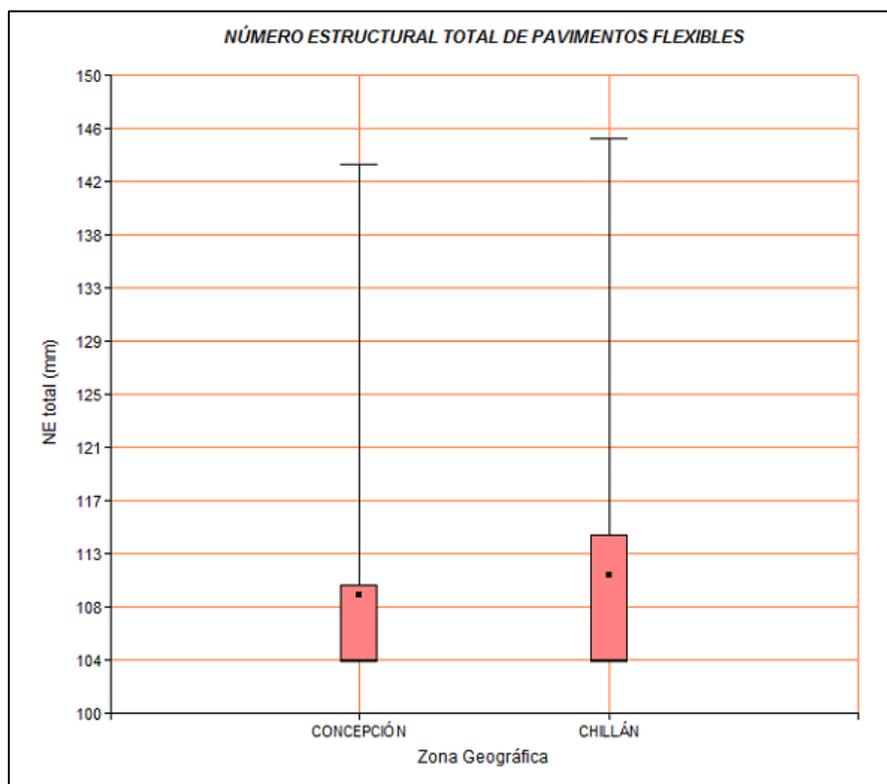


Figura G1. Comparación NE total según Zona Geográfica

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G1, se puede observar a simple vista que los resultados son muy semejantes entre ambas zonas geográficas. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G1. Test de Igualdad de Medias NE total según Zona Geográfica

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:NE total - Clasificación:Zona Geográfica		
Zona:	Chillán	Concepción
n:	72	72
Media:	111	110
Diferencia de Medias	1	
LI (95)	-1,73	
LS (95)	4,78	
t	0,93	
p-valor	0,3553	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de ambas muestras son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos en Chillán y Concepción.

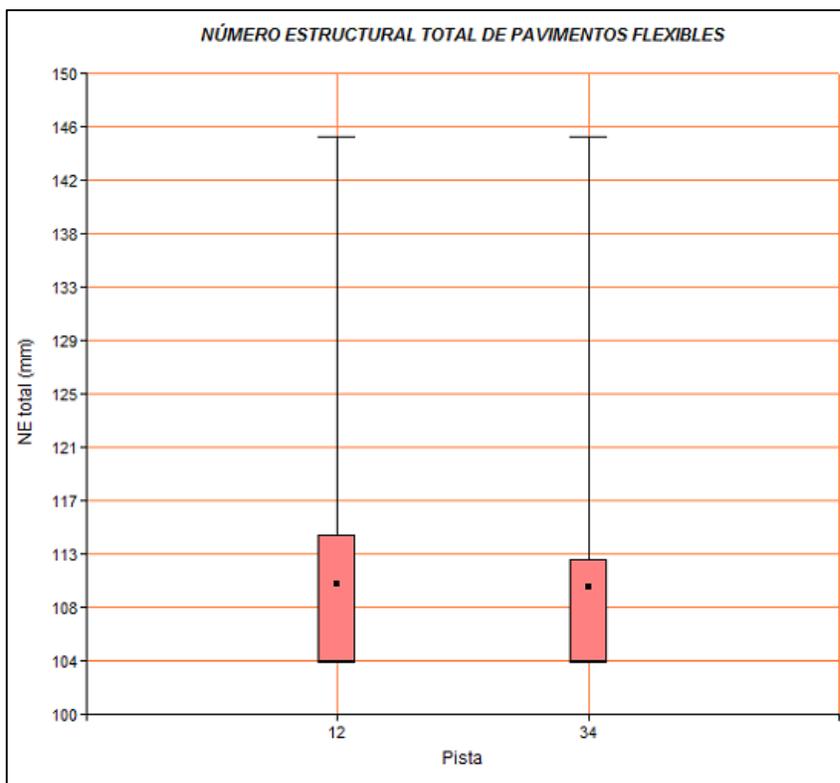


Figura G2. Comparación NE total según Sentido de Pista

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G2, se puede observar a simple vista que los resultados son muy semejantes entre ambas pistas. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G2. Test de Igualdad de Medias NE total según Sentido de Pista

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:NE total - Clasificación: Sentido de Pista		
Sentido de Pista:	12	34
n:	72	72
Media:	111	110
Diferencia de Medias	1	
LI (95)	-3,02	
LS (95)	3,52	
t	0,15	
p-valor	0,88	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de ambas muestras son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos en las pistas 12 y 34.

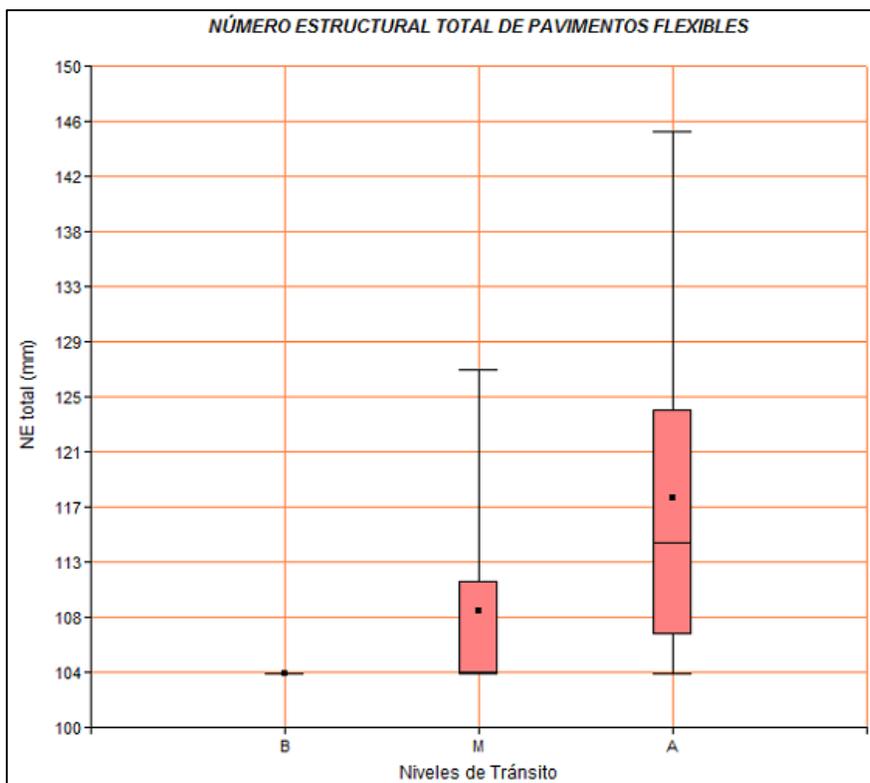


Figura G3. Comparación NE total según Niveles de Tránsito

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G3, se puede observar a simple vista que existen diferencias notables entre los resultados de los distintos niveles de tránsito. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G3. Test de Igualdad de Medias NE total según Niveles de Tránsito

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:NE total - Clasificación: Nivel de Tránsito		
Nivel de Tránsito:	A	B
n:	48	48
Media:	118	104
Diferencia de Medias	14	
LI (95)	9,72	
LS (95)	16,95	
t	7,41	
p-valor	<0,0001	
Variable:NE total - Clasificación: Nivel de Tránsito		
Nivel de Tránsito:	A	M
n:	48	48
Media:	118	109
Diferencia de Medias	9	
LI (95)	4,48	
LS (95)	12,69	
t	4,17	
p-valor	0,0001	
Variable:NE total - Clasificación: Nivel de Tránsito		
Nivel de Tránsito:	B	M
n:	48	48
Media:	104	109
Diferencia de Medias	-5	
LI (95)	-6,77	
LS (95)	-2,73	
t	-4,73	
p-valor	<0,0001	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)] sólo al comparar tránsito bajo con tránsito medio, por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de ambas muestras son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos en los niveles de tránsito bajo y medio. Sin embargo al comparar tránsito alto con tránsito medio y tránsito bajo; el valor t está fuera del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto se rechaza la hipótesis de que las medias de las muestras comparadas son iguales, es decir, existen diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos para los distintos niveles de tránsito.

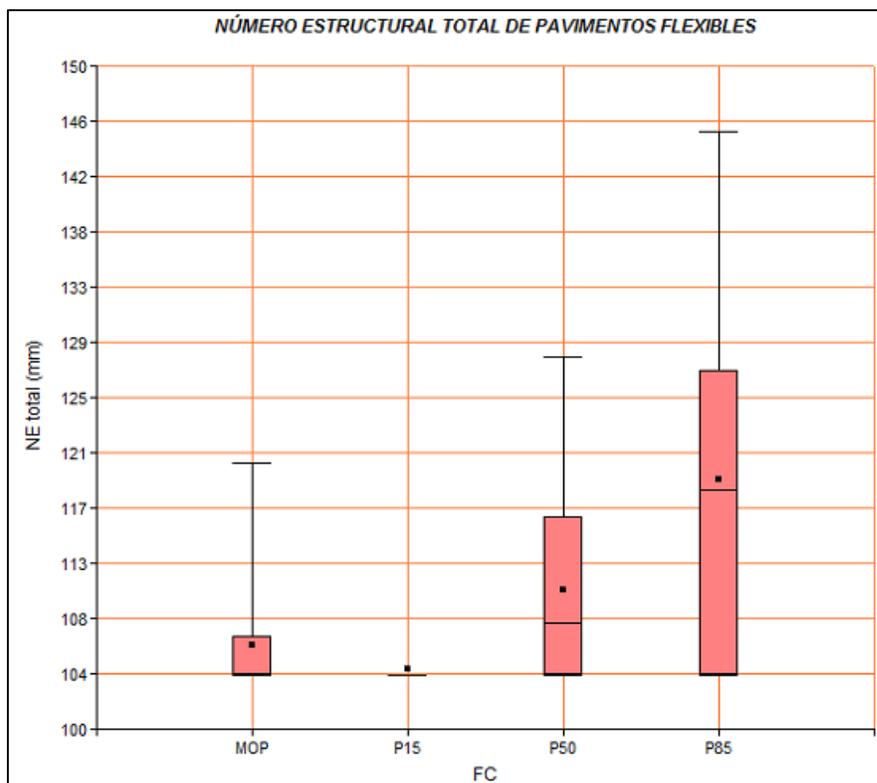


Figura G4. Comparación NE total según FC utilizados

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G4, se puede observar a simple vista que existen diferencias notables entre algunos de los resultados de los distintos FC utilizados. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G4. Test de Igualdad de Medias NE total según FC utilizados

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:NE total - Clasificación: FC utilizado		
FC utilizado:	MOP	P15
n:	36	36
Media:	107	105
Diferencia de Medias	2	
LI (95)	0,22	
LS (95)	3,38	
t	2,3	
p-valor	0,0262	
Variable:NE total - Clasificación: FC utilizado		
FC utilizado:	MOP	P50
n:	36	36
Media:	107	111
Diferencia de Medias	-4	
LI (95)	-7,15	
LS (95)	-1,19	
t	-2,8	
p-valor	0,007	
Variable:NE total - Clasificación: FC utilizado		
FC utilizado:	MOP	P85
n:	36	36
Media:	107	119
Diferencia de Medias	-12	
LI (95)	-17,36	
LS (95)	-7,58	
t	-5,15	
p-valor	<0,0001	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)] al comparar FC (MOP) con FC (P15) y FC (P50), por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de las muestras comparadas son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos utilizando FC (MOP) respecto de FC (P15) y FC (P50). Sin embargo al comparar FC (MOP) con FC (P85); el valor t está fuera del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto se rechaza la hipótesis de que las medias de ambas muestras son iguales, es decir, existen diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos utilizando FC (MOP) respecto de FC actualizados (P85).

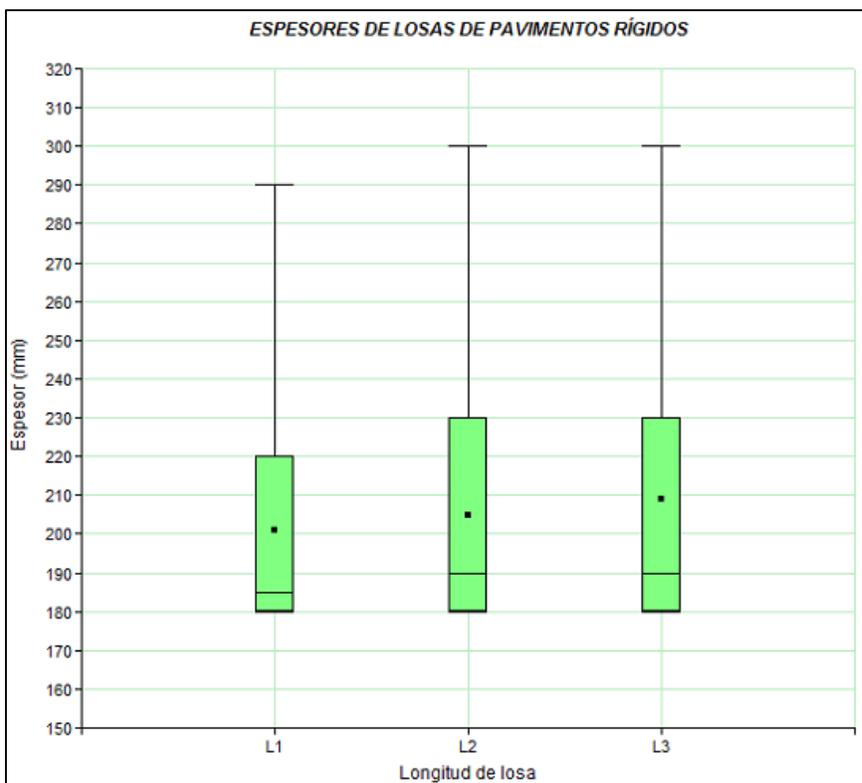


Figura G5. Comparación Espesores de Losa según Longitud de Losa

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G5, se puede observar a simple vista que los resultados son muy semejantes entre las distintas longitudes de losa. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G5. Test de Igualdad de Medias Espesor de Losa según Longitud de Losa

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:Espesor - Clasificación: Longitud de Losa		
Longitud de Losa:	L1	L2
n:	72	72
Media:	210	210
Diferencia de Medias	0	
LI (95)	-13,96	
LS (95)	6,18	
t	-0,76	
p-valor	0,4464	
Variable:Espesor - Clasificación: Longitud de Losa		
Longitud de Losa:	L1	L3
n:	72	72
Media:	210	210
Diferencia de Medias	0	
LI (95)	-18,7	
LS (95)	2,59	
t	-1,5	
p-valor	0,1369	
Variable:Espesor - Clasificación: Longitud de Losa		
Longitud de Losa:	L2	L3
n:	72	72
Media:	210	210
Diferencia de Medias	0	
LI (95)	-15,38	
LS (95)	7,04	
t	-0,73	
p-valor	0,4638	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)] en todas las comparaciones de longitud de losa, por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de las muestras comparadas son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos utilizando diferentes longitudes de losa.

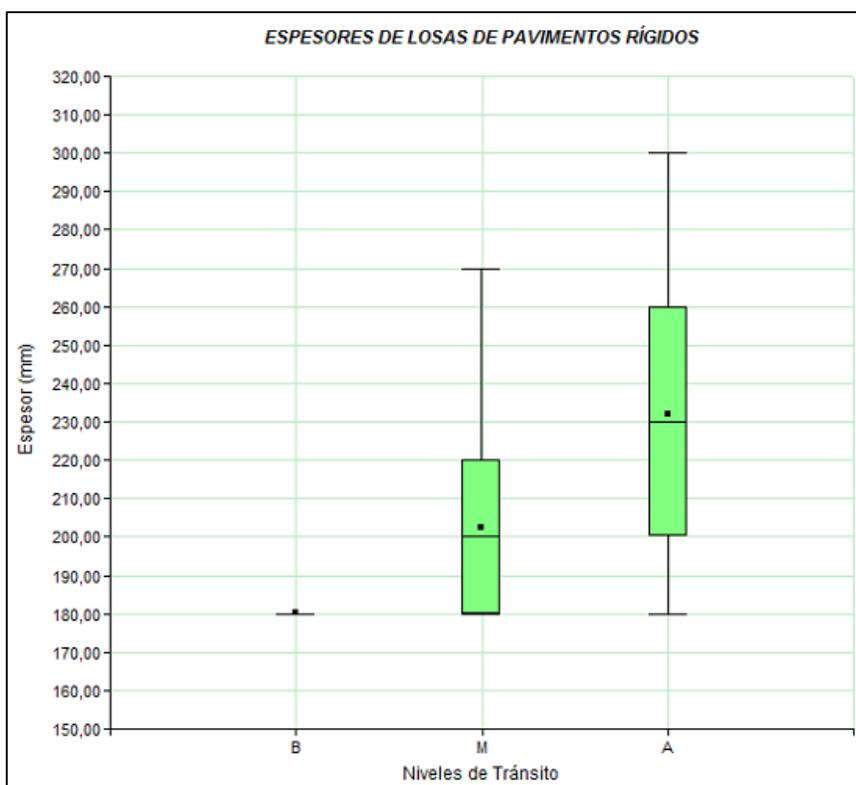


Figura G6. Comparación Espesores de Losa según Niveles de Tránsito

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G6, se puede observar a simple vista que existen diferencias notables entre los resultados de los distintos niveles de tránsito. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G6. Test de Igualdad de Medias Espesores de Losa según Niveles de Tránsito

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:Espesor - Clasificación: Nivel de Tránsito		
Nivel de Tránsito:	A	B
n:	72	72
Media:	240	190
Diferencia de Medias	50	
LI (95)	43,53	
LS (95)	59,8	
t	12,66	
p-valor	<0,0001	
Variable:Espesor - Clasificación: Nivel de Tránsito		
Nivel de Tránsito:	A	M
n:	72	72
Media:	240	210
Diferencia de Medias	30	
LI (95)	19,83	
LS (95)	39,62	
t	5,94	
p-valor	<0,0001	
Variable:Espesor - Clasificación: Nivel de Tránsito		
Nivel de Tránsito:	B	M
n:	72	72
Media:	190	210
Diferencia de Medias	-20	
LI (95)	-27,75	
LS (95)	-16,14	
t	-7,53	
p-valor	<0,0001	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está fuera del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto se rechaza la hipótesis de que las medias de las muestras comparadas son iguales, es decir, existen diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos para los distintos niveles de tránsito.

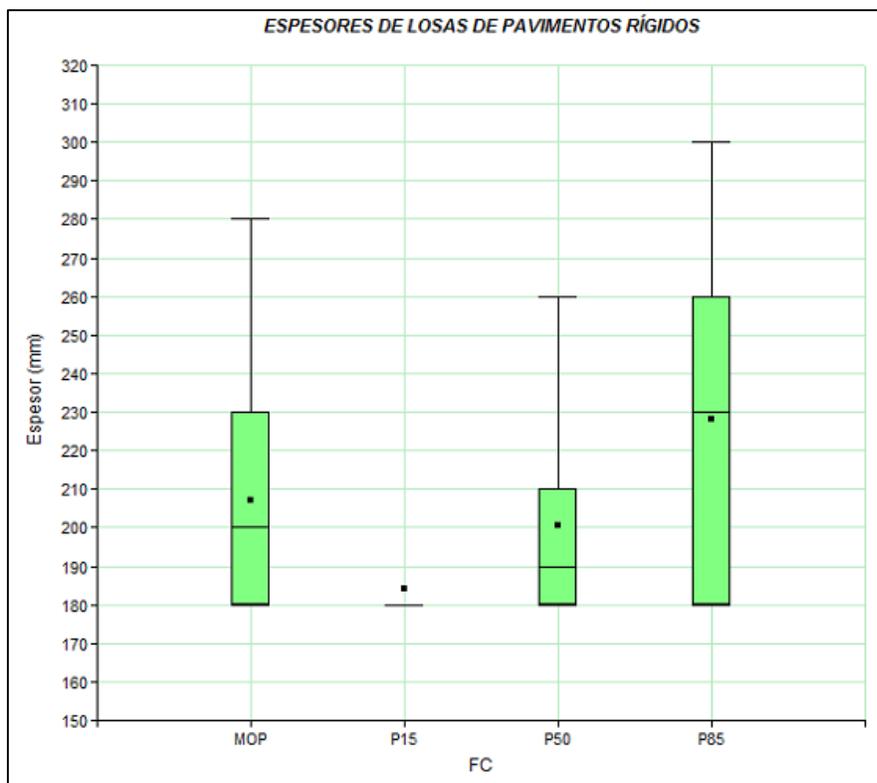


Figura G7. Comparación Espesores de Losa según FC utilizados

En el diagrama de cajas mostrado en la Figura G7, se puede observar a simple vista que existen diferencias notables entre algunos de los resultados de los distintos FC utilizados. Para verificar esta situación se presentan los resultados del test de igualdad de medias realizado.

Tabla G7. Test de Igualdad de Medias Espesores de Losa según FC utilizados

Prueba t para muestras Independientes		
Variable:Espesor - Clasificación: FC utilizado		
FC utilizado:	MOP	P15
n:	54	54
Media:	210	190
Diferencia de Medias	20	
LI (95)	14,27	
LS (95)	21,29	
t	5,35	
p-valor	<0,0001	
Variable:Espesor - Clasificación: FC utilizado		
FC utilizado:	MOP	P50
n:	54	54
Media:	210	210
Diferencia de Medias	0	
LI (95)	-3,69	
LS (95)	17,02	
t	1,28	
p-valor	0,2047	
Variable:Espesor - Clasificación: FC utilizado		
FC utilizado:	MOP	P85
n:	54	54
Media:	210	230
Diferencia de Medias	-20	
LI (95)	-34,86	
LS (95)	-7,36	
t	-3,05	
p-valor	0,003	

Como se muestra en la tabla anterior, el valor t está dentro del rango [LI (95), LS (95)] sólo al comparar FC (MOP) con FC (P50), por lo tanto, se aprueba la hipótesis de que las medias de ambas muestras son iguales, es decir, no hay diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos utilizando FC (MOP) respecto FC (P50). Sin embargo al comparar FC (MOP) con FC (P15) y FC (P85); el valor t está fuera del rango [LI (95), LS (95)], por lo tanto se rechaza la hipótesis de que las medias de las muestras comparadas son iguales, es decir, existen diferencias significativas entre los diseños de pavimentos obtenidos utilizando FC (MOP) respecto de FC actualizados (P15 y P85).