

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Ing. Sergio Vargas T.

Profesores Comisión: Dr. Ing. Patricio Álvarez M.

Mg. Ing. Ángela Salinas B.

**PROPUESTA DE FACTOR CAMIÓN PARA EL
DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN LA
REGIÓN DEL BÍO-BÍO**

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

FRANCISCO PASTRANA CONCHA

CONCEPCIÓN, MARZO 2014

PROPUESTA DE FACTOR CAMIÓN PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO

Autor: Francisco Javier Pastrana Concha

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

Correo electrónico: fpastran@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Sergio Vargas Tejeda. Ph.D.

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 calcular el número de ejes equivalentes acumulados durante su vida útil. Estos ejes equivalentes pueden ser obtenidos en base a factores de conversión, que transforman un tipo de vehículo en números de ejes equivalentes.

El Manual de Carreteras de Chile propone dichos factores de conversión bajo el nombre de Factores Camión (FC), los cuales son calculados con información de pesaje de los años 90 y en base a un enfoque empírico, lo que hace necesario su actualización en cuanto a caracterización de cargas y método de cálculo. Por lo anterior, esta investigación propone FC en base a un enfoque mecanicista-empírico calculados con información de configuraciones de cargas actualizadas, para el diseño de pavimentos rígidos en la región del Bío-Bío. Para ello se caracterizan las configuraciones de carga, se diseña una matriz de escenarios de diseño, se modelan estados tensionales en los pavimentos para cada escenario y distintos niveles de carga. Finalmente mediante el software EverFe 2.24 y usando modelos de fatiga, se calculan los FC para cada escenario.

Los principales resultados indican que los FC propuestos son mayores a los calculados con el método AASHTO en la mayoría de las configuraciones estudiadas. También son mayores a los valores entregados por el Manual de Carreteras, a excepción de los camiones múltiples (excepto remolques) donde los valores de FC resultaron menores. Finalmente se recomienda realizar un estudio similar para pavimentos flexibles.

Palabras claves: Métodos mecanicista-empírico, pavimentos rígidos, factor camión.

4995 palabras texto+ 12 tablas o figuras *250 + 4 tablas o figuras*500= 9995

ABSTRACT

In Chile pavement design is governed by the AASHTO method, which requires calculate the number of equivalent axes accumulated during their lifespan. These equivalent axes can be obtained in base to conversion factors, which transforms a vehicle type in its corresponding number of equivalent axes.

The Manual of Highways of Chile proposes those conversion factors under the name Truck Factor (TF), which are calculated with weighing information of the 90s and based on an empirical approach, for what it does necessary its update as for characterization of loads and calculation method. This research proposes TF based on a mechanistic-empirical approach calculated with information of updated configurations loads for the design of rigid pavements in the “Region del Bío-Bío”. For this are characterized loading configurations, is designed a matrix of design scenarios, are modeled tensional states on the pavements for each scenario and different load levels. Finally through the EverFe 2.24 software and using fatigue models are calculated the TF for each scenario.

The main results indicate that the TF proposed in this thesis work are higher than those calculated using the AASHTO method in most of the studied configurations. They are also higher than the values given for The Manual of Highways of Chile, except for the multiple trucks (except trailers) where the values of TF were lower. Finally it is recommended realize a similar study for flexible pavements.

Keywords: mechanistic-empirical methods, rigid pavements, truck factor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, pilar fundamental en mi vida, por apoyarme en las buenas y en las malas, en este largo camino universitario y más aun en esta última etapa que se está cerrando en mi vida. También quiero agradecer a mi polola Romina, que me ha dado el apoyo incondicional que siempre he necesitado y por sobretodo, me ha demostrado que la constancia, responsabilidad y el trabajo duro siempre traen buenos frutos.

Quiero agradecer al profesor Sergio Vargas, por mostrarme el camino a seguir de una forma clara y precisa, así mismo, por entregarme las herramientas necesarias en esta última etapa de mi vida universitaria, para la realización de este trabajo de tesis.

De igual forma quiero agradecer a mis compañeros y amigos, por darme el apoyo y palabras de aliento en momentos de nerviosismo y ansiedad, que logran hacer que confíe en mis capacidades para enfrentar los desafíos que se me presentan.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 Objetivo general.....	1
1.2.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Metodología de trabajo	2
2. SÍNTESIS DE ANTECEDENTES.....	4
2.1 Introducción	4
2.2 Factor camión	4
2.3 Cálculo de factor de eje equivalente bajo método empírico	4
2.4 Cálculo de factor camión mediante métodos mecanicistas-empíricos	5
2.5 Vida de fatiga en pavimentos de hormigón	6
2.5.1 Modelo de Vesic y Saxena (1969)	6
2.5.2 Modelo de Majid Zadeh y Ilves (1983-1985)	7
3. CONFIGURACIONES DE CARGA EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO	8
3.1 Introducción	8
3.2 Fuentes de información.....	8
3.3 Identificación de estaciones	8
3.4 Identificación de vehículos tipo	9
3.5 Caracterización de carga por eje	11
4. ESCENARIOS DE MODELACIÓN	13
4.1 Introducción	13
4.2 Condiciones de diseño	13
4.2.1 Longitud de losa	13
4.2.2 Configuraciones de carga características	13
4.2.3 Carga por eje	14
4.2.4 Espesor de pavimento.....	14
4.2.4 Parámetros de modelación	15
4.3 Matriz de escenarios	15

5. CÁLCULO DE FACTOR CAMIÓN.....	17
5.1 Introducción	17
5.2 Cálculo de factor camión mediante método empírico	17
5.3 Factor camión mediante método mecanicista-empírico	18
5.3.1 Análisis mediante modelo de fatiga Majid Zadeh y Ilives.....	20
5.3.2 Análisis mediante modelo de fatiga Vesic y Saxena.....	21
6. ANÁLISIS COMPARATIVO	23
6.1 Introducción	23
6.2 Comparación método mecanicista-empírico con método empírico y MOP.....	23
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Vehículos pesados predominantes en la región del Bío-Bío	10
Tabla 2. Longitudes de losa más utilizados	13
Tabla 3. Configuraciones de carga utilizadas para la modelación	14
Tabla 4. Niveles de carga por eje	14
Tabla 5. Espesores de pavimentos según niveles de tránsito en la región del Bío- Bío.....	14
Tabla 6. Matriz de escenarios	16
Tabla 7. FEE y FC de camión múltiple N° 8.....	17
Tabla 8. Resumen FC calculado con el método empírico AASHTO.....	18
Tabla 9. Tensiones en pavimentos rígidos.....	19
Tabla 10. Factores camión en base a modelo Vesic y Saxena	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de trabajo	2
Figura 2. Estaciones de control en cada región	9
Figura 3. Histograma Frecuencia Absoluta v/s tonelaje por EDRD camión 2.....	12
Figura 4. FC modelo Majid Zadeh y Ilives	20
Figura 5. FC modelo Vesic y Saxena	21
Figura 6. FC métodos M-E, AASHTO y MOP	23

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El diseño de pavimentos bajo el método AASHTO (AASHTO, 1993), actualmente vigente en Chile, requiere del cálculo de ejes equivalentes acumulados durante la vida de diseño. Los ejes equivalentes pueden ser calculados en base a factores de conversión, llamados Factor Camión (FC), que transforman un tipo de vehículo pesado en número de Ejes Equivalentes.

Actualmente, el Manual de Carreteras Volumen N°3 (MCV3) (MOP, 2013a) propone valores de FC calculados en base a información de plazas de pesajes de fines de los años 90. Sin embargo estos factores requieren ser actualizados entendiendo que tanto los tipos de camiones, las configuraciones de ejes y las cargas transportadas han sufrido variaciones en el último tiempo.

Por otra parte, los factores propuestos por el MCV3 fueron calculados en base a un enfoque empírico. Sin embargo, hoy en día dada la disponibilidad de herramientas computacionales es posible calcular estos factores considerando un enfoque mecanicista-empírico (M-E) de análisis de tensiones y deformaciones, que se ajusta de mejor forma al problema tratado.

Por estas razones, esta investigación propone una actualización de los FC, en la región del Bío Bío, considerando información regional de tipos de vehículos y cargas transportadas, bajo un enfoque de tipo M-E.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Proponer factores camión para el diseño de pavimentos rígidos en la región del Bío-Bío, en base a un enfoque mecanicista-empírico.

1.2.2 Objetivos específicos.

1. Establecer configuraciones de cargas características de la región del Bío-Bío en base a encuestas origen destino y datos de plazas de pesaje.
2. Diseñar una matriz de escenarios para el cálculo de factor camión.
3. Calcular factores camión en base a matriz de escenarios y a un enfoque mecanicista-empírico.
4. Comparar los factores camión respecto de los calculados con método AASHTO y de los propuestos por el Manual de Carreteras.

1.3 Metodología de trabajo

La metodología propuesta para este trabajo consta de 5 etapas. La Figura 1, muestra un esquema de la metodología utilizada en esta investigación.

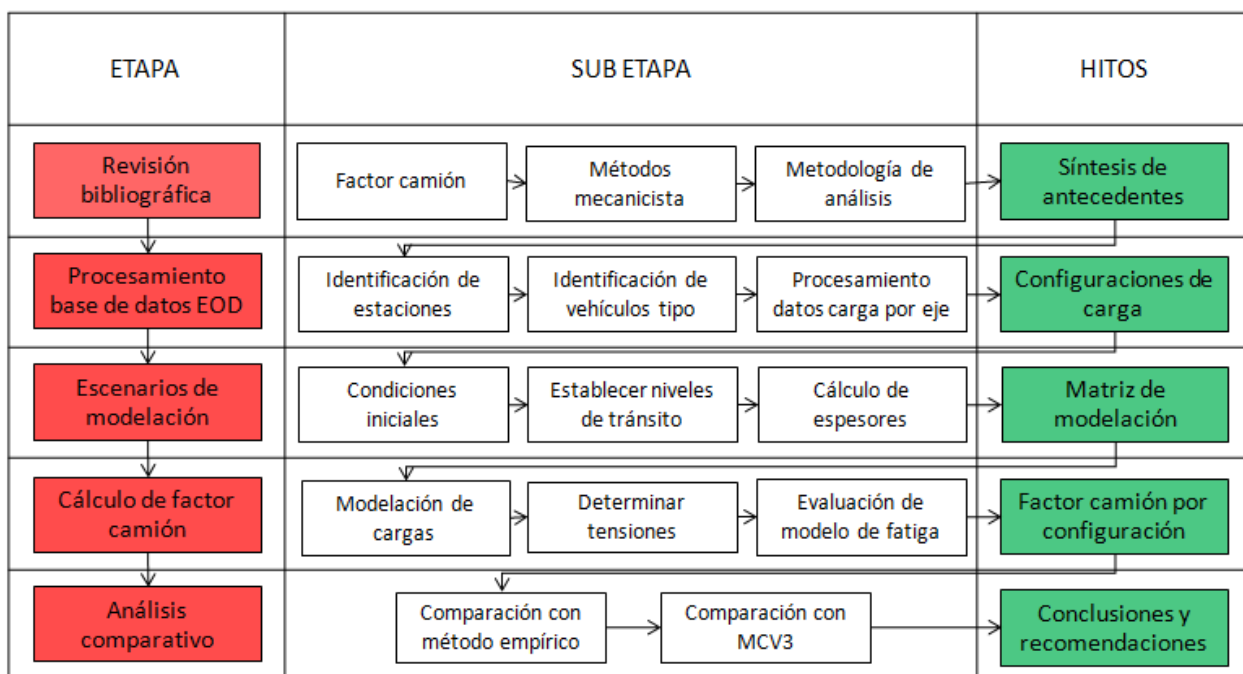


Figura 1. Metodología de trabajo

La primera etapa se refiere a una revisión bibliográfica y se divide en 3 sub-etapas que tienen por objetivo estudiar aspectos bases para el cálculo del FC; éstas son: estudiar qué es el FC, revisar antecedentes sobre métodos mecanicistas y establecer la metodología de cálculo de FC. Como resultado se obtuvo una síntesis de antecedentes.

La segunda etapa se refiere al procesamiento de bases de datos de encuestas origen-destino (EOD) para caracterizar vehículos tipo en la región del Bío-Bío. Se seleccionaron las estaciones de medición, y se identificaron los vehículos pesados característicos que circulan por ruta y se extrajo información de peso desde la plaza de pesaje Agua Amarilla, en la Autopista del Itata, para obtener las configuraciones de carga características de la Región del Bío-Bío.

En la tercera etapa "Escenarios de modelación", se establecieron distintas combinaciones de variables de modelación, según características de la región. Se establecieron las condiciones de diseño como: materialidad de la losa, resistencia de sub-base, entre otras. Luego se recopiló espesores de pavimento de acuerdo a los tránsitos de la Región, estableciéndose finalmente una matriz de escenarios para el cálculo de FC.

La cuarta etapa se refiere al cálculo de FC. Este se realizó aplicando un enfoque M-E. La modelación de las cargas y el cálculo de tensiones en el pavimento para los distintos escenarios se realizó a través del software de elementos finitos EverFe 2.24 (Davids et al, 2003). Posteriormente se utilizaron modelos de fatiga para obtener el número de repeticiones de carga que resiste el pavimento obteniendo finalmente el FC por configuración de carga.

En la quinta y última etapa se realizó un análisis comparativo entre los FC calculados a través del método M-E, los obtenidos por el método empírico AASHTO y los valores que entrega el MOP en el MCV3. También se llevó a cabo la redacción de las conclusiones y recomendaciones.

2. SÍNTESIS DE ANTECEDENTES

2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se presenta un panorama general de la información requerida para el desarrollo de la presente investigación. Se define el FC, se describen los métodos mecanicistas empíricos y se propone una metodología para el cálculo de FC.

2.2 Factor camión

El FC es un valor que representa el daño causado por un vehículo pesado sobre el pavimento, en función de una unidad patrón llamada "eje equivalente", el cual se refiere a un eje simple de rodado doble (ESRD), que entrega una carga de 8,16 toneladas al pavimento.

El FC representa a cuantos ejes equivalentes corresponde una pasada de un camión característico, en función del daño que éste produce. De esta forma, un FC igual a 2.0 indica que el daño producido por dicho vehículo equivale al daño de 2 pasadas de un eje equivalente.

Es relevante caracterizar el FC ya que, interpretan los efectos progresivos del aumento de las cargas pesadas en las vías, a causa de los avances en intercambios comerciales y la actualización del parque automotor. (Macea et al, 2012).

Este valor se puede calcular como la sumatoria de los factores de ejes equivalentes (FEE) de cada eje (Ecuación 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 que se produce con el paso de un eje equivalente (Ecuación 2).

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

$$FEE = \frac{\text{Daño } E_i}{\text{Daño } E_{eq}} \quad \text{Ec.(2)}$$

2.3 Cálculo de factor de eje equivalente bajo método empírico

Los métodos empíricos son métodos elaborados y calibrados con parámetros de un lugar determinado, para el cálculo de una variable determinada. En el caso del cálculo de FC, y por ende, de FEE, en Chile se ha aplicado el método AASHTO, cuyas ecuaciones para pavimentos de hormigón son las siguientes:

$$\log\left(\frac{1}{FEE}\right) = 4,62 * \log(18 + 1) - 4,62 * \log(L_x + L_2) + 3,28 * \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad \text{Ec.(3)}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4,5 - P_f}{3}\right) \quad \text{Ec.(4)}$$

$$\beta_x = 0,40 + \frac{3,63 * (L_x + L_2)^{5,20}}{(D+1)^{4,46} * L_2^{3,52}} \quad \text{Ec.(5)}$$

Donde:

Lx: Peso del eje x en Kips.

L2: Código del tipo de eje (1,2 ó 3 respectivamente).

Pf: Índice de serviciabilidad final.

D: Espesor de la losa de hormigón.

β_{18} : β evaluado en X=18 para eje estándar de 18 Kips.

Distintos autores han utilizado este método para caracterizar los FC en una zona determinada (Crasprowitz, 2010; Ulloa et al, 2007). En Chile, los valores de FC están calculados según información de distintas plazas de pesaje, y se presentan en Tabla 3.603.202 C. del MCV3. Para un proyecto dado, y en ausencia de información de cargas por eje, se utiliza el FC que más se identifique con el proyecto.

2.4 Cálculo de factor camión mediante métodos mecanicistas-empíricos

Los modelos mecanicistas tienen un enfoque científico, y permiten el completo análisis del comportamiento de un pavimento ante acciones del clima y tránsito vehicular (Garnica et al, 2004). Su funcionamiento es estimado y basado en las propiedades fundamentales de las capas de pavimento (Zaman et al, 1994). En el caso del cálculo de FC, los modelos mecanicistas permiten determinar las tensiones de trabajo de un pavimento, y mediante la utilización de modelos de fatiga, determinar el número de repeticiones que este puede resistir.

(Chatti et al, 2008 y Navarrete, 2008), utilizaron métodos mecanicistas para calcular las respuestas estructurales de pavimentos de hormigón, debido a la carga de un eje o un grupo de ejes, e integraron funciones empíricas utilizadas para relacionar la respuesta del pavimento con un número de repeticiones de cargas admisibles.

Chatti et al, 2008, definió el daño producido por un ciclo de carga como el inverso de la vida de fatiga N_E (Ecuación 6), la cual establece la cantidad de ciclos de carga que resiste el pavimento

dado el paso de un eje determinado. Reemplazando la Ecuación 6 en la Ecuación 2 y simplificando, el FEE queda definido como lo expresa la Ecuación 7.

$$\text{Daño de un ciclo de carga} = \frac{1}{NE_i} \quad \text{Ec.(6)}$$

$$\text{FEE} = \frac{\frac{1}{NE_i}}{\frac{1}{NE_{eq}}} = \frac{NE_{eq}}{NE_i} \quad \text{Ec.(7)}$$

Otras investigaciones (Aburto, 2012; Díaz et al, 2011) utilizaron estas expresiones para el cálculo de FC de camiones de alto tonelaje, en la Región del Bío-Bío.

La vida de fatiga (NE_i) queda determinada por el estado tensional del pavimento, específicamente por las tensiones de trabajo (σ_t). Conocido el espesor del pavimento, las propiedades mecánicas de los materiales (módulos dinámicos o resilientes), el tipo de clima en donde se emplazará el pavimento (precipitación y temperatura), y el nivel de tránsito vehicular determinado ya sea en ejes equivalentes o a través de un espectro de distribución de cargas, es posible determinar el estado tensional en la losa. Para el cálculo se considera al pavimento como un medio multicapas en el cual el comportamiento de los materiales responde a la teoría de la elasticidad.

La expresión general para el cálculo de la vida de fatiga es la siguiente:

$$N_i = f(SR)$$

Donde SR es la razón entre la tensión de trabajo (σ_t) y la resistencia a la flexotracción (S_f) del hormigón.

2.5 Vida de fatiga en pavimentos de hormigón

Existen en la literatura distintos modelos de vida de fatiga, algunos recopilados por (Aburto, 2012), de los que se extrajeron los considerados más convenientes para el análisis en esta investigación, estos se describen a continuación:

2.5.1 Modelo de Vesic y Saxena (1969)

En este modelo de deterioro se analizó información de las secciones de prueba de caminos AASHTO con la utilización de índice de serviciabilidad de 2.5 como criterio de falla. Se utilizó el esfuerzo de tensión provocado por una carga en la zona de rodado, determinado a través de la teoría de placa de Westergaard. De esta forma se obtuvo la siguiente expresión:

$$N = 225,000 * SR^{-4} \quad \text{Ec.(8)}$$

En donde:

N: Número de solicitudes de carga para que ocurra la falla de agrietamiento por fatiga dada una determinada SR.

SR: Razón entre la tensión de borde y la máxima resistencia a la flexotracción tomada a los 28 días.

2.5.2 Modelo de Majid Zadeh y Ilves (1983-1985)

Al igual que el modelo de Vesic y Saxena este modelo también utilizó información de la prueba de caminos AASHTO. El análisis de esta prueba está basado en la teoría de la placa apoyada en una subrasante elástica sólida multicapas e incorpora efectos tales como la colocación de la carga actual, geometría de la losa, efectos de los dispositivos de transferencia de carga y variación en las propiedades de los materiales. La falla para este modelo fue definida con un índice de serviciabilidad final de 2.0. La ecuación que representa a este modelo es la siguiente:

$$N = 22,209 * SR^{-4,29} \quad \text{Ec.(9)}$$

En donde:

N: Número de solicitudes de carga para que ocurra la falla de agrietamiento por fatiga dada una determinada SR.

SR: Razón entre la tensión de borde y la máxima resistencia a la flexotracción tomada a los 28 días.

3. CONFIGURACIONES DE CARGA EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO

3.1 Introducción

En el siguiente capítulo se determinan los tipos de vehículos pesados más representativos en la Región del Bío-Bío. A partir de estas configuraciones se obtienen distribuciones de carga por eje, con información real y actualizada.

3.2 Fuentes de información

Para la caracterización de los vehículos pesados de la región se utilizaron las EOD de la Dirección de Vialidad como fuente de información.

Las EOD son censos bianuales realizados por la Dirección de Vialidad en años impares, con una duración de 24 hrs y contemplan muestras tomadas en primavera-verano o invierno-verano. Las encuestas se realizan a 1 de 4 vehículos en forma aleatoria durante 24 horas y se encuentran disponibles en el sitio web de la Dirección de Vialidad (<http://www.vialidad.cl/>).

3.3 Identificación de estaciones

Para identificar los vehículos pesados que mayormente circulan por la región se seleccionaron 4 estaciones de control, 2 en la región del Bío-Bío, 1 en la región del Maule y otra en la región de la Araucanía. Las estaciones que se encuentran fuera de la región fueron escogidas por dos razones. La primera, porque la Región del Bío-Bío es una puerta a las importaciones y exportaciones que se realizan en la zona centro-sur del país; y la segunda, se debe a que por la Región del Bío-Bío atraviesa la principal arteria de comunicación terrestre, la ruta 5, por ende hay mucha afluencia de vehículos con carga desde el sur y el norte del país.

Las estaciones de control escogidas se presentan en la Figura 2, los puntos y letras rojas demuestran la ubicación y nombre de cada estación de medición.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Estaciones de control en cada región

3.4 Identificación de vehículos tipo

La identificación de los vehículos pesados característicos de la zona, se realizó según cada estación de control determinada anteriormente (ver Anexo A). La información de conteo se procesó como sigue:




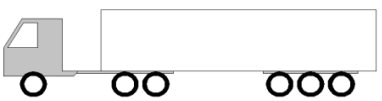
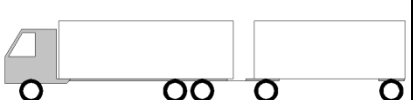
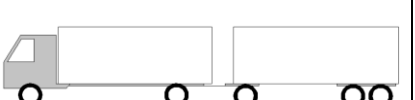

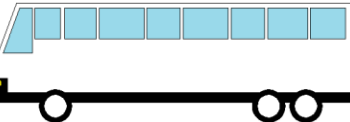
1. Se calculó un promedio simple de las pasadas vehiculares entre años 2007-2009-2011 por cada estación de medición, respetando el sentido de la vía.
2. Los vehículos se ordenaron de mayor a menor según la cantidad de pasadas generadas por estación.
3. Se seleccionaron los vehículos con mayor cantidad de pasadas por estación y se fue bajando de posición, hasta completar un total del 70% de las pasadas totales, en la muestra seleccionada.
4. Los vehículos se agruparon por camión de 2 ejes, de más de 2 ejes y buses totales. Los datos de cada estación fueron agrupados en una base de datos general.

En función de los puntos anteriores se obtuvo lo siguiente:

- Los camiones agrupados de 2 ejes (C2E) representan el 100% de los camiones de 2 ejes encuestados en todas las estaciones.
- Los camiones seleccionados de más de 2 ejes (C+2E), representan un 66% de todos los camiones de más de 2 ejes encuestados en todas las estaciones.
- Los buses (B) seleccionados representan un 72% de todos los buses encuestados en todas las estaciones.

La Tabla 1, muestra los vehículos pesados seleccionados y agrupados por tipo de vehículo. Se indica el número de categoría propuesto por la Dirección de Vialidad.

Tabla 1. 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 + semiremolque	
	8		Tracto camión + semiremolque	
	10		Camión de 3 ejes + remolque	
	13		Camión de 2 ejes + remolque	
BUS	73		Bus de 2 ejes	72%
	74		Bus de 3 ejes	

Fuente: Elaboración propia

3.5 Caracterización de carga por eje

Para los vehículos tipo seleccionados se obtuvieron datos de carga por eje en la plaza de pesaje de la Autopista del Itata, la cual está compuesta por dos estaciones de control. La IT-12 está encargada de pesar todos los camiones y buses que se dirigen hacia Concepción y la IT-34 que pesa en dirección a Chillán. Se escogió trabajar con datos de la estación IT-34, ya que por ella pasan vehículos con mayor carga, caso mas desfavorable.

Ambas estaciones cuentan con dos sistemas de pesaje, el primero es un sistema que tiene una balanza selectiva (sistema dinámico automático de pesos por eje), el cual selecciona los vehículos que transitan por ella, detectando en forma estimada aquellos que tengan sobrepeso en algún eje. Si un vehículo transita con sobrepeso se le indica el paso al segundo sistema de pesaje, el cual cuenta con una balanza punitiva (sistema dinámico/estático semiautomático de pesos por eje) de precisión llamada la romana. Esta es la encargada de fiscalizar con precisión los vehículos que no cumplan con los límites de pesos que están establecidos en el Decreto N°1910/2 (MOP, 1980).

Se hace difícil establecer con precisión datos reales de carga, ya que existe mucha evasión por parte de los camioneros, aunque en el lugar se encuentre un funcionario de Carabineros de Chile y un inspector fiscal de pesaje. Además de los vehículos que se les indica pasar a romana, aproximadamente solo un 20% ingresa. Otro aspecto a destacar es que la primera balanza los conductores intencionalmente no integran su vehículo en forma correcta a los sistemas de pesaje, lo que hace que hayan mediciones erróneas, menores a las reales.

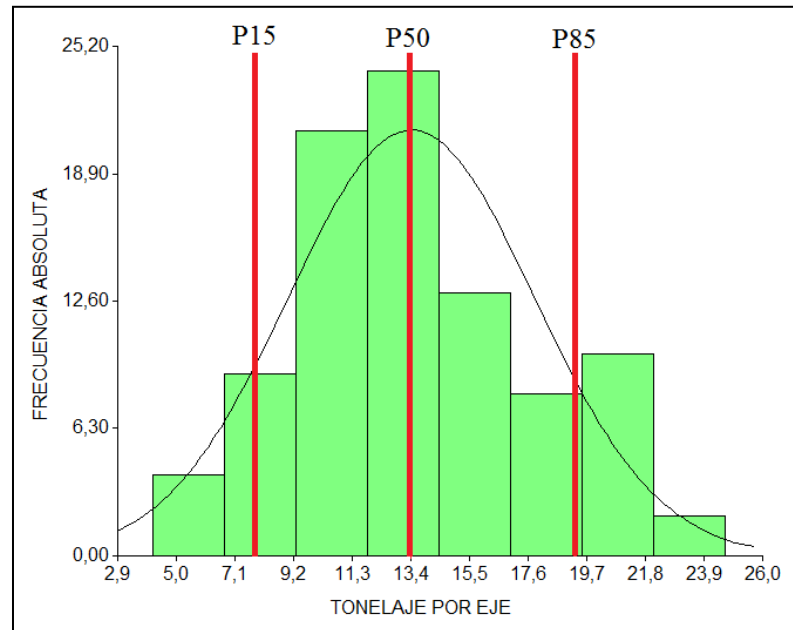
A raíz de estos problemas se optó por trabajar con mediciones durante los 3 días posteriores a la calibración de las balanzas, en donde no hay un inspector fiscal, por lo que instintivamente los conductores no incurren en faltas.

La obtención de información de pesos por eje se realizó durante 3 días (desde 00:00 hrs del 9 de mayo hasta 23:59 hrs del 11 de mayo del 2013) en la balanza selectiva, ya que todos los vehículos pesados transitan por ahí.

Para cada eje se seleccionaron 100 mediciones en forma aleatoria, las cuales se ajustan a una distribución normal, estimándose distribuciones de pesos por eje de cada vehículo. De esta forma se caracterizó cada eje de un vehículo con la media, la desviación estándar y además los percentiles 15 y 85 de carga por eje. Lo anterior con el objetivo de determinar distintos niveles de carga:

- Nivel bajo de carga-----→ Percentil 15 (P15)
- Nivel medio de carga-----→ Percentil 50 (P50)
- Nivel alto de carga-----→ Percentil 85 (P85)
-

En la Figura 3 a modo de ejemplo se muestra la distribución de los datos de carga de un EDRD del camión 2. Se puede observar los distintos niveles de carga mencionados anteriormente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Histograma Frecuencia Absoluta v/s tonelaje por EDRD camión 2

En el Anexo B, se presenta con mayor detalle las distribuciones de carga por eje de cada vehículo seleccionado.

4. ESCENARIOS DE MODELACIÓN

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se definieron las configuraciones de cargas con su respectivas distribuciones de carga por eje. En este capítulo se definen distintos escenarios de modelación en función de distintas variables, tales como; espesor de pavimento, largo de losa y configuraciones de carga. Además se estableció la materialidad y calidad de los componentes estructurales de pavimento que se utilizaron en los distintos escenarios.

4.2 Condiciones de diseño

Para cada escenario se definieron variables independientes y dependientes. Las variables independientes son: Longitud de losa (L), tonelaje por eje de cada vehículo (π) y las distintas configuraciones de carga (T_c). La variable dependiente es el espesor de pavimento (e) que es respuesta a los niveles de tránsito, en conjunto de otras variables como la calidad de materiales, largo de losa y condiciones climáticas, entre otros.

4.2.1 Longitud de losa

Se consideraron 3 largos de losa según las especificaciones técnicas del MOP en el Manual de Carreteras versión N°5 (MCV5) (MOP,2013b). La Tabla 2 muestra los distintos largos de losas considerados.

Tabla 2. Longitudes de losa más utilizados

Niveles	Longitud losa (m)	Nomenclatura en matriz de modelación
Corta	3	L1
Media	4	L2
Larga	5	L3

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Configuraciones de carga características

En este punto se presentan los vehículos que más circulan por las vías de la Región del Bío-Bío, identificados en el punto 3.4. Se destaca esta variable ya que la carga traspasada al pavimento dependerá de cada configuración de eje. En la Tabla 3, se presentan los distintos vehículos con su respectiva nomenclatura para la matriz escenarios.

Tabla 3. Configuraciones de carga utilizadas para la modelación

Tipo de vehículo	Vehículo por categoría	Nomenclatura en matriz de modelación
C2E	Camión 1	K1
C+2E	Camión 2	K2
	Camión 7	K7
	Camión 10	K10
	Camión 13	K13
Bus	Bus 73	K73
	Bus 74	K74

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Carga por eje

El valor del nivel de carga por eje se puede ver en el Anexo B. La Tabla 4 muestra los niveles propuestos y su respectiva nomenclatura.

Tabla 4. Niveles de carga por eje

Niveles de Carga	Carga a utilizar	Nomenclatura en matriz de modelación
Baja	Percentil 15	P15
Media	Media	P50
Alta	Percentil 85	P85

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Espesor de pavimento

La elección de esta variable se realiza ya que es de suma importancia en el traspaso de tensiones hacia el suelo de fundación. Los valores a utilizar se recolectaron en base al trabajo de tesis realizado por (Riffo, 2013), donde se establecieron 3 espesores de pavimento según un tránsito bajo, medio y alto en la Región del Bío-Bío. La Tabla 5 muestra los espesores de pavimentos clasificados según el nivel de tránsito solicitado.

Tabla 5. Espesores de pavimentos según niveles de tránsito en la región del Bío- Bío

Nivel	TMDA(veh/día)	Espesor de losa (m)	Nomenclatura
Bajo	246	0,18	B
Medio	658	0,23	M
Alto	1451	0,28	A

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Parámetros de modelación

Para el cálculo de tensiones se fijaron valores de calidad de material ya sea tanto del hormigón como el suelo de fundación (base y subrasante).

a) Hormigón

Para las modelaciones se utilizó hormigón H40 con una resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de 40 Mpa registrada a los 28 días y un módulo de poisson de 0,15. El módulo de elasticidad del hormigón utilizado fue de 29000 Mpa 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. Además se utilizaron losas de hormigón del tipo JPCP (hormigón simple sin barras de traspaso de carga).

b) Base

El material de sub-base se consideró como un suelo granular con un CBR mínimo de 50%, espesor mínimo de 150mm, módulo de poisson de 0,3 y un módulo de elasticidad de 206,85 según las disposiciones del MCV3.

c) Subrasante

La subrasante en la Región del Bío-Bío principalmente se asemeja a un suelo fino arcilloso con un CBR mínimo de 10%, módulo de poisson de 0,35 y un modulo de elasticidad de 60 establecido por el MCV3.

4.3 Matriz de escenarios

El hito final de esta etapa, fue la construcción de una matriz de escenarios representativos de la Región del Bío-Bío, sobre los cuales se calcularon los FC. En la Tabla 6 se muestra la matriz de escenarios para la modelación de los distintos niveles de carga y combinaciones de condiciones.

Tabla 6. Matriz de escenarios

		L1			L2			L3		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
K1	B	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	M	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
	A	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27
K2	B	C28	C29	C30	C31	C32	C33	C34	C35	C36
	M	C37	C38	C30	C40	C41	C42	C43	C44	C45
	A	C46	C47	C48	C49	C50	C51	C52	C53	C54
Ki	B	C55	C56	C57	C58	C59	C60	C61	C62	Cn
	M	.								

Fuente Elaboración propia

Ki: Vehículo tipo Ki, con i= 1, 2, 7, 8, 10, 13, 73, 74.

Cn: Escenario correspondiente a la combinación n, con n= [1 - 216].

La Tabla 6 representa una matriz de 24x9 producto de la interacción de variables y rangos definidos anteriormente, lo que dio como resultado 216 escenarios de modelación.

Cabe destacar que cada combinación además está condicionada por la cantidad y tipo de eje que tendrá cada camión o bus respectivo.

5. CÁLCULO DE FACTOR CAMIÓN

5.1 Introducción

El siguiente capítulo se explica cómo se determinó el FC para cada escenario. El cálculo se realizó tanto para el método empírico como para el método mecanicista-empírico.

5.2 Cálculo de factor camión mediante método empírico

Se calculó el FC en base al método AASHTO tal como se expuso en el Capítulo 2. Se realizaron los cálculos con los espesores de pavimentos y niveles de carga por cada configuración definida en Capítulo 3, y además con índices de serviciabilidad final de 2 y 2.5. A modo de ejemplo, la Tabla 7, muestra los FEE y FC para el tipo de camión N° 8 que es un tractocamión más un semiremolque con un eje triple rodado doble (ETRD), para una carga promedio, espesor de losa de 23 cm e índice de serviciabilidad final de 2.5.

Tabla 7. FEE y FC de camión múltiple N° 8

	Simple	Tándem	Tridem	Total
L2	1	2	3	
Lx (Ton)	5,96	15,45	20,37	41,78
FEE	0,247	2,011	1,957	FC: 4,22

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 8 muestra el resumen de los FC según tipo de vehículo pesado y con un nivel de carga baja, media y alta (P15, Media ó P50, P85, respectivamente) calculados con el método empírico AASHTO, para una serviciabilidad final de 2.5. Se utilizó un espesor medio de 23 cm, ya que no existe diferencias significativas en el FC para los otros espesores de pavimento.

En el Anexo C se presenta mayor detalle respecto de resultados de FC en base a el enfoque empírico AASHTO.

Tabla 8. Resumen FC calculado con el método empírico AASHTO

Categoría	FC según niveles de carga (e=23 Cm, PSI final=2.5)		
	Baja	Media	Alta
	P15	M	P85
1	0,03	0,36	2,62
2	0,31	1,38	5,87
7	0,17	0,65	2,46
8	0,5	4,22	13,94
10	0,76	4,23	15,3
13	0,22	2,78	13,87
73	1,17	2,62	5,52
74	0,82	2,25	4,57

Fuente: Elaboración propia

5.3 Factor camión mediante método mecanicista-empírico

Para cada escenario se consideró la modelación por losa de un eje simple, eje doble o eje triple (según cada categoría de vehículo pesado) de forma independiente. Para realizar las modelaciones y obtener los estados tensionales en el pavimento, fue necesario la utilización del software de elementos finitos EverFe 2.24, desarrollado por la Universidad de Maine y Washington.

Para determinar las tensiones se situó la carga (eje) en el centro de la losa y se consideró una falla por borde, que es la más común, la cual comienza en el centro de la losa desde la base hasta la superficie de la misma. Se consideró la máxima tracción ubicada donde se consideró la falla o cercana a esta.

La tabla 9 presenta un resumen de los resultados de estados tensionales en el hormigón, de las distintas categorías de carga (K1,K2,K7,K8,K10,K13,K74,K75) y los distintos ejes que componen cada vehículo, una carga media por configuración, un nivel de longitud de losa medio igual a $L_2 = 4\text{m}$ y para distintos espesores de pavimentos según nivel de tránsito bajo, medio y alto (18cm, 23cm y 28cm respectivamente).

Tabla 9. Tensiones en pavimentos rígidos

Categoría	Tipo de Eje	Estados tensionales (Mpa)		
		18 cm	23 cm	28 cm
K1	ESRS	2	1,33	0,95
	ESRD	1,93	1,35	0,98
K2	ESRS	2,82	1,88	1,33
	EDRD	1,79	1,27	0,93
K7	ESRS	2,5	1,67	1,17
	EDRD	1,27	0,90	0,67
	EDRD	1,23	0,87	0,65
K8	ESRS	2,63	1,76	1,24
	EDRD	2,1	1,47	1,08
	ETRD	1,3	0,85	0,62
K10	ESRS	2,95	1,97	1,38
	EDRD	2,12	1,49	1,10
	ESRD	2,47	1,73	1,26
	ESRD	2,44	1,71	1,24
K13	ESRS	2,77	1,85	1,30
	ESRD	2,51	1,75	1,27
	ESRD	2,31	1,61	1,17
	EDRD	1,75	1,24	0,91
K73	ESRS	2,95	1,97	1,38
	ESRD	3,08	2,15	1,56
K74	ESRS	2,95	1,97	1,38
	ESRS+EDRD	2,52	1,76	1,28
Eje Estándar		2,58	1,8	1,31

Fuente: Elaboración propia

Las negritas indican las tensiones mayores que las del eje estándar. Se puede concluir que el vehículo de categoría K73 (Bus interurbano) es el que genera mayores tensiones, y por sobre las que produce el eje estándar. También es posible apreciar que las mayores tensiones se generan en el pavimento de menor espesor y que los ejes simples son los que generan mayor tensión, ya que poseen una menor área de contacto entre neumático y pavimento.

En el Anexo D se presenta la información completa de los estados tensionales de todas las combinaciones entregadas en la matriz de escenarios (Tabla 6). Además se muestra un ejemplo para obtener los estados tensionales mediante el software EverFe 2.24.

Con los estados tensionales respectivos fue posible obtener los FEE para cada eje, y el FC asociado a la suma de los mismos. A continuación se realiza un análisis por cada modelo de fatiga en conjunto con el cálculo de FEE y FC.

5.3.1 Análisis mediante modelo de fatiga Majid Zadeh y Ilives

Este modelo entrega la vida de fatiga del pavimento hasta alcanzar un índice de serviciabilidad final de 2.0. Una vez que este se aplicó, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La solicitación de carga más alta se produce en el escenario C168 perteneciente al vehículo K73 y a la modelación de su ESRD, con 93.075 ciclos de carga, los cuales determina un FEE mayor respecto a todas las modelaciones.
- La solicitación más baja se produce en el escenario C154 perteneciente a un vehículo K13 y a la modelación de su EDRD del remolque con 1,8105E+10 ciclos de carga, los cual determina un FEE menor respecto a las demás modelaciones.

Una vez que se calculó la vida de fatiga de los 216 escenarios, se determinó la vida de fatiga en un eje equivalente de modo de obtener los FEE y FC de cada escenario.

En la Figura 4 se presentan a modo de ejemplo los FC según modelo de fatiga, dada una serviciabilidad final de 2.0, un nivel de carga medio para todas las configuraciones, un largo de losa medio igual a 4m y distintos espesores de pavimento.

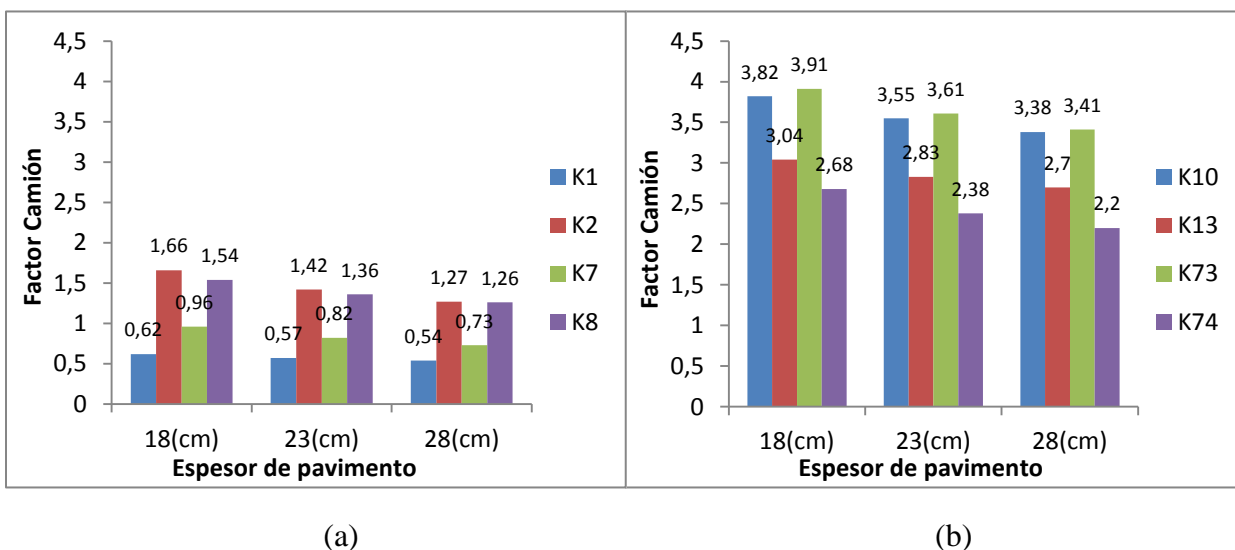


Figura 4. FC modelo Majid Zadeh y Ilives

En los dos gráficos de la Figura 4 se puede observar una marcada tendencia a decaer el FC a medida que se aumenta el espesor de la losa, debido a que la tensión que producen los ESRD disminuye en forma más pronunciada que la tensión del eje equivalente. En el gráfico (4a) se pueden observar las configuraciones vehiculares que tienen menor FC. Al contrario del gráfico (4b) en donde se encuentran los que producen mayor daño en los pavimentos rígidos.

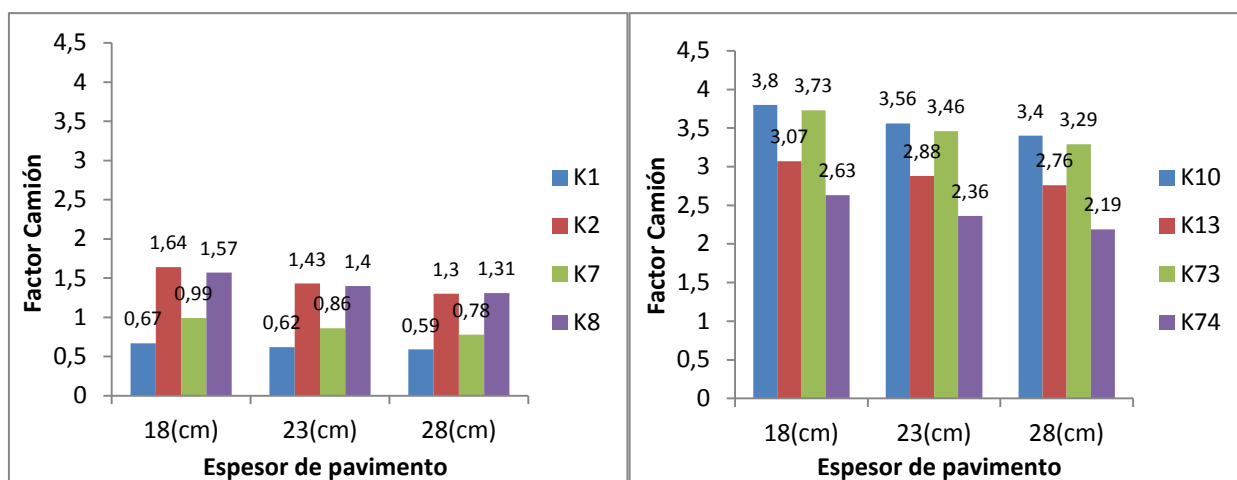
Las configuraciones de carga que producen más daño en este modelo son la K73 con un FC promedio de 3.6, que corresponde al bus de dos ejes, en conjunto con la configuración K10 con un FC igual a 3.5 aproximadamente, que corresponde a los camiones del tipo forestal. El vehículo que genera menos daño es el K1 camión de 2 ejes con un FC promedio de 0,57

5.3.2 Análisis mediante modelo de fatiga Vesic y Saxena

A diferencia del modelo anterior este alcanza un índice de serviciabilidad final de 2.5. Luego de la aplicación de este, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La sollicitación de carga más alta se produce en el escenario C168 perteneciente al vehículo K73 y a la modelación de su ESRD con 855.901 ciclos de carga, los cuales determinan un FEE más alto entre todas las modelaciones realizadas.
- La sollicitación más baja se produce en el escenario C154 perteneciente a un vehículo K13 y a la modelación de su EDRD del remolque con 7,309E+10 ciclos de carga, los cuales representan que posee un FEE menor con respecto a las demás modelaciones.

En la Figura 5, se presentan los FC según este modelo de fatiga, con una serviciabilidad final de 2.5, un nivel de carga medio para todas las configuraciones, un largo de losa medio igual a 4 m y distintos espesores de pavimento.



(a)

(b)

Figura 5. FC modelo Vesic y Saxena

En los gráficos de la Figura 5 al igual que en la 4 la tendencia de FC es la misma, a medida que aumenta el espesor decae el FC. En el gráfico (5a) se pueden observar las configuraciones vehiculares que tienen menor FC, al contrario del gráfico (5b) en donde se encuentran los que

tienen mayor FC. El vehículo que tiene mayor FC es el K10 con un FC promedio de 3,56 y le sigue el K74 bus de dos ejes con un FC promedio de 3,46 con una caída de 0,14 puntos con el anterior. La configuración que genera menor daño sigue siendo el K1 en este caso con un aumento a 0,62 respecto al modelo anterior.

Entre los dos modelos de fatiga existen diferencias mínimas entre valores de FC, en el caso de los camiones la mayoría de los FC es mayor en el modelo de Vesic, y en el caso de los buses los FC son mayores en el modelo de Ilives.

La Tabla 10 presenta los resultados de FC según modelo de fatiga de Vesic y Saxena. En el Anexo E se presentan todos los valores finales de FC para el modelo de fatiga Majid Zadeh y Ilives.

Tabla 10. Factores camión en base a modelo 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	2,83860
	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	1,47761	0,41026	0,77514	1,66254	0,39269	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

6. ANÁLISIS COMPARATIVO

6.1 Introducción

En este capítulo se sintetizan y comparan los diversos resultados de FC obtenidos con el método M-E, con los valores AASHTO y con los valores propuestos por MCV3. También se presentan conclusiones y recomendaciones finales de esta investigación.

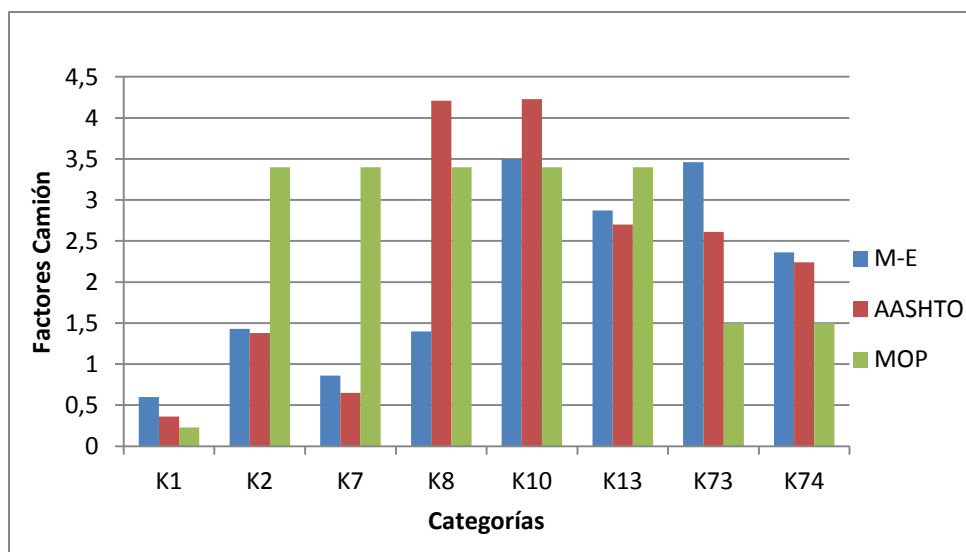
6.2 Comparación método mecanicista-empírico con método empírico y MOP

En este punto se compara el método de cálculo M-E, con el método empírico calculado a través de la ecuación AASHTO y los FC propuestos por el MOP en su MCV3, específicamente en su tabla "Ejes equivalentes por vehículo" 3.603.202 C para pavimentos rígidos.

Los valores a analizar del método M-E han considerado solamente un modelo de fatiga (Vesic y Saxena), ya que la diferencia entre los dos estudiados no va más allá de 0,3 puntos de FC. Además se analizaron modelaciones considerando largo de losa igual al largo medio $L_2 = 4m$. Para este análisis los FC del método AASHTO fueron calculados con una PSI final de 2,5, para un nivel de tránsito medio con un espesor de 23 cm de pavimento.

En el Anexo F, se presentan gráficos en donde se comparan y analizan los resultados de los tres métodos de obtención de FC por cada vehículo pesado seleccionado en el Capítulo 3.

La Figura 6, resume los valores de FC calculados en base a los 3 métodos mencionados anteriormente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. FC métodos M-E, AASHTO y MOP

El C2E (K1) con el método M-E entrega al pavimento un FC de 0,6, es más conservador que el método AASHTO que tiene como resultado FC de 0,36 y el MOP 0,23.

En la categoría de los buses (K73 y K74) sigue siendo más conservador el método M-E, le sigue de muy cerca el método AASHTO y luego el MOP con valores de FC muy bajos.

En los C+2E (K2, K7, K8, K10, K13) el FC entregado por el MOP con valor de 3,4 se repite en todas las configuraciones y solo se ajusta a las categorías K10 y K13 que son camiones con remolque, tomando de referencia como datos reales los resultados del método M-E.

Los FC calculados por el método AASHTO en las categorías K2-K7-K13 se acercan y son más optimistas que los valores del método M-E. En las configuraciones K8 y K10 este método no analiza de buena forma lo que sucede con el FC, ya que independiente de tener grandes o pequeñas cargas, la diferencia de FC en la categoría K8 entre ambos métodos es amplia lo que hace pensar que el método AASHTO no integra de buena manera la amplia distribución de tensiones que genera el ETRD de la categoría K8.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se propusieron FC para distintos vehículos de carga característicos de la Región del Bío-Bío, en relación al diseño de pavimentos de hormigón.

Para ello, se caracterizaron las configuraciones y distribuciones de cargas de los vehículos pesados en la región, considerando información de las EOD, y de pesos de la plaza de pesaje Agua Amarilla ubicada en la Autopista del Itata, estableciéndose las siguientes conclusiones

- Los vehículos pesados escogidos que mas circulan por las vías de la región, componen un 70% del universo de todos los vehículos contados, y se describen a continuación:
 - Camión de dos ejes (K1).
 - Camión de tres ejes (K2).
 - Camión Tracto camión + semiremolque con eje doble (K7).
 - Camión Tracto camión + semiremolque con eje triple (K8).
 - Camión de tres ejes + remolque con dos ejes simples (K10).
 - Camión de dos ejes + remolque con un eje simple y un eje doble (K13).
 - Bus de 2 ejes (K73).
 - Bus de 3 ejes (K74).
- El único vehículo que en promedio sobrepasa el límite legal de peso por eje establecido en Chile, es el bus K74 con una valor de 22 toneladas para su eje trasero. Para niveles de carga alta (percentil 85) los vehículos que no sobrepasan el peso limite son solo dos.

Con la combinación de las variables: largo de losa, espesor de pavimento, tipo de configuración y niveles de carga por eje, se creó la matriz de escenarios, que identifica características de la región, para modelar cada eje en el software EverFe 2.24

Se calculó el FC en base a la matriz de escenarios, a través de un enfoque M-E obteniendo los siguientes resultados.

- El nivel de daño no depende directamente de la carga transportada, sino de una combinación carga-configuración de eje, por ejemplo el camión K8 que posee una carga media de 42 toneladas con un FC promedio igual a 1,4 genera menor daño que el K10 que posee una carga media de 38 tonelada con un FC promedio de 3,5. La clave del vehículo K8 es su ETRD el cual puede distribuir en mayor área las cargas de gran tonelaje, y así generar menor tensión en el pavimento.

- Los vehículos que generan mayor daño en los pavimentos de hormigón son los vehículos K10 y el K73 debido su configuración de ejes utilizado para el gran tonelaje de carga transportado. Los FC son 3,5 y 3,4 respectivamente para una carga media, un espesor y largo medio de losa.
- La configuración de carga que entrega menor daño al pavimento es el K1 (C2E) con un FC promedio de 0,6 para un nivel de carga medio. Esto se debió a su limitada capacidad de carga y al bajo tonelaje encontrado en las vías de la región.

Los FC también se compararon con los obtenidos mediante el método empírico AASHTO y con los propuestos por el Manual de Carreteras, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Los FC obtenidos con el método M-E son más conservadores respecto de los obtenidos con el método AASHTO salvo en las configuraciones K8 y K10. Se consideran conservadores ya que entregan valores más altos por lo que los espesores de pavimentos calculados serían mayores.
- Los valores de FC calculados con el método M-E son menores a los propuestos por el MOP en el MCV3, salvo para configuraciones de camiones múltiples con remolque.

Finalmente, se recomienda para investigaciones futura lo siguiente:

- Evaluar en términos económicos el impacto que tendría en el diseño, construcción y mantenimiento, el uso de los valores de FC propuestos en este trabajo.
- Ampliar la base de datos de carga para una investigación futura en esta misma línea.
- Ampliar este estudio a pavimentos asfálticos.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos

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.

Chatti, K., Manik, A., Brake, N(2008) Effect of Axle configurations on fatigue and faulting of concrete pavements. 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology. Paris, Francia. pp. 117-126

Crasprowitz, L (2010). Determinación de factores camión para el diseño de pavimentos flexibles en Guatemala. Proyecto de título. Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Davids, B. (2003). EverFe Theory Manual. University of Maine. Estados Unidos.

Díaz, R., Echaveguren, T., Vargas, T. (2011). Camiones de alto tonelaje y su impacto en el ciclo de vida de pavimentos asfálticos. Revista de la construcción, 11(2), 101-118.

Garnica, P., Correa, A. (2004). Conceptos mecanicistas en pavimentos. Publicación técnica n°258. Instituto Mexicano del Transporte.

Gillespie, T., Karamihas, S., Cebon, D., Sayers, M., Hansen, W., y Ehsan, N. (1993). Effects of heavy-vehicle characteristics on pavement response and performance. NCHRP Report 353, Transportation Research Board. Estados Unidos.

Macea, L., Fuentes, L., Álvarez, A. (2012). Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. Revista Facultad de ingeniería (Universidad de Antioquia), 66, 57-59.

Minvu (2008). Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación. Publicación técnica n°332. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

MOP (1980). Peso máximo de vehículos que pueden circular por caminos públicos. Decreto Supremo 158/10980. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

MOP (2011). Departamento de Estadísticas y Censos de Tránsito. Dirección de vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile .

MOP (2013a) Manual de Carreteras Volumen N°3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile

MOP (2013b) Manual de Carreteras Volumen N°5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Navarrete, P. (2008). Variables de entrada al proceso de diseño de pavimentos rígidos utilizando metodos mecanicistas. Memoria de título Ingeniero Civil, Universidad del Salvador. San Salvador.

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.

Ulloa, A., Allen, J., Badilla, G. (2007). Determinación de Factor Camión en Pavimentos de Costa Rica, Revista Infraestructura Vial (Universidad de Costa Rica), 19, 28-37.

Zaman, M., Chen, D., Laguros, J. (1994). Resilient Moduli of Granular Materials. Journal of Transportation Engineering. 120(6), 967-988

Zhang, J., Li, V. (2001) Influence of Supporting Base Characteristics On Shrinkage-Induced Stresses in Concrete Pavements, Journal of Transportation Engineering Vol .127,N°6 November/December, 2001.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Información censo EOD	31
ANEXO B. Caracterización de pesos por cada Vehículo seleccionado.....	34
ANEXO C. FC en base a método empírico AASHTO.....	37
ANEXO D. Estados tensionales en base a método mecanicista-empírico	39
ANEXO E. Resultados finales método mecanicista-empírico	49
ANEXO F. Análisis comparativos	51

ANEXOS

ANEXO A

Información Censo EOD

TABLA A.1

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Quinta Norte-Sur durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Quinta Norte-Sur)																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	103	33	3	10	8	18	38	100	24	41	13	6	13	14	19	20	10	4	154	63	13	2	0
2009	62	35	2	11	9	17	54	52	16	20	1	3	34	18	5	13	15	1	75	41	16	2	0
2011	96	35	4	15	7	17	87	53	11	28	14	52	30	17	8	5	22	1	83	57	42	3	1

TABLA A.2

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Quinta Sur-Norte durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Quinta Sur-Norte)																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	144	39	6	10	7	20	76	106	25	58	7	16	54	16	13	21	8	5	134	45	9	8	0
2009	88	27	3	12	11	11	68	58	8	28	7	4	30	28	7	9	21	1	86	38	16	5	0
2011	89	26	7	10	5	18	88	59	20	46	7	7	14	12	6	4	16	1	46	35	51	2	1

TABLA A.3

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Chaimávida Bulnes-Concep. durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Chaimávida Bulnes-Concep)																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	64	16	2	5	4	11	41	61	8	36	1	4	50	8	3	4	17	2	42	4	0	1	1
2009	65	10	2	3	4	11	50	64	10	45	3	1	48	20	5	1	16	2	56	4	1	0	0
2011	58	9	3	7	5	6	54	52	13	26	2	4	39	16	13	8	19	3	45	8	1	0	3

TABLA A.4

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Chaimávida Concep-Bulnes. durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Chaimávida Concep-Bulnes)																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	20	91
2007	60	9	2	8	7	23	42	61	26	27	4	16	32	6	6	2	16	3	52	3	1	1	0	1
2009	60	23	1	7	3	10	63	53	8	26	15	17	31	6	1	0	13	2	51	5	1	1	0	1
2011	71	23	6	14	8	19	91	77	14	22	8	3	15	11	3	2	11	3	39	5	2	0	0	0

TABLA A.5

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Chillán Norte-Sur durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Chillán Norte-Sur)																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	60	24	3	11	5	14	32	49	18	53	3	14	21	22	4	4	17	1	42	28	8	4	1
2009	44	13	3	7	1	8	26	50	5	18	3	9	10	5	3	3	12	2	21	11	14	1	1
2011	41	18	2	4	4	4	46	32	6	20	1	2	6	11	2	5	9	2	17	19	6	0	0

TABLA A.6

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Chillán Sur-Norte durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Chillán Sur-Norte)																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	73	34	3	12	6	36	85	93	20	56	2	6	14	24	4	13	9	1	50	38	7	5	0
2009	36	9	2	6	3	3	12	30	5	16	1	0	8	6	5	3	5	1	27	14	6	3	1
2011	32	24	2	5	4	18	51	54	6	14	5	5	4	5	2	10	7	3	33	8	10	1	0

TABLA A.7

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Quepe Norte-Sur durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	86	42	7	21	10	13	77	191	24	31	11	13	32	17	14	19	20	1	68	58	10	1	1
2009	156	47	8	23	12	28	179	119	19	72	31	25	148	71	20	25	37	2	145	47	13	5	2
2011	103	52	9	17	8	28	148	84	9	36	14	10	41	21	17	20	29	8	109	28	7	4	2

TABLA A.8

Recopilación pasadas diarias por vehículo, estación Quepe Sur-Norte durante 2007-2009-2011.

Año	Categoría Vehicular(Quepe Sur-Norte)																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	71	72	73	74	75	76	91
2007	104	34	10	30	11	22	182	97	27	50	9	9	16	11	4	3	19	4	74	62	4	4	1
2009	132	35	5	13	10	20	138	75	16	66	12	6	29	26	18	11	33	6	95	33	17	4	3
2011	141	40	4	11	12	13	101	93	15	74	4	9	25	17	7	24	52	8	99	30	20	3	5

ANEXO B

Caracterización de pesos por cada Vehículo seleccionado

En el siguiente anexo se presentan distribuciones de carga por eje para cada vehículo seleccionado, los niveles de carga son bajo-medio-alto (P15- P50-P85 respectivamente)


K1			
P15	2,87	3,06	
P50	4,45	6,10	
P85	6,20	9,91	

Figura B1: Distribución de carga por nivel para camión de 2 ejes


K2			
P15	5,52	8,05	
P50	6,30	13,39	
P85	7,03	19,41	

Figura B2: Distribución de carga por nivel para camión de 3 ejes


K7				
P15	4,82	6,21	5,32	
P50	5,65	9,48	9,17	
P85	6,70	12,66	13,80	

Figura B3: Distribución de carga por nivel para tractocamion+semiremolque


K8				
P15	5,14	9,64	9,97	
P50	5,96	15,45	20,37	
P85	6,72	19,85	27,74	

Figura B4: Distribución de carga por nivel para tractocamion+semiremolque


K10				
P15	5,79	10,19	4,83	4,75
P50	6,58	15,81	7,87	7,72
P85	7,22	21,06	10,77	10,84

Figura B5: Distribución de carga por nivel para camión de 3 ejes + remolque


K13				
P15	5,16	4,32	2,42	4,20
P50	6,24	8,06	7,31	13,00
P85	7,11	11,03	10,89	19,89

Figura B6: Distribución de carga por nivel para camión de 2 ejes + remolque


K73		
P15	6,13	7,90
P50	6,66	9,82
P85	7,27	11,75

Figura B7: Distribución de carga por nivel para bus de 2 ejes


K74		
P15	6,20	17,52
P50	6,63	21,83
P85	7,14	25,25

Figura B8: Distribución de carga por nivel para bus de 3 ejes

ANEXO C

FC en base a método empírico AASHTO

En el siguiente anexo se adjunta información con detalle sobre todos los resultados de FC en base a el enfoque empírico AASHTO y según una serviciabilidad final de 2 y 2.5.

Tabla D1: FC método AASHTO para PSI final 2 y 2,5

		FC PSI final 2,0					FC PSI final 2,5		
		P15	P50	P85			P15	P50	P85
K1	B	0,0282	0,3620	2,6270	K1	B	0,0287	0,3623	2,6269
	M	0,0288	0,3624	2,6269		M	0,0302	0,3633	2,6266
	A	0,0299	0,3633	2,6266		A	0,0328	0,3652	2,6261
K2	B	0,3051	1,3831	5,8800	K2	B	0,3054	1,3832	5,8794
	M	0,3056	1,3833	5,8792		M	0,3064	1,3835	5,8775
	A	0,3064	1,3835	5,8775		A	0,3083	1,3841	5,8738
K7	B	0,1666	0,6531	2,4635	K7	B	0,1672	0,6535	2,4636
	M	0,1674	0,6536	2,4636		M	0,1690	0,6547	2,4638
	A	0,1689	0,6547	2,4638		A	0,1724	0,6572	2,4642
K8	B	0,4952	4,2182	13,9486	K8	B	0,4957	4,2180	13,9468
	M	0,4958	4,2179	13,9462		M	0,4970	4,2173	13,9416
	A	0,4970	4,2173	13,9416		A	0,4997	4,2160	13,9312
K10	B	0,7624	4,2306	15,2903	K10	B	0,7631	4,2305	15,2885
	M	0,7633	4,2305	15,2878		M	0,7650	4,2304	15,2830
	A	0,7649	4,2304	15,2831		A	0,7686	4,2302	15,2724
K13	B	0,2215	2,7788	13,8811	K13	B	0,2224	2,7790	13,8795
	M	0,2226	2,7791	13,8789		M	0,2250	2,7796	13,8747
	A	0,2246	2,7796	13,8747		A	0,2296	2,7808	13,8653
K73	B	1,1758	2,6198	5,5260	K73	B	1,1759	2,6197	5,5254
	M	1,1760	2,6196	5,5252		M	1,1764	2,6194	5,5238
	A	1,1764	2,6194	5,5238		A	1,1773	2,6189	5,5205
K74	B	0,8235	2,2474	4,5749	K74	B	0,8237	2,2474	4,5745
	M	0,8238	2,2474	4,5744		M	0,8243	2,2472	4,5732
	A	0,8243	2,2472	4,5732		A	0,8255	2,2470	4,5708

Fuente: Elaboración propia

ANEXO D

Estados tensionales en base a método mecanicista-empírico

Como se explicó en el informe general de esta investigación, las modelaciones de los distintos escenarios de la Región propuestos en la Tabla 6, fueron realizadas en el software computacional de elementos finitos EverFe 2.24. La metodología llevada a cabo para la obtención de los estados tensionales se explica a través de un ejemplo explicativo:

El primer paso que se realizó fue designar la geometría de la losa, de la base y subrasante, y también la posición de la carga. Como se explicó en el informe las modelaciones se realizaron de un eje por losa, por lo tanto en cada modelación se ubicó cada eje en el centro de la losa, que es el lugar menos resistente donde se provocan mayores tensiones, y se produce la falla por borde. En la Figura E1 se muestra la imagen correspondiente a lugar donde se establece la geometría.

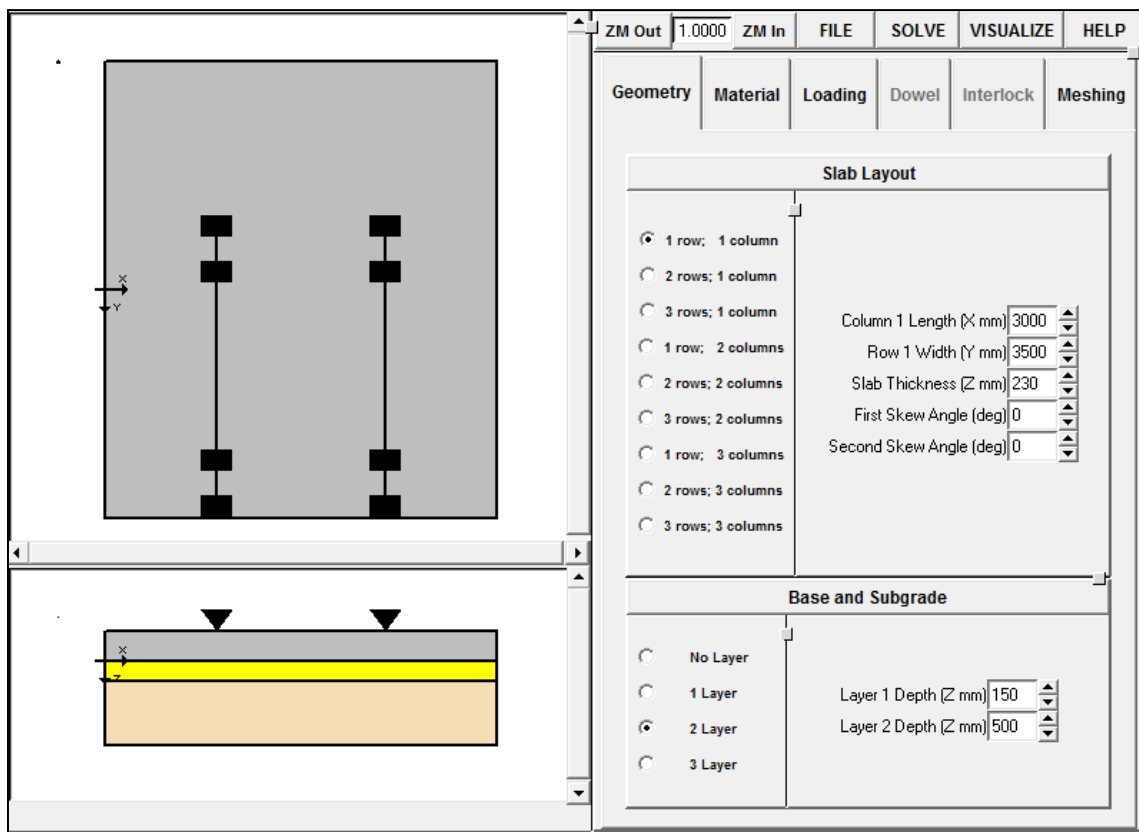


Figura E1: Determinación de geometría de la losa, base y subrasante

En la Figura E1, se pueden distinguir los siguientes valores.

- Largo de losa (mm): 3000
- Ancho de losa (mm): 3500
- Espesor de losa (mm): 230

- Espesor base (mm): 150
- Espesor Subrasante (mm): 500, este valor no influye en el análisis por que es el suelo de fundación que se considera con las mismas características en profundidad.

El segundo paso de la modelación tiene que ver con las características físicas y mecánicas de los materiales como la losa, base y de la subrasante. Así como lo muestra la Figura E2.

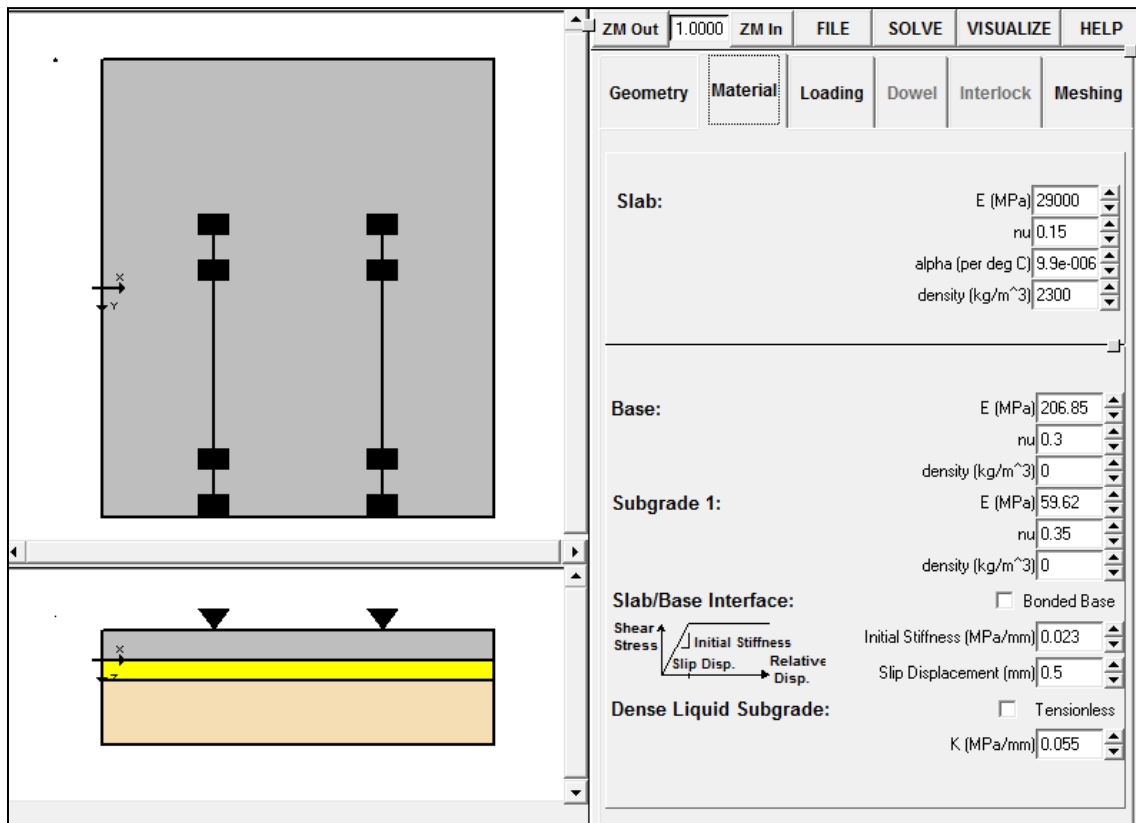


Figura E2. Materialidad de las estructura de pavimento

Como se muestra en la Figura E2, se ingresa el modulo de elasticidad, modulo de poisson, densidades, modulo de expansión térmica de la losa y los valores de rigidez inicial y desplazamiento del deslizamiento, estas dos últimas variables tienen que ver con la interacción producida entre la losa-base en donde se usaron valores recomendados por (Zhang y Li, 2001) para una losa de hormigón y una base granular. Además se ingresa el parámetro K de la subrasante.

Después de definir la geometría y los materiales de la estructura, se ingresaron las dimensiones de los ejes que se están modelando como: Distancia entre ruedas (A y B), separación entre ejes (S) y el área de contacto del neumático-pavimento a través de el ancho y largo del neumático (W

y L respectivamente). Para establecer los valores W y L se utilizó las disposiciones propuestas en el punto 15.4.6 del código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación Minvu (2008). También se ingresa la carga por eje completo, para este ejemplo se utilizó 207 Kn que corresponden a 21 toneladas de carga del EDRD, los valores de X e Y son las coordenadas de ubicación del eje. Todos los valores se muestran en la Figura

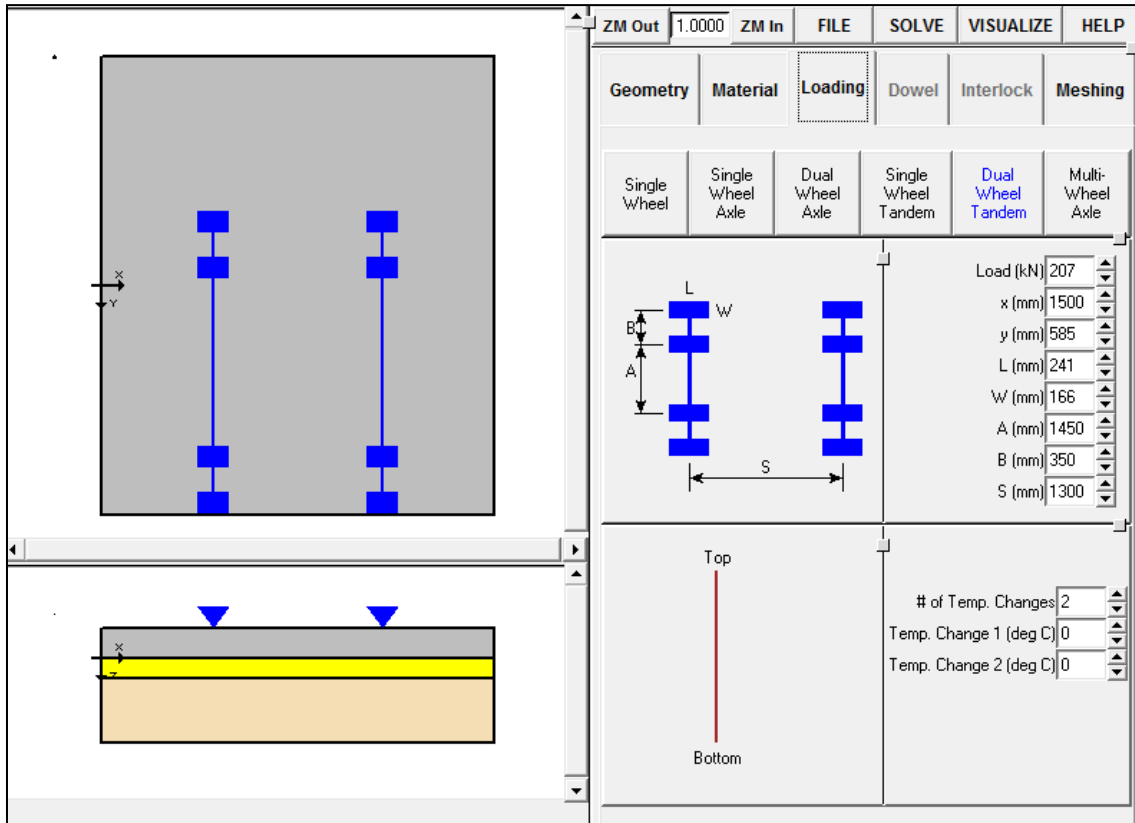


Figura E3. Dimensiones y cargas de eje analizado

En la parte inferior de la Figura E3, se indica el gradiente de temperatura al cual está sometido la losa de pavimento, en este caso los valores son cero ya que no existen grandes cambios de temperatura en la Región del Bío-Bío

Ya que no se trabajó con barras de traspaso de carga estas no se definen. El siguiente paso es definir el mallado de análisis para la determinación de tensiones. Se definió un mallado de 12x12 en el eje X,Y , 3 líneas de análisis en profundidad en la losa, 2 líneas de análisis en la base y una en la subrasante como lo muestra la Figura E4.

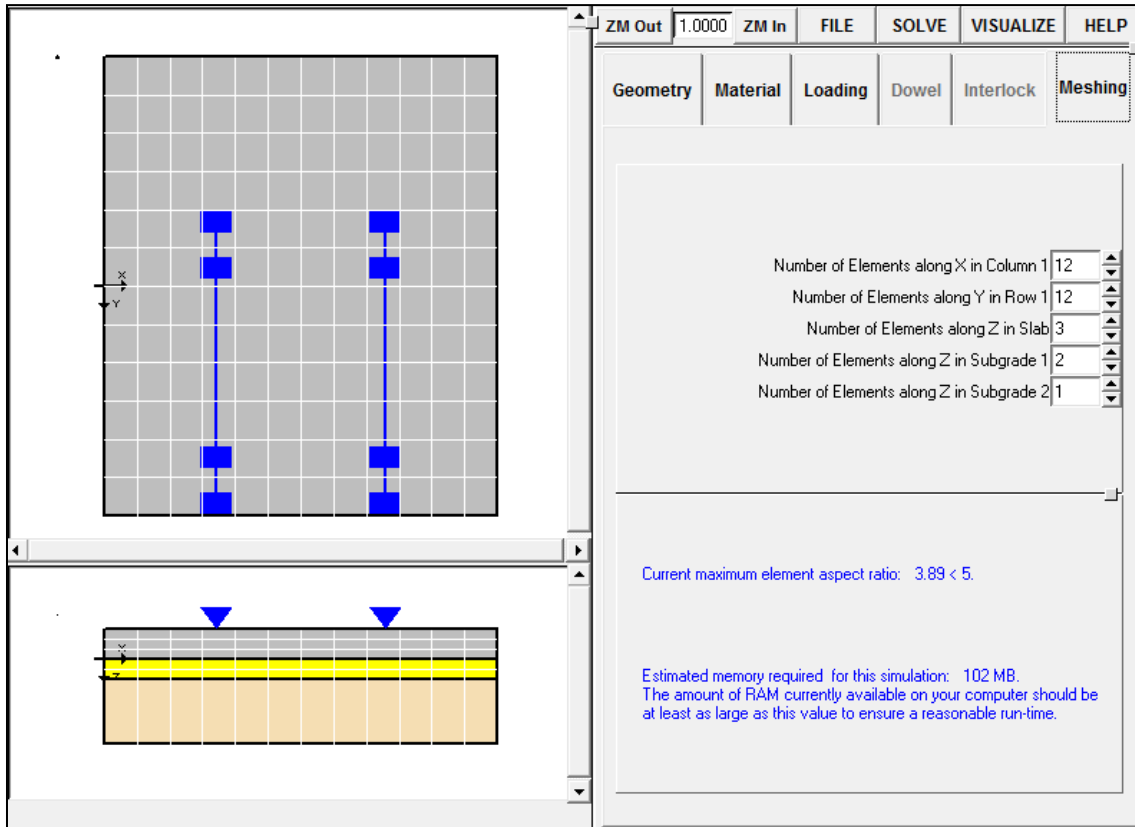


Figura E4. Mallado de análisis estructura de pavimento

Una vez que se ingresaron todas las variables mencionadas anteriormente se procede a correr el programa, el cual después de unos minutos permite visualizar en 3D y de manera interactiva los resultados de esfuerzos, desplazamientos y los resultados de tensión en cualquier parte de la losa. Para el caso de las tensiones se pueden visualizar en el plano YZ, XZ, XY las principales tensiones máximas y mínimas a escalas globales o locales. En la Figura E5, se muestra el estado tensional de la superficie del pavimento provocadas por el EDRD, se puede apreciar en color rojo la tracción y en azul la compresión.

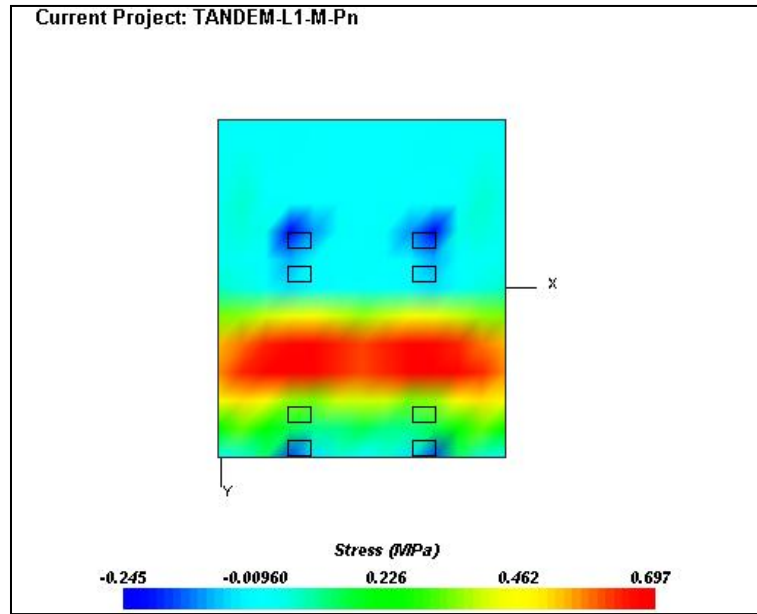


Figura E5. Tensiones principales superficie de pavimento

En la Figura E5, se puede ver de manera clara la tracción (rojo) producida en el centro del eje, esta se produce por la inclinación del mismo hacia el borde, también se puede apreciar la compresión (azul) causada por el peso de las ruedas. En la Figura E6 se puede apreciar el completo estado tensional de la capa inferior del pavimento, en donde se piensa ocurrirá la primera grieta y como es claro la tracción es mayor que la cara superior.

Current Project: TANDEM-L1-M-Pn

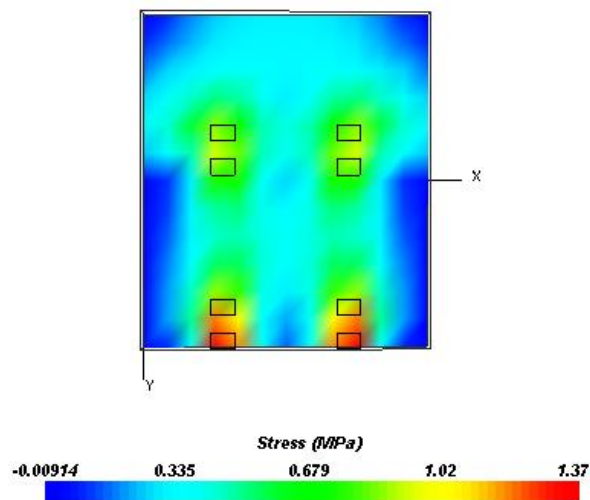


Figura E6. Tensiones principales capa inferior de pavimento

En la Figura E6 se produce una tracción de 1,37 Mpa en el borde justamente debajo del rodado respectivo, ese es el valor que se utilizó en el análisis posterior para estimar la vida de fatiga del material.

El software además entrega las deformaciones del pavimento, las cuales comprueban finalmente los estados tensionales producidos en la misma, así lo muestra la Figura E7.

Current Project: TANDEM-L1-M-Pn

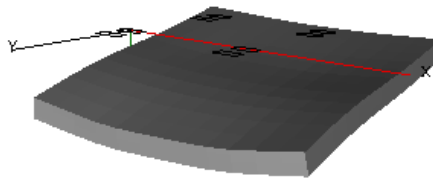


Figura E7. Deformaciones estructura de pavimento

Claramente en la Figura E7 se puede ver de manera amplificada la deformación que tendrá la losa con el paso del EDRD, en donde se flexa hacia el borde y además en centro de la misma.

En las tablas siguientes se definen estados tensionales producidos en el pavimento, cada cuadro de las tablas representa cada combinación de la matriz de escenarios (Tabla 6) **TABLA E1. Estados Tensionales Vehículos K1,K2,K7 (Mpa)**

		L1			L2			L3		
		P15	Prom	P85	P15	Prom	P85	P15	Prom	P85
K1	B	ESRS 1,343	ESRS 2,018	ESRS 2,690	ESRS 1,326	ESRS 2,000	ESRS 2,678	ESRS 1,268	ESRS 1,920	ESRS 2,618
		ESRD 0,999	ESRD 1,915	ESRD 2,988	ESRD 1,003	ESRD 1,931	ESRD 3,021	ESRD 0,966	ESRD 1,867	ESRD 2,927
	M	ESRS 0,859	ESRS 1,295	ESRS 1,734	ESRS 0,884	ESRS 1,339	ESRS 1,800	ESRS 0,861	ESRS 1,308	ESRS 1,762
		ESRD 0,664	ESRD 1,274	ESRD 1,992	ESRD 0,701	ESRD 1,350	ESRD 2,119	ESRD 0,689	ESRD 1,333	ESRD 2,096
	A	ESRS 0,583	ESRS 0,881	ESRS 1,183	ESRS 0,623	ESRS 0,945	ESRS 1,273	ESRS 0,623	ESRS 0,948	ESRS 1,281
		ESRD 0,465	ESRD 0,891	ESRD 1,395	ESRD 0,512	ESRD 0,985	ESRD 1,547	ESRD 0,519	ESRD 1,002	ESRD 1,579
K2	B	ESRS 2,575	ESRS: 2,836	ESRS: 3,041	ESRS: 2,547	ESRS: 2,815	ESRS: 3,028	ESRS: 2,441	ESRS: 2,703	ESRS: 2,913
		EDRD 0,855	EDRD 1,366	EDRD 1,912	EDRD 1,124	EDRD 1,791	EDRD 2,507	EDRD 1,111	EDRD 1,777	EDRD 2,493
	M	ESRS: 1,641	ESRS: 1,818	ESRS: 1,959	ESRS: 1,692	ESRS: 1,881	ESRS: 2,034	ESRS: 1,652	ESRS: 1,840	ESRS: 1,992
		EDRD 0,562	EDRD 0,896	EDRD 1,256	EDRD 0,793	EDRD 1,268	EDRD 1,782	EDRD 0,822	EDRD 1,318	EDRD 1,858
	A	ESRS: 1,110	ESRS: 1,235	ESRS: 1,336	ESRS: 1,187	ESRS: 1,325	ESRS: 1,438	ESRS: 1,191	ESRS: 1,332	ESRS: 1,447
		EDRD 0,392	EDRD 0,625	EDRD 0,876	EDRD 0,583	EDRD 0,933	EDRD 1,315	EDRD 0,637	EDRD 1,025	EDRD 1,451
K7	B	ESRS 2,243	ESRS 2,518	ESRS 2,910	ESRS 2,218	ESRS 2,498	ESRS 2,897	ESRS 2,125	ESRS 2,398	ESRS 2,786
		EDRD 0,663	EDRD 0,974	EDRD 1,253	EDRD 0,871	EDRD 1,275	EDRD 1,641	EDRD 0,861	EDRD 1,264	EDRD 1,630
		EDRD 0,568	EDRD 0,943	EDRD 1,363	EDRD 0,744	EDRD 1,234	EDRD 1,785	EDRD 0,735	EDRD 1,224	EDRD 1,774
	M	ESRS 1,430	ESRS 1,615	ESRS 1,875	ESRS 1,475	ESRS 1,670	ESRS 1,946	ESRS 1,439	ESRS 1,633	ESRS 1,906
		EDRD 0,437	EDRD 0,640	EDRD 0,824	EDRD 0,616	EDRD 0,904	EDRD 1,168	EDRD 0,637	EDRD 0,939	EDRD 1,216
		EDRD 0,374	EDRD 0,620	EDRD 0,896	EDRD 0,527	EDRD 0,876	EDRD 1,271	EDRD 0,545	EDRD 0,909	EDRD 1,323
	A	ESRS 0,968	ESRS 1,097	ESRS 1,279	ESRS 1,035	ESRS 1,177	ESRS 1,376	ESRS 1,038	ESRS 1,183	ESRS 1,385
		EDRD 0,306	EDRD 0,447	EDRD 0,576	EDRD 0,454	EDRD 0,667	EDRD 0,863	EDRD 0,495	EDRD 0,731	EDRD 0,951
		EDRD 0,262	EDRD 0,433	EDRD 0,626	EDRD 0,389	EDRD 0,646	EDRD 0,939	EDRD 0,423	EDRD 0,708	EDRD 1,035

TABLA E2. Estados Tensionales Vehículos K8 y K10 (Mpa)

		L1			L2			L3		
		P15	Prom	P85	P15	Prom	P85	P15	Prom	P85
K8	B	ESRS: 2,385	ESRS 2,654	ESRS 2,910	ESRS 2,359	ESRS 2,634	ESRS 2,897	ESRS 2,260	ESRS 2,529	ESRS 2,786
		EDRD 1,025	EDRD 1,583	EDRD 1,962	EDRD 1,349	EDRD 2,076	EDRD 2,573	EDRD 1,336	EDRD 2,061	EDRD 2,558
		ETRD 0,497	ETRD 0,994	ETRD 1,350	ETRD 0,671	ETRD 1,303	ETRD 1,707	ETRD 0,831	ETRD 1,612	ETRD 2,110
	M	ESRS 1,520	ESRS 1,702	ESRS 1,875	ESRS 1,568	ESRS 1,761	ESRS 1,946	ESRS 1,530	ESRS 1,722	ESRS 1,906
		EDRD 0,673	EDRD 1,038	EDRD 1,289	EDRD 0,951	EDRD 1,468	EDRD 1,829	EDRD 0,986	EDRD 1,527	EDRD 1,906
		ETRD 0,319	ETRD 0,634	ETRD 0,857	ETRD 0,444	ETRD 0,852	ETRD 1,110	ETRD 0,582	ETRD 1,131	ETRD 1,486
	A	ESRS 1,029	ESRS 1,156	ESRS 1,279	ESRS 1,100	ESRS 1,241	ESRS 1,376	ESRS 1,103	ESRS 1,246	ESRS 1,385
		EDRD 0,469	EDRD 0,723	EDRD 0,899	EDRD 0,698	EDRD 1,080	EDRD 1,349	EDRD 0,763	EDRD 1,188	EDRD 1,489
		ETRD 0,224	ETRD 0,440	ETRD 0,594	ETRD 0,326	ETRD 0,623	ETRD 0,838	ETRD 0,453	ETRD 0,885	ETRD 1,170
K10	B	ESRS: 2,717	ESRS: 2,973	ESRS: 3,129	ESRS: 2,688	ESRS: 2,951	ESRS: 3,116	ESRS: 2,576	ESRS: 2,834	ESRS: 2,997
		EDRD 1,079	EDRD 1,614	EDRD 2,082	EDRD 1,419	EDRD 2,116	EDRD 2,730	EDRD 1,406	EDRD 2,101	EDRD 2,715
		ESRD: 1,557	ESRD: 2,454	ESRD: 3,264	ESRD: 1,565	ESRD: 2,475	ESRD: 3,301	ESRD: 1,511	ESRD: 2,395	ESRD: 3,198
		ESRD: 1,557	ESRD: 2,422	ESRD: 3,264	ESRD: 1,565	ESRD: 2,443	ESRD: 3,301	ESRD: 1,511	ESRD: 2,363	ESRD: 3,198
	M	ESRS: 1,731	ESRS: 1,905	ESRS: 2,015	ESRS: 1,785	ESRS: 1,972	ESRS: 2,092	ESRS: 1,743	ESRS: 1,928	ESRS: 2,049
		EDRD 0,707	EDRD 1,058	EDRD 1,367	EDRD 1,000	EDRD 1,497	EDRD 1,940	EDRD 1,037	EDRD 1,557	EDRD 2,023
		ESRD: 1,032	ESRD: 1,630	ESRD: 2,176	ESRD: 1,090	ESRD: 1,729	ESRD: 2,315	ESRD: 1,074	ESRD: 1,708	ESRD: 2,290
		ESRD: 1,032	ESRD: 1,609	ESRD: 2,176	ESRD: 1,090	ESRD: 1,707	ESRD: 2,315	ESRD: 1,074	ESRD: 1,686	ESRD: 2,290
	A	ESRS: 1,171	ESRS: 1,294	ESRS: 1,374	ESRS: 1,252	ESRS: 1,389	ESRS: 1,479	ESRS: 1,256	ESRS: 1,395	ESRS: 1,489
		EDRD 0,493	EDRD 0,737	EDRD 0,953	EDRD 0,734	EDRD 1,101	EDRD 1,431	EDRD 0,803	EDRD 1,211	EDRD 1,580
		ESRD: 0,720	ESRD: 1,139	ESRD: 1,523	ESRD: 0,793	ESRD: 1,259	ESRD: 1,689	ESRD: 0,806	ESRD: 1,283	ESRD: 1,724
		ESRD: 0,720	ESRD: 1,125	ESRD: 1,523	ESRD: 0,793	ESRD: 1,243	ESRD: 1,689	ESRD: 0,806	ESRD: 1,267	ESRD: 1,724

TABLA E3. Estados Tensionales Vehículos K13, K73 y K74 (Mpa)

		L1			L2			L3		
		P15	Prom	P85	P15	Prom	P85	P15	Prom	P85
K13	B	ESRS: 2,433	ESRS: 2,791	ESRS: 3,085	ESRS: 2,406	ESRS: 2,770	ESRS: 3,072	ESRS: 2,305	ESRS: 2,660	ESRS: 2,955
		ESRD: 1,393	ESRD: 2,485	ESRD: 3,325	ESRD: 1,399	ESRD: 2,507	ESRD: 3,363	ESRD: 1,351	ESRD: 2,426	ESRD: 3,258
		ESRD: 0,803	ESRD: 2,295	ESRD: 3,295	ESRD: 0,804	ESRD: 2,315	ESRD: 3,332	ESRD: 0,774	ESRD: 2,239	ESRD: 3,228
		ETRD 0,451	ETRD 1,335	ETRD 1,962	ETRD 0,589	ETRD 1,750	ETRD 2,573	ETRD 0,581	ETRD 1,737	ETRD 2,558
	M	ESRS: 1,550	ESRS: 1,789	ESRS: 1,987	ESRS: 1,599	ESRS: 1,851	ESRS: 2,063	ESRS: 1,561	ESRS: 1,810	ESRS: 2,021
		ESRD: 0,924	ESRD: 1,651	ESRD: 2,217	ESRD: 0,976	ESRD: 1,751	ESRD: 2,358	ESRD: 0,961	ESRD: 1,730	ESRD: 2,333
		ESRD: 0,535	ESRD: 1,526	ESRD: 2,196	ESRD: 0,564	ESRD: 1,618	ESRD: 2,336	ESRD: 0,553	ESRD: 1,598	ESRD: 2,312
		ETRD 0,298	ETRD 0,876	ETRD 1,289	ETRD 0,419	ETRD 1,239	ETRD 1,829	ETRD 0,432	ETRD 1,288	ETRD 1,906
	A	ESRS: 1,049	ESRS: 1,215	ESRS: 1,355	ESRS: 1,122	ESRS: 1,304	ESRS: 1,459	ESRS: 1,125	ESRS: 1,310	ESRS: 1,468
		ESRD: 0,645	ESRD: 1,154	ESRD: 1,552	ESRD: 0,711	ESRD: 1,275	ESRD: 1,721	ESRD: 0,721	ESRD: 1,300	ESRD: 1,757
		ESRD: 0,375	ESRD: 1,066	ESRD: 1,538	ESRD: 0,413	ESRD: 1,178	ESRD: 1,705	ESRD: 0,417	ESRD: 1,200	ESRD: 1,740
		ETRD 0,209	ETRD 0,611	ETRD 0,899	ETRD 0,310	ETRD 0,912	ETRD 1,349	ETRD 0,336	ETRD 1,002	ETRD 1,489
K73	B	ESRS: 2,859	ESRS: 2,973	ESRS: 3,129	ESRS: 2,829	ESRS: 2,951	ESRS: 3,116	ESRS: 2,711	ESRS: 2,834	ESRS: 2,997
		ESRD: 2,573	ESRD: 3,055	ESRD: 3,540	ESRD: 2,590	ESRD: 3,083	ESRD: 3,580	ESRD: 2,505	ESRD: 2,984	ESRD: 3,469
	M	ESRS: 1,821	ESRS: 1,905	ESRS: 2,015	ESRS: 1,879	ESRS: 1,972	ESRS: 2,092	ESRS: 1,835	ESRS: 1,928	ESRS: 2,049
		ESRD: 1,702	ESRD: 2,029	ESRD: 2,359	ESRD: 1,800	ESRD: 2,152	ESRD: 2,510	ESRD: 1,777	ESRD: 2,127	ESRD: 2,484
	A	ESRS: 1,231	ESRS: 1,294	ESRS: 1,374	ESRS: 1,317	ESRS: 1,389	ESRS: 1,479	ESRS: 1,322	ESRS: 1,395	ESRS: 1,489
		ESRD: 1,185	ESRD: 1,417	ESRD: 1,651	ESRD: 1,306	ESRD: 1,566	ESRD: 1,831	ESRD: 1,330	ESRD: 1,597	ESRD: 1,870
K74	B	ESRS: 2,906	ESRS: 2,973	ESRS: 3,085	ESRS: 2,876	ESRS: 2,951	ESRS: 3,072	ESRS: 2,757	ESRS: 2,834	ESRS: 2,955
		EJE 74 1,528	EJE 74 1,950	EJE 74 2,400	EJE 74 1,964	EJE 74: 2,528	EJE 74 3,131	EJE 74 1,909	EJE 74 2,472	EJE 74 3,052
	M	ESRS: 1,851	ESRS: 1,905	ESRS: 1,987	ESRS: 1,910	ESRS: 1,972	ESRS: 2,063	ESRS: 1,865	ESRS: 1,928	ESRS: 2,021
		EJE 74 0,973	EJE 74 1,277	EJE 74 1,574	EJE 74 1,322	EJE 74: 1,767	EJE 74 2,183	EJE 74 1,341	EJE 74 1,827	EJE 74 2,254
	A	ESRS: 1,252	ESRS: 1,294	ESRS: 1,355	ESRS: 1,339	ESRS: 1,389	ESRS: 1,459	ESRS: 1,344	ESRS: 1,395	ESRS: 1,468
		EJE 74 0,660	EJE 74 0,889	EJE 74 1,097	EJE 74 0,938	EJE 74: 1,289	EJE 74 1,589	EJE 74 0,998	EJE 74 1,410	EJE 74 1,736

ANEXO E

Resultados finales método mecanicista-empírico

En el siguiente anexo se presentan valores finales de FC calculados a través del modelo mecanicista-empírico con respecto al modelo de fatiga, Majid Zadeh y Ilives con PSI final 2.0. Las tabla tiene el mismo formato que la matriz de escenarios Tabla 7, ya que los valores de cada cuadro representan los resultados de cada combinación de variables de entrada al proceso M-E

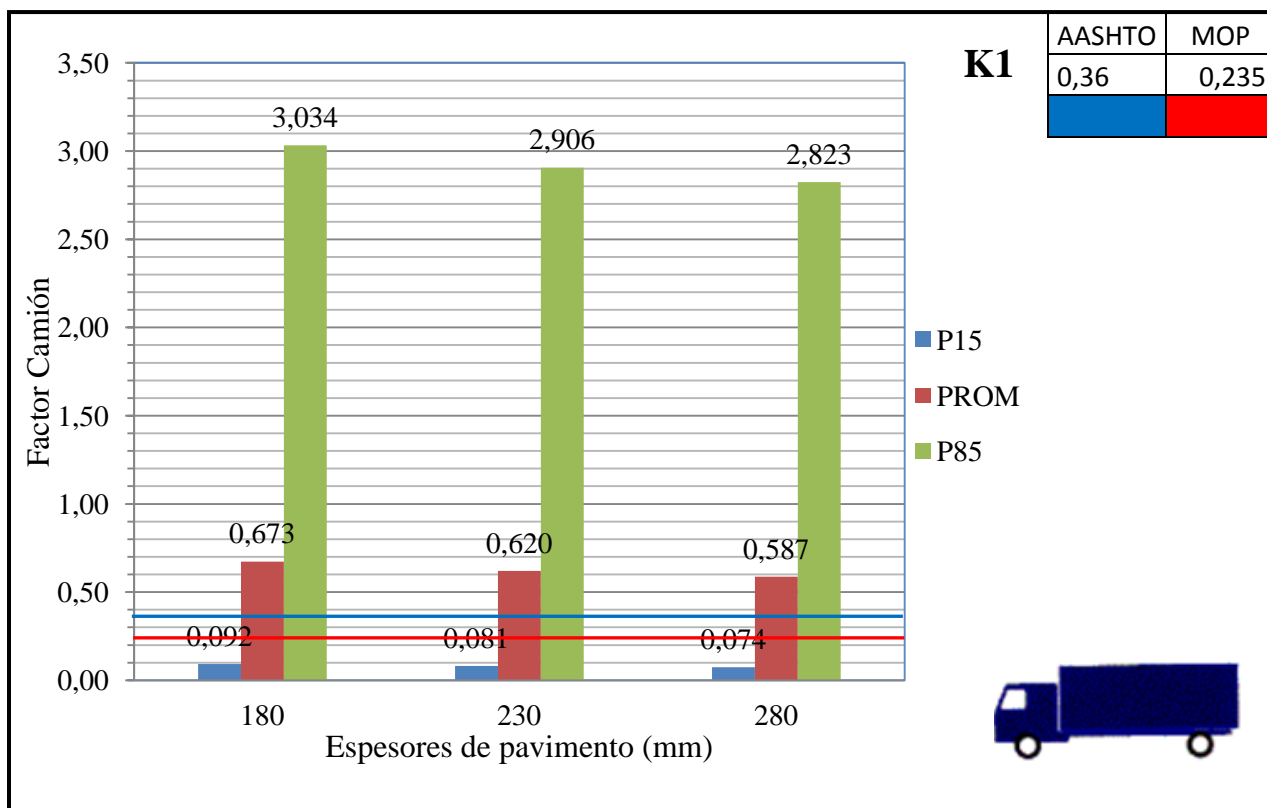
TABLA F1: FC con Modelo Majid Zadeh y Ilives

		L1			L2			L3		
		P1	prom	P3	P1	Prom	P3	P1	prom	P3
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	2,87764
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	2,46170	4,57036

ANEXO F

Análisis comparativos

En el siguiente anexo se presentan los análisis comparativos en forma de figura (gráficos), según los 3 métodos de obtención del FC, para todas las configuraciones de vehículos pesados.



Fuente: Elaboración propia

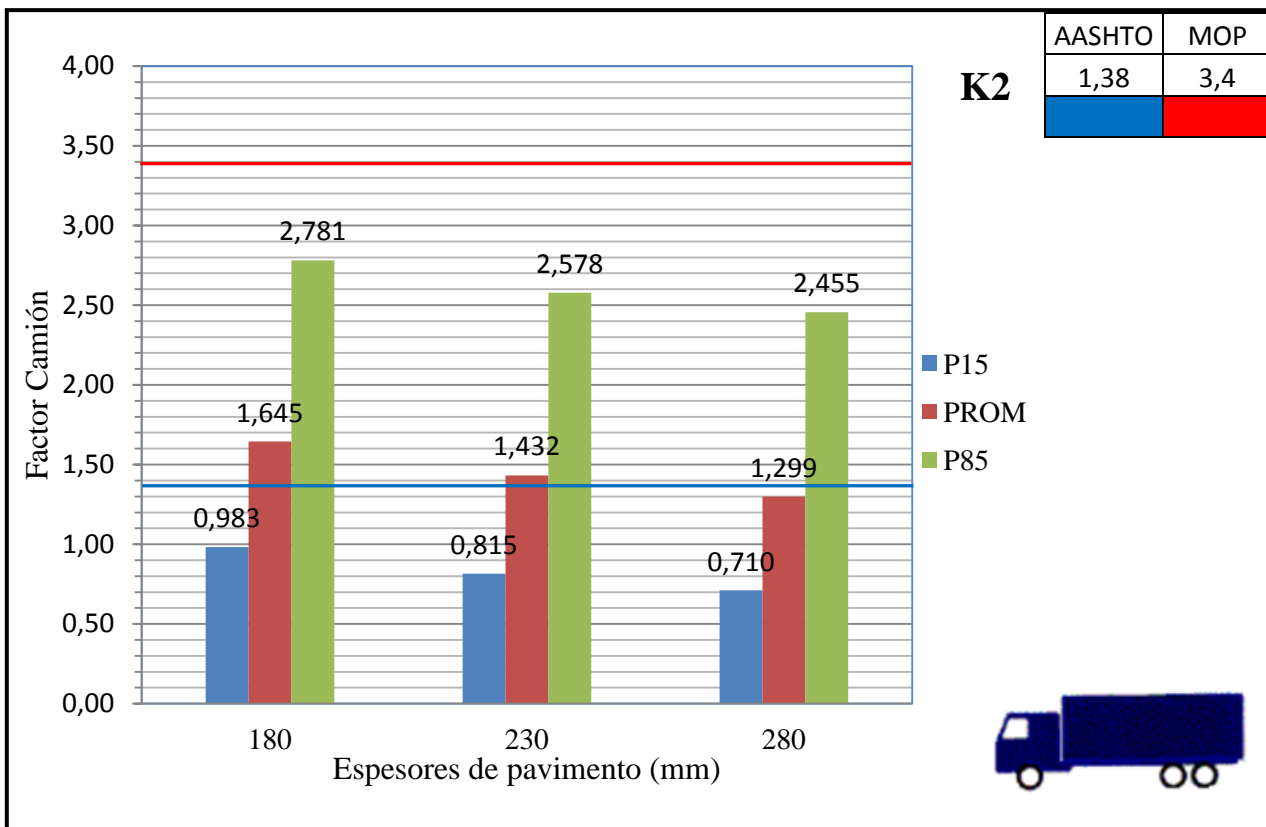
Figura G1: Comparación FC para vehículo K1

En la Figura G1 se presenta un gráfico de barras que entrega resultados obtenidos por el método M-E con 3 niveles de carga y 3 niveles de espesor de pavimento, todo esto para una falla con serviciabilidad final de 2.5 a través del modelo de fatiga de Vesic. Dentro del gráfico además se presentan dos líneas, una de color azul que representa el valor de FC calculado a través del método empírico AASHTO para un nivel de carga medio (PROM), un espesor de pavimento medio de 230mm y con una serviciabilidad final de 2.5. La línea roja representa el valor de FC entregado por el MOP en su MCV3 para localidades de la Región del Bío-Bío, en las vías con tránsito acercándose a Santiago.

En la figura se aprecia que a medida que aumenta el espesor de pavimento el FC decae con una diferencia pequeña de 0,1 puntos. El FC promedio para el vehículo K1 aproximadamente es igual a 0,6 con el método M-E, para el modelo AASHTO el FC es 0,36 y el MOP para este tipo de configuración entrega un FC igual a 0,235. En este análisis se puede concluir que en supuestos diseños realizados con el método mecanicista empírico, estos serian más conservadores, ya que

suponen que la configuración de carga entrega un daño aproximadamente el doble mayor que los que propone el método AASHTO y el MOP.

Para esta configuración de vehículo se puede observar que al aumentar la carga transportada, de una carga baja a una media(4 toneladas más) el daño aumenta en 7,65 veces más, de una carga media a una carga alta, aproximadamente un aumento de 5,5 toneladas, el FC aumentará 5 veces.

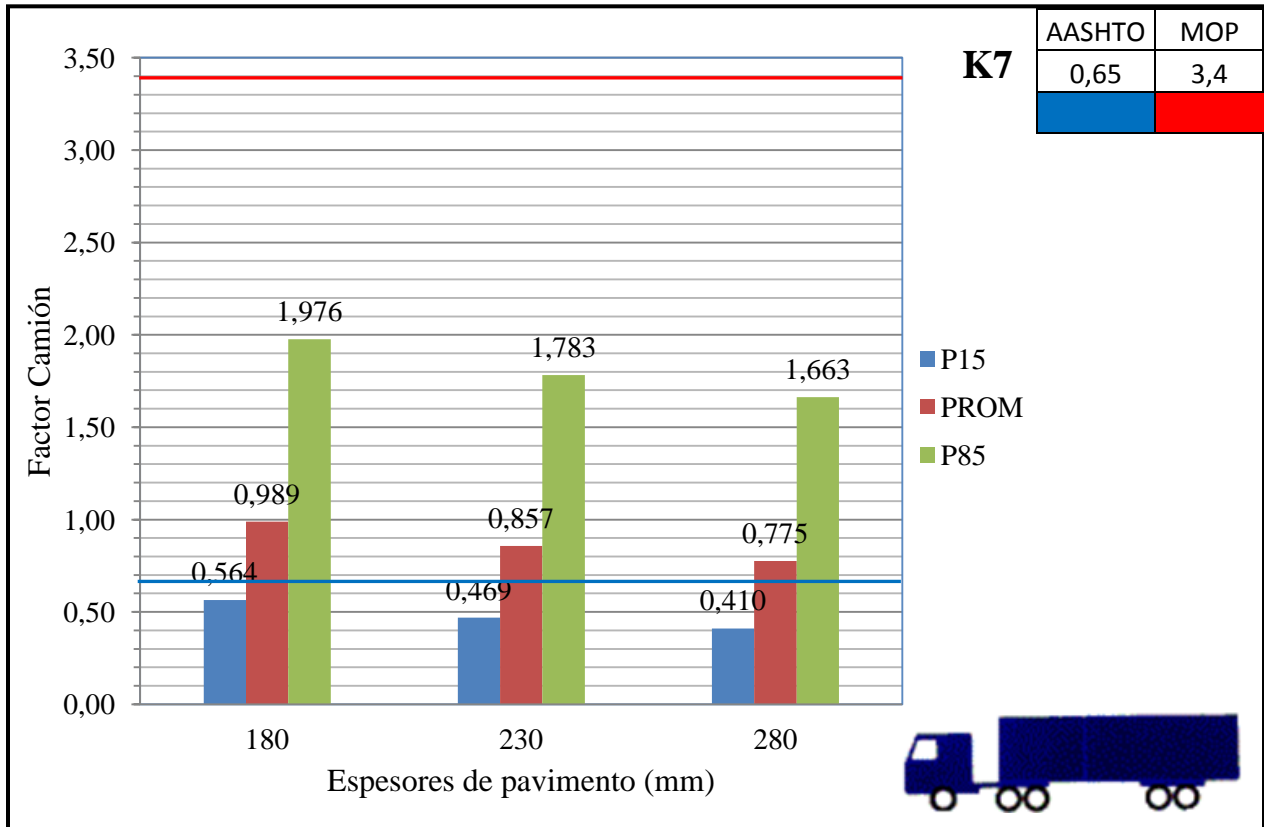


Fuente: Elaboración propia

Figura G2: Comparación FC para vehículo K2

En la Figura G2, al igual que la Figura G1 este gráfico presenta las mismas características, lo nuevo es que en este caso se están entregando valores de FC del vehículo K2 o camión de 3 ejes. Los FC disminuyen a medida que aumenta el espesor, aproximadamente en 0,2 puntos. Aquí el FC calculado con el método AASHTO se acerca mucho más a valores encontrados con el método M-E, aproximadamente para una carga promedio el FC es 1,4, más alto que la configuración de carga K1. El FC entregado por el MOP no entrega valores acordes a la configuración de carga presentada.

Para esta configuración de vehículo se puede concluir que al aumentar de una carga baja a una media (aproximadamente 6 toneladas más) el daño aumenta a 1,75 veces el. Al incrementar la carga del vehículo de una carga media a una alta (6,7 toneladas más) el FC crece 1,8 veces.



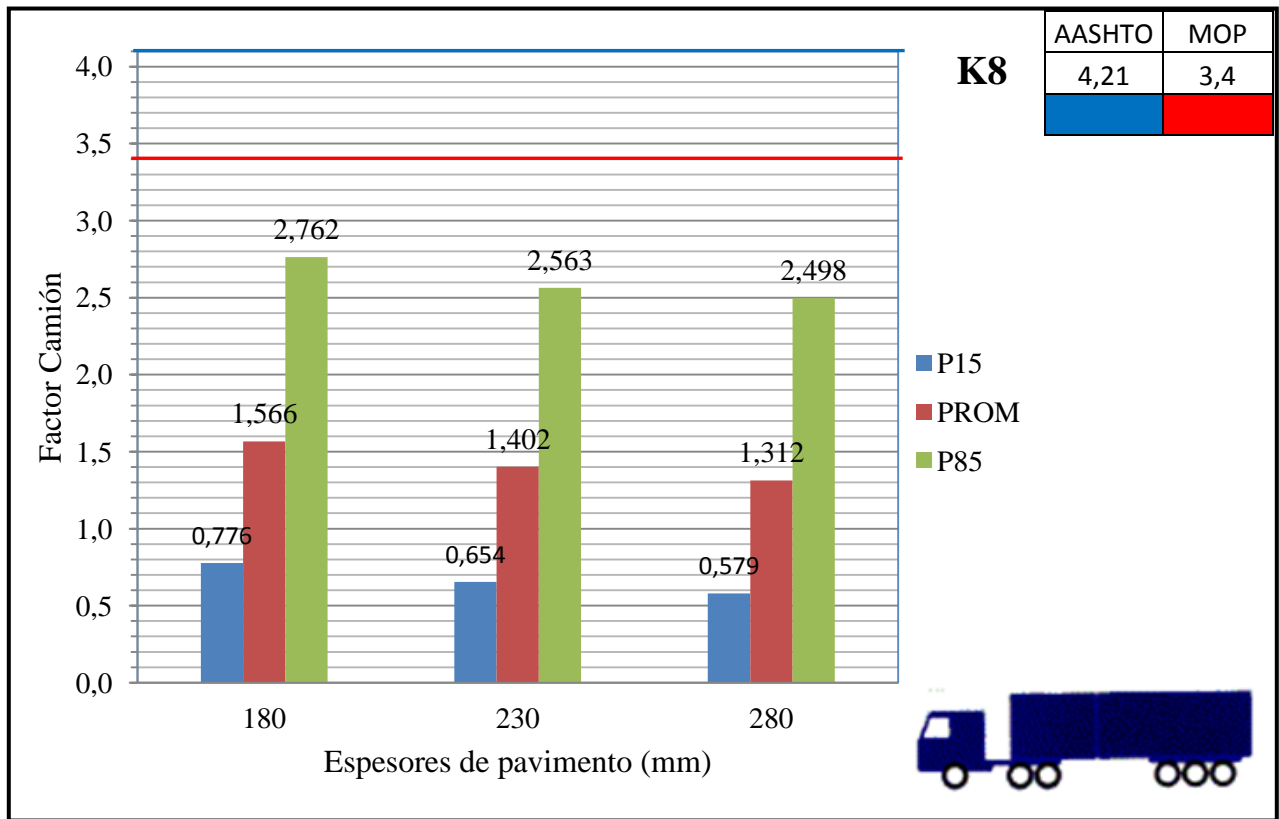
Fuente: Elaboración propia

Figura G3: Comparación FC para vehículo K7

Al igual que las figuras anteriores la Figura G3, presenta un gráfico comparativo de FC, en este caso para el vehículo K7 que es un tractocamión más un semiremolque con un EDRD. En un supuesto diseño el FC proporcionado por el método mecanicista empírico es más conservador, y el que entrega AASHTO más optimista, en cuanto al daño causado en el pavimento, su diferencia es mínima de aproximadamente 0,4 puntos. Nuevamente el FC entregado por el MOP se escapa de los valores reales para esta configuración.

Al igual que las configuraciones anteriores, el FC camión disminuye a medida que aumenta el espesor, en la modelación con una carga alta se da cuenta de que estos disminuyen en más grado (comparado con los FC de las cargas medias y bajas). La interpretación de esta última idea es que, la tensión que genera el vehículo a medida que aumenta el espesor disminuye en más cantidad que la tensión que genera un eje equivalente, la disminución de tensión de K7 se produce en el ESRS ya que los otros ejes que presenta este vehículo (2 EDRD) generan menos

tensión en el pavimento (aproximadamente cada uno genera la mitad de la tensión que el ESRS). El vehículo K7 genera menos daño que el vehículo K2 y más daño que K1



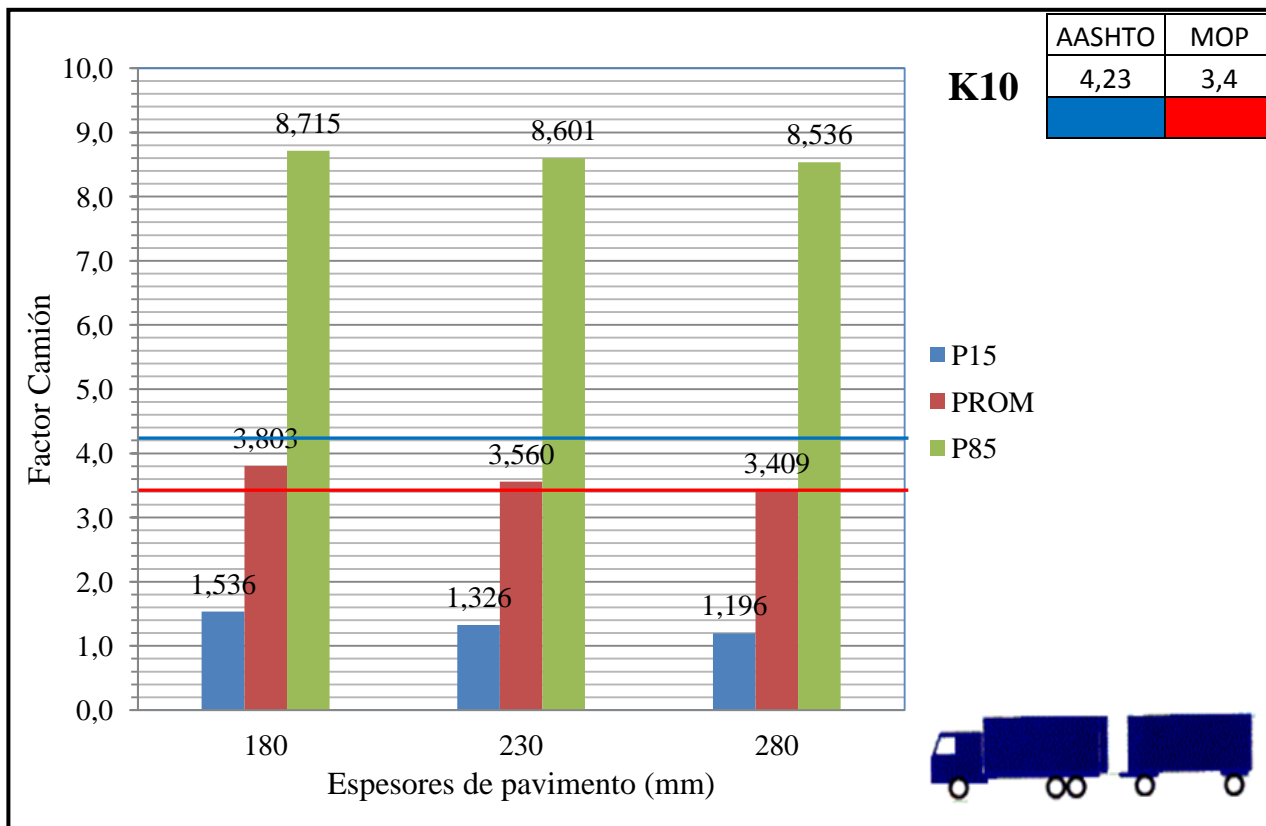
Fuente: Elaboración propia

Figura G4: Comparación FC para vehículo K8

El vehículo K8 se configura con un tractocamión más un semiremolque con un ETRD. Este vehículo genera más daño que el K1 y K7 pero no así con K2, ya que el K8 aunque sea un vehículo que transporte mayor tonelaje que el K2 su configuración de ejes (ETRD) hace que este genere menos daño en el pavimento.

Los valores proporcionados por el MOP y calculados con el método AASHTO van muy lejanos al que se obtiene por el método M-E. El FC promedio corresponde a 1,4 aproximadamente.

Al pasar de una carga baja a una media (30 toneladas más de carga) el FC se incrementa en 2 veces el de la carga baja, y al incrementar de una carga media a una alta(12,5 toneladas más de carga) el FC se incrementa en 1,8 veces el daño que produce la carga media. Se puede distinguir que esta configuración de vehículo soporta gran cantidad de tonelaje sin transformarlos en un daño excesivo en el pavimento.



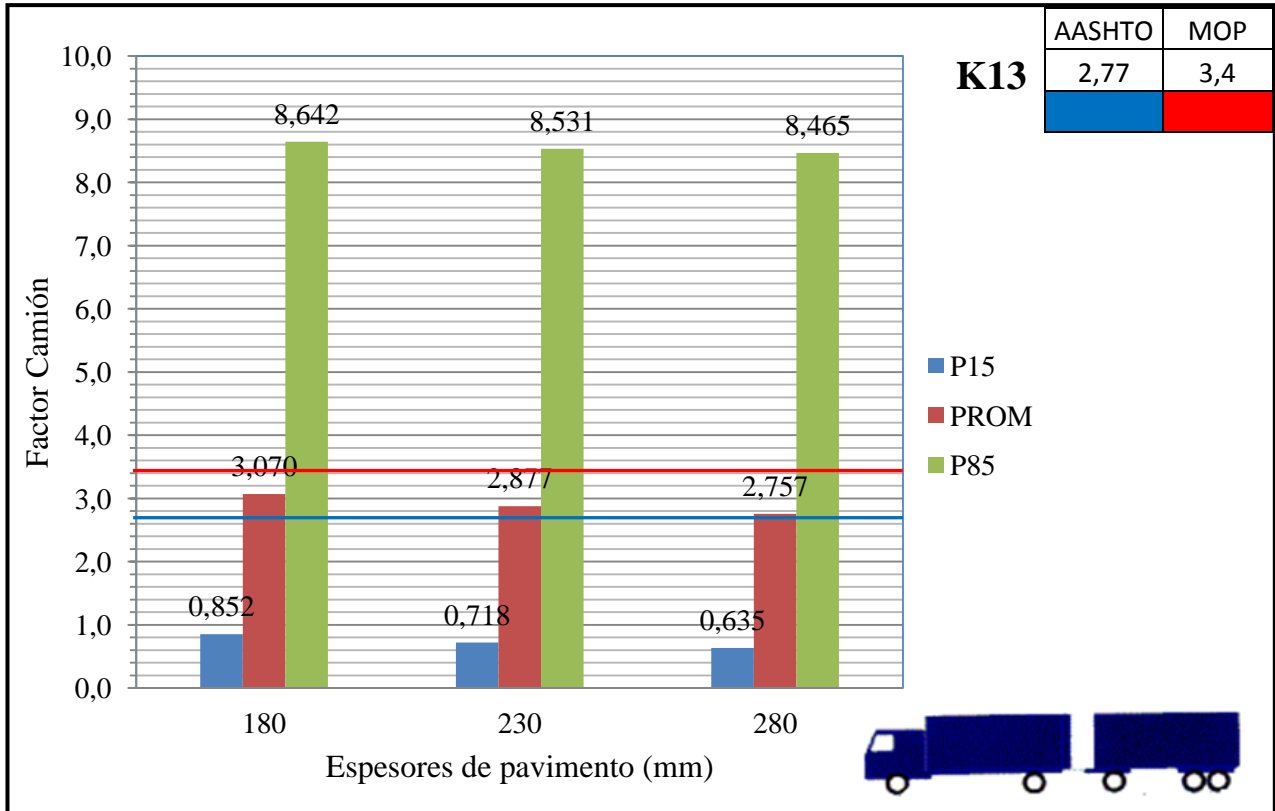
Fuente: Elaboración propia

Figura G5: Comparación FC para vehículo K10

En la Figura G5 entrega información del daño que entrega el vehículo K10, que se compone por un camión de 3 ejes más un remolque con dos ejes simples, este es el vehículo que genera más daño de todos los analizados en esta investigación. Entrega un FC calculado con el método M-E de 3,5 con una carga media, el FC del método MOP se acerca en gran cantidad y el FC con el método AASHTO lo sobrepasa por aproximadamente 0,7 puntos.

Al pasar de una carga baja a una media (12 toneladas de diferencia) el FC aumenta a 2,6 veces el FC de la carga baja, al incrementar de una carga media a una carga alta (11,9 toneladas) el FC aumenta a 2,5 veces el FC de la carga media.

Se puede concluir que esta configuración de vehículo al tener un aumento más bajo de carga, comparado con la configuración K8, el daño o FC aumenta en gran cantidad; esto se debe a que presenta una configuración de ejes dañina, ya que posee en su remolque dos ESRD los que generan poca área de contacto entre el neumático y la superficie de la losa, y así una mayor presión en el pavimento considerando la grandes cargas que transportan estos tipos de vehículos.



Fuente: Elaboración propia

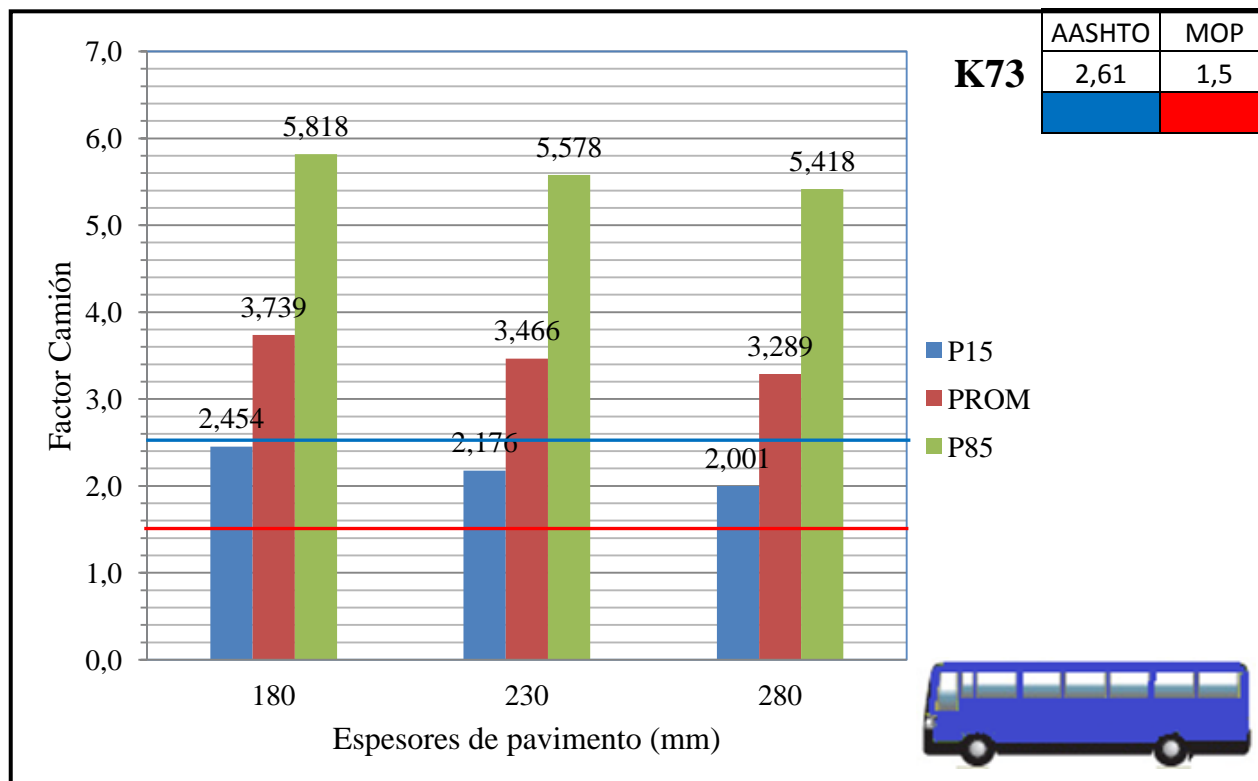
Figura G6: Comparación FC para vehículo K13

La Figura G6 entrega información de FC del vehículo K13, está compuesto por un camión de 2 ejes más un remolque de 3 ejes (un ESRD y un EDRD). El gráfico muestra un FC promedio de 2,87 calculado con el método M-E con una carga promedio y un espesor de pavimento de 230mm, el método AASHTO calcula un FC igual a 2,77 el que se acerca mucho al método M-E, también el MOP establece un FC de 3,4 que esta 0,5 puntos sobre el mismo. El gráfico muestra la misma tendencia que los demás, el aumento del espesor de pavimento hace disminuir el FC aproximadamente en 0,1 punto por nivel de carga.

Un aumento de carga desde una baja a la media (18 toneladas) hace aumentar el FC a 4 veces el FC de la carga baja, también un aumento de carga desde la media a la carga alta (14 toneladas) hace aumentar el FC a 3 veces el FC de la carga media.

Se puede concluir que esta configuración tener un aumento menor de carga, comparado con la configuración K8, el daño o FC aumenta en gran cantidad; esto se debe a que presenta una configuración de ejes dañina, ya que posee en su parte delantera un camión de 2 ejes(un ESRS y

un ESRD) generan poca área de contacto entre el neumático-pavimento, y así una mayor presión en el pavimento considerando la grandes cargas transportadas.

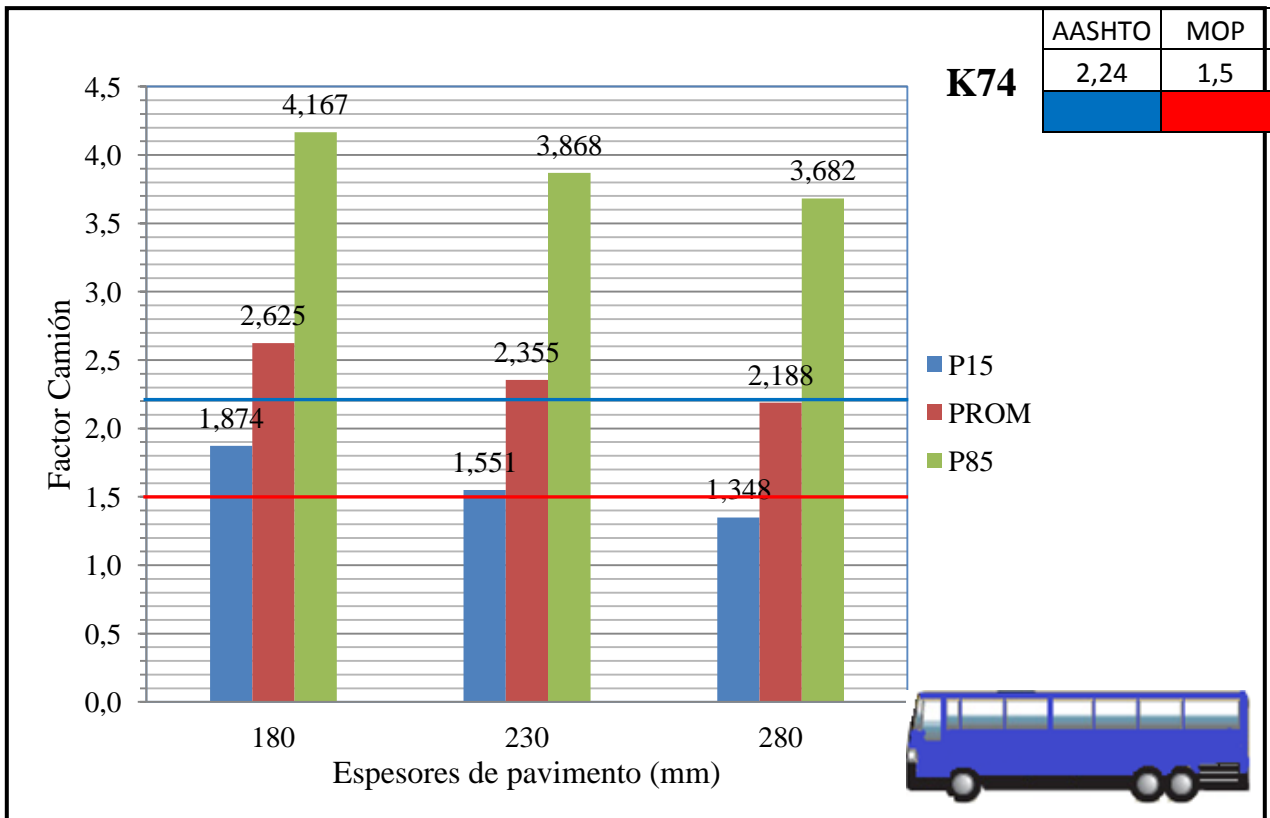


Fuente: Elaboración propia

Figura G7: Comparación FC para vehículo K73

En la figura G7 se muestra el daño que entrega el vehículo K73 al pavimento, es un bus de 2 ejes utilizado como bus interprovincial o interregional. El FC promedio que produce este vehículo según el gráfico es de 3,46, y se considera alto por lo que este bus también es uno de los que genera más daño. El método AASHTO subestima el FC con un valor de 2,61 y está por abajo del método M-E. Los valores que entrega el MOP se encuentran muy por debajo de los valores reales con un FC de 1,5.

Los FC que genera este vehículo son altos ya que este cuenta con 2 ejes simples (un ESRS y un ESRD), que generan un área de contacto pequeña entre el neumático-pavimento y así un aumento en las tensiones generadas. Se puede observar que para una carga baja el FC es aproximadamente entre 2,4 y 2 lo que es alto para una carga de esa categoría, esto se debe a que por una parte este tipo de vehículos tiene un gran peso bruto sin carga, y también porque estos vehículos nunca transitan sin pasajeros. Por las mismas razones es que no hay mucha variación entre los FC según los distintos niveles de carga.



Fuente: Elaboración propia

Figura G8: Comparación FC para vehículo K74

En la figura G8 se muestra el FC que entrega el vehículo K74, es un bus de 3 ejes (un ESRS delantero y atrás un eje ESRD+ESRS) utilizado como bus interprovincial o interregional. El FC promedio que produce este vehículo según el gráfico de barras es de 2,35. El método AASHTO se acerca al FC con un valor de 2,24 con una diferencia de 0,1 puntos. Los valores que entrega el MOP se encuentran muy por debajo de los valores reales con un FC de 1,5.

Este vehículo al ser más pesado que el K73 (ya que tienen más capacidad de carga) se puede pensar que entrega un FC más alto que la configuración K73, pero no es así porque cuenta con un eje especial el llamado en esta investigación E74, y está compuesto por un ESRD + ESRS lo que hace tener en su parte posterior una mayor área de contacto para así reducir la tensión entregada al pavimento.

El gráfico muestra que a medida que aumenta el espesor decae el FC en gran cantidad, comparado con las combinaciones anteriores. La interpretación es que, la tensión que genera el vehículo a medida que aumenta el espesor disminuye en más cantidad que la tensión que genera un eje equivalente.