

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS PREVIO DEL IMPACTO EN LOS PAVIMENTOS QUE TENDRÍA UNA ACTUALIZACIÓN DE PESOS POR EJE Y BRUTO DE VEHÍCULOS PESADOS PERMITIDOS EN LA RED VIAL NACIONAL

Ignacio Rodríguez, THX Ingeniería, Santiago, Chile, itrodriguez@thxingenieria.cl
Guillermo Thenoux, THX Ingeniería, Santiago, Chile, gthenoux@ing.puc.cl
Carlos Araya, Ciprés, Santiago, Chile, carlosaraya@cipres.cl
Miguel Valdés, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile, miguel.valdes@mop.gov.cl

RESUMEN

El presente documento se enmarca en el proyecto “Análisis de Pesos por Eje de la Red Vial Nacional” el cual fue licitado por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Uno de los principales objetivos del proyecto fue estudiar el impacto en los pavimentos de la red vial nacional si se modifican las normativas que establecen los límites del peso bruto vehicular y los pesos por eje. Lo anterior, tendrá un impacto en los Factores de Estratigrafía de Carga (FEC) utilizados en el Método de diseño AASHTO lo que a su vez implica cambios significativos respecto de la durabilidad y desempeño de las estructuras de pavimentos. La presente publicación corresponde solo a una parte del trabajo realizado para estudiar el efecto de la modificación de normativa en el factor FEC empleando metodología mecanicista la cual permite ampliar el rango de tipologías de ejes y se proponen ecuaciones para determinar el Factor Eje Equivalente (FEE) para los principales tipos de ejes de la red vial nacional. El trabajo presenta además un análisis de sensibilidad de los factores FEC empleados para el diseño en Chile en las últimas décadas. El estudio completo del proyecto considera modelar y analizar el impacto que generan los vehículos pesados en la vida útil de diferentes estructuras de pavimentos para diferentes escenarios. Son varios los escenarios a considerar entre estos: aumento de cargas límites, modificación de tolerancias de cargas límites, efecto de limitar el uso de ejes retráctiles, introducción de nuevas configuraciones de carga (bi-trenes), efecto en cambios de presión de neumático, efecto de incorporar rueda super-ancha y efecto de emplear suspensión neumática. Las principales conclusiones de todo el estudio se resumen en el presente trabajo el cual puede ser solicitado al MOP Chile.

Palabras Clave: Vehículos Pesados, Ejes Equivalentes, Factor Eje Equivalente, Factor de Estratigrafía de Carga, Diseño Estructural de Pavimentos

1. INTRODUCCIÓN

Una de las políticas que la Dirección de Vialidad del MOP está estudiando es re-evaluar los límites de pesos por eje y sus tolerancias bajo la premisa de que la productividad en el sector de transporte podría aumentar. En otras palabras, se podría llevar más cargas con un menor número de viajes. Sin embargo, un aumento en las cargas admisibles implica una disminución de la vida útil en la infraestructura vial, en particular, en pavimentos, puentes y muy significativamente en pavimentos de menor espesor.

Es necesario estudiar cómo se vería afectado el cálculo de Ejes Equivalentes de Diseño (EE_{Dis}) producto de un cambio en las normativas relacionadas con los puntos anteriores. En particular el Factor de Eje Equivalente (FEE) y el Factor Estratigrafía de Carga (FEC). El presente trabajo se centra en el estudio y determinación de los factores FEE y FEC. El estudio considera modelar y analizar el impacto que generan los vehículos pesados en la vida útil de diferentes estructuras de pavimentos para diferentes escenarios. Son varios los escenarios consideran el estudio completo, pero estos no serán incluidos en el presente trabajo. Los escenarios considerados son:

- a) Aumento de cargas límites
- b) Modificación de tolerancias de cargas límites
- c) Efecto de limitar el uso de ejes retráctiles
- d) Introducir nuevas configuraciones de carga (bi-trenes)
- e) Efecto en cambios de presión de neumático
- f) Efecto de incorporar rueda super-ancha
- g) Efecto de emplear suspensión neumática

2 FACTOR DE EQUIVALENCIA MÉTODO AASHTO

El método de diseño estructural de pavimentos oficial de Chile se especifica en el Volumen N°3 del Manual de Carreteras del MOP y corresponde a una adaptación del Método AASHTO 93 y AASHTO 98. Las ecuaciones de diseño del método AASHTO se obtuvieron a partir de la información recolectada en la prueba AASHO (llamado AASHTO en la actualidad) realizada en Ottawa, Illinois entre 1952 y 1960. Luego, se han realizado diferentes actualizaciones hasta el actual método AASHTO 93 el cual queda validado por la experiencia que entrega más de 60 años de aplicación y millones de kilómetros diseñados y construidos.

En la prueba AASHO se construyeron seis circuitos, y en cada circuito se construyó la mitad de la longitud del circuito en pavimento de hormigón y la otra mitad en pavimento de asfalto, de variados espesores y tipos de reforzamiento; hubo 600 secciones de prueba. En cada uno de los circuitos y pistas circuló un tipo específico de camión en cuanto a configuración de ejes y carga (Tabla 1) de este modo, en cada pista de cada circuito, se pudo dejar constante la carga (y tipo de camión) y generar el modelo de deterioro para Ejes Equivalentes acumulados en función de los principales parámetros que afectan el desempeño del pavimento. Únicamente el Circuito N°1, no circuló tránsito con el fin de estudiar efectos climáticos de largo plazo.

En la prueba AASHO se introdujo el concepto de Eje Estándar, el cual corresponde a un Eje Simple Rodado Doble (ESRD) de 18 kip de peso (8,16 toneladas o 80 kN). El camión con el Eje Estándar circuló por la Pista 1 del Circuito 4. Esta pista se utilizó como pista de referencia para comparar el daño relativo que ejercían los otros camiones que transitaban con mayor o menor carga respecto de la Pista 1 - Circuito 4. Al Eje Estándar se le denominó Eje Equivalente (EEq). La elección del ESRD de 18 kip como eje estándar tiene su origen a que dicho peso correspondía la carga máxima legal en el período que se realizó la prueba AASHO (Van Til, McCullough y Vargas, 1972).

El criterio utilizado para comparar el daño relativo de los pavimentos entre los diferentes circuitos fue el “Tasa de Serviciabilidad Presente” (PSR por su sigla en inglés *Present Serviability Rating*) el cual después pasó a denominarse “Índice de Serviciabilidad Presente” (PSI por su sigla en inglés - *Present Serviability Index*), el cual depende de factores funcionales y estructurales del pavimento, no obstante, el método utiliza PSI como umbral, pero solo del diseño estructural.

La metodología AASHTO entrega fórmulas para transformar las cargas de cada tipo de eje que forman parte de la configuración de un vehículo cargado, en Ejes Equivalentes (W18 o EEq). En la literatura, el factor de conversión recibe varios nombres; Factor de Eje Equivalente (FEE), “LEF” (del inglés *Load Equivalente Factor*) o “EALF” (del inglés *Equivalent Axle Load Factor*). Las fórmulas AASHTO permiten determinar el factor FEE para tres tipos de configuraciones de ejes:

- Eje Simple Rueda Doble, ESRD – Eje Standard
- Eje Doble Rueda Doble, EDRD – Eje Tandem
- Eje Triple Rueda Doble, ETRD – Eje Tridem

Tabla 1. Camiones empleados en la prueba AASHTO.
Adaptación de HRB, 1961

Circuito	Pista	Esquema Camión	Clasificación MOP	Peso en toneladas		
				Eje Frontal	Ejes Traseros	Peso Bruto
2	1		200	0,9	0,9	1,8
	2			0,9	2,7	3,6
3	1		300	1,8	5,4	12,7
	2			2,7	10,9	24,5
4	1		300	2,7	8,2	19,1
	2			4,1	14,5	33,1
5	1		300	2,7	10,2	23,1
	2			4,1	18,1	40,4
6	1		300	4,1	13,6	31,3
	2			5,4	21,8	49,0

Las fórmulas para determinar los factores FEE para asfalto y hormigón se presentan a continuación.

$$\log(1/FEE_{Asf}) = 4,79 \cdot (18 + 1) - 4,79 \cdot \log(L_x + L_2) + 4,33 \cdot \log L_2 + G_t/\beta_x \quad (1.1)$$

$$- G_{18}/\beta_{18} \quad (1.2)$$

$$G_t = \log \frac{(4,2 - p_t)}{(4,2 - 1,5)} \quad (1.3)$$

$$\beta_x = 0,40 + \frac{0,081 \cdot (L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} \cdot L_2^{3,23}}$$

“Donde FEE_{Asf} es el Factor de Eje Equivalente para pavimentos de asfalto, L_x es el peso por eje (simple, doble o tridem) en kips, L_2 es el código de la configuración de eje (1 para eje ESRD, 2 para EDRD y 3 ETRD), p_t es el índice de serviciabilidad final y SN es el número estructural (pulgadas)”

$$\log(1/FEE_{Hor}) = 4,62 \cdot (18 + 1) - 4,62 \cdot \log(L_x + L_2) + 3,28 \cdot \log L_2 + G_t/\beta_x \quad (2.1)$$

$$- G_{18}/\beta_{18} \quad (2.2)$$

$$G_t = \log \frac{(4,2 - p_t)}{(4,2 - 1,5)} \quad (2.3)$$

$$\beta_x = 1,00 + \frac{3,63 \cdot (L_x + L_2)^{5,20}}{(D + 1)^{8,46} \cdot L_2^{5,20}}$$

“Donde FEE_{Hor} es el Factor de Eje Equivalente para pavimentos de hormigón y D es el espesor de la losa (pulgadas)”

A continuación, se presenta aspectos relevantes asociado al uso de las fórmulas AASHTO para obtener el factor FEE.

- El factor FEE debe ser iterado hasta converger al “SN” o “D” del diseño final. Para el caso de Chile, esta iteración se omite y se utiliza un factor FEE medio, obtenido para un valor específico de “SN = 120 mm” y “D = 230 mm” (valores presentados en Tablas en el Manual de Carreteras). En este caso, el error de ejes equivalentes de diseño resulta menor a 10% para rangos típicos de espesores de pavimento (Witczak, 1981).

- En la prueba AASHO no circularon camiones con la configuración de Eje Triple Rodado Doble. AASHO posteriormente derivó la fórmula mediante métodos analíticos y extrapolaciones (AASHO, 1993).
- Las fórmulas AASHO no presenta un método para cuantificar el impacto de otras configuraciones de ejes compuestos o “ejes atípicos” que normalmente circulan por carreteras nacionales, los cuales se indican a continuación:
 - Eje Simple Rueda Simple, ESRS
 - Eje Doble Rueda Simple, EDRS
 - Eje Doble Rueda Simple y Rueda Doble, ED(RS+RD)
 - Eje Triple Rueda Simple y dos Ruedas Dobles, ET(RS+2RD)
- Algunos parámetros de diseño importantes de los camiones utilizados en la prueba AASHO fueron: una misma presión de inflado (entre 520 y 550 kPa); dimensión (ancho) y tipo de neumáticos típicos de la época y; amortiguadores hidráulicos. En la actualidad, los camiones se caracterizan por empleo de diferentes tipos de presiones, diseño de neumáticos y amortiguadores (el trabajo final se analiza en detalle estos factores).

3. FACTOR DE EQUIVALENCIA LEY DE LA CUARTA POTENCIA

A la fecha, existen diferentes estudios que presentan diferentes aproximaciones para determinar el factor FEE no solo para los tipos de ejes que circularon por la prueba AASHO si no que para otros tipos de configuraciones (Kawa, Xhang y Hudson, 1998 y Vásquez, 2016). En términos generales, estos estudios se pueden agrupar en tres categorías:

- Análisis de datos de prueba AASHO (enfoque empírico): Estos estudios revisan la información de la prueba AASHO y, empleando diferentes métodos de regresión estadística, se proponen nuevas ecuaciones para determinar el factor FEE.
- Análisis de la respuesta mecánica primaria (enfoque mecanicista): El principio fundamental de este análisis es que “una misma respuesta estructural implica el mismo daño equivalente”. El análisis considera el empleo de la teoría lineal elástica multicapa y/o elementos finitos y se compara la respuesta de la estructura (deflexión, deformación y/o esfuerzos) entre el eje estándar y la configuración de interés para determinar el factor FEE.
- Pruebas aceleradas a escala real (enfoque empírico-mecanicista): Mediante equipos de pruebas aceleradas a escala real se compara la equivalencia de daño entre un eje estándar y la configuración de interés. Las pruebas finalizan cuando se llega a un umbral diferente para distintos criterios de desempeño (ahuellamiento, porcentaje de grietas u otro). No se utiliza el criterio de serviciabilidad considerado en la prueba AASHO. Estas pruebas aceleradas son complementadas con un análisis de la respuesta mecánica empleando sensores de deformación, esfuerzos y/o deflexión.

Uno de los primeros trabajos que estudia los factores FEE corresponde al de Deacon en 1969 (Huang, 2004) quién identifica la forma exponencial de las curvas de AASHO. Deacon, llevó a cabo un análisis teórico de los factores de daño basado en la teoría de capas y presentó un modelo exponencial de daño denominado “ley de la cuarta potencia” (Ec. 3). Se asigna el valor 4 para el exponente “n” pero este puede variar entre 3,6 y 4,6 (Addis, 2002) o valores mayores dependiendo del tipo de estructura de pavimento. En la literatura también se le conoce por el nombre “regla exponencial”.

La regla de la cuarta potencia permite calcular el factor FEE comparando el consumo de fatiga a partir de deformaciones y tensiones producidas por diferentes cargas (se compara el consumo de fatiga entre un eje estándar (L_s) y un eje con carga “X” cualquiera (L_x)). La “regla de la cuarta potencia” constituye sólo una fórmula general y, al igual que la fórmula AASHO, el factor FEE depende importantemente del criterio de deterioro utilizado para comparar el daño relativo.

$$FEE = LEF = W_{18}/W_x = (L_x/L_s)^n \quad (3)$$

“Donde LEF y FEE es el Factor de Eje Equivalente, W_x es el Número de pasadas de eje cualquiera con carga L_x , W_{18} es el Número de pasadas de eje ESRD con una carga estándar de 18.000 lb (8,16 t), L_x es la Carga eje x y L_s es la Carga eje estándar”

4. DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA OBTENER FACTORES FEE

El actual estudio utiliza la regla exponencial debido a que permite determinar el factor FEE para configuraciones de ejes diferentes a las utilizadas en la prueba AASHTO. También, permite obtener un valor medio del factor FEE de forma más simple y no se requiere iterar el valor según espesor de diseño del pavimento. De igual modo, la regla exponencial incorpora un rango de error similar a la fórmula AASHTO debido a que, en último término, el factor FEE depende de los mismos factores que afectan el desempeño estructural de un pavimento.

Para determinar la fórmula exponencial de los ejes ESRD, EDRD y ETRD, se ajustaron los valores “ n ” y “ L_s ” (Ec. 3) de acuerdo con la fórmula AASHTO (Ecuaciones 1 y 2), empleando los siguientes parámetros recomendados en Apéndice D de la guía AASHTO-93: para asfalto $SN = 127,0$ mm (5 in) y para hormigón $D = 228,6$ mm (9 in). El valor de Serviciabilidad final utilizado fue “ $pt = 2,5$ ”.

Para determinar las fórmulas para los ejes atípicos, se realizó un procedimiento similar al realizado por Zhang, Kawa y Hudson (2005). El procedimiento consiste en obtener ecuaciones basadas en el desempeño de pavimento (Índice de Serviciabilidad final). Las ecuaciones fueron obtenidas empleando los datos de la prueba AASHO (239 estructuras de pavimentos de asfalto y 73 estructuras de pavimentos de hormigón) las cuales llegaron a un Nivel de Serviciabilidad final “ $pt = 2,5$ ”. A partir de este estudio, se obtuvieron ecuaciones de regresión que correlacionan los ejes equivalentes con el peso del eje, el número estructural o espesor de losa y, la respuesta mecánica del pavimento ante la carga que fue sometida la estructura.

Para los pavimentos de asfalto, el esfuerzo horizontal en la base del asfalto es el indicador que mejor correlaciona con la falla por fatiga y para los pavimentos de hormigón, el esfuerzo de tensión en la base de la losa es el indicador que mejor se relaciona con el agrietamiento por tensión.

La ecuación de regresión obtenida para pavimento de asfalto es la siguiente:

$$\log W_{x_{pt=2,5}} = 6,2697 + 5,5687 \cdot \log(NS + 1) - 0,12109 \cdot L - 1,3158 \cdot \log(\epsilon_t) \quad (4)$$

“Donde $W_{x_{pt=2,5}}$ es el número de deformaciones máxima a la cual el pavimento alcanza un índice de serviciabilidad final de 2,5 para una carga dada, L es la carga del grupo de ruedas que genera la deformación en kips, NS es el Número Estructural del pavimento de asfalto (pulgadas) y ϵ_t es la deformación máxima horizontal (en micras) en la base de la capa asfáltica”.

La ecuación de regresión para pavimento de hormigón es la siguiente:

$$\log W_{x_{pt=2,5}} = 11,602 - 0,02826 \cdot PCC - 2,2834 \cdot \log \sigma_t \quad (5)$$

“Donde $W_{x_{pt=2,5}} = N^\circ$ de tensiones máximas a la cual el pavimento alcanza un índice de serviciabilidad final de 2,5 para una carga dada, PCC es el espesor de la losa de hormigón (pulgadas) y σ_t es la tensión máxima en la base de la losa”.

Se debe indicar que la presente publicación se limita a caminos pavimentados de alto volumen (estructuras de pavimento de mayor espesor), debido a que los caminos bajo volumen de tránsito y caminos no pavimentados predominan otras formas de falla. Por ejemplo, Oliveira et al. (2019) proponen una ecuación de factor FEE para caminos de bajo volumen de tránsito empleando una metodología similar, pero la cual considera la deformación vertical de la subrasante.

4.1 CÁLCULO TENSIONES Y FEE PARA PAVIMENTO DE ASFALTO

Para el cálculo de la deformación máxima en los pavimentos de asfalto se utilizó el software de análisis estructural de pavimentos mePads. El software emplea la teoría lineal elástica y permite la modelación de estructuras multicapas para varios escenarios de cargas. La estructura utilizada corresponde a un pavimento asfáltico típico de AASHTO de NE = 4,9" (NE = 120 mm aproximadamente) la cual se presenta en la Figura 1. A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra la salida gráfica del programa.

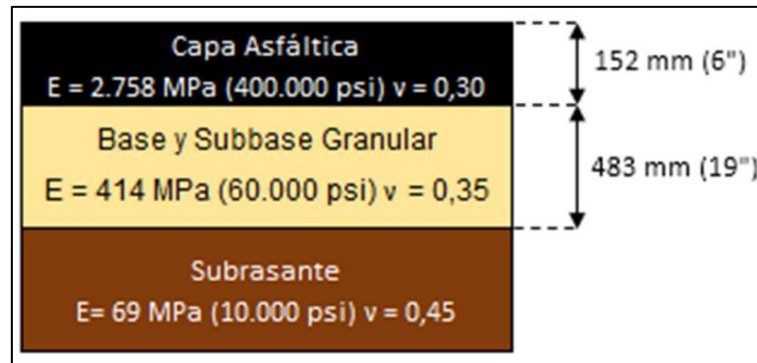


Figura 1. Estructura Utilizada para el Análisis

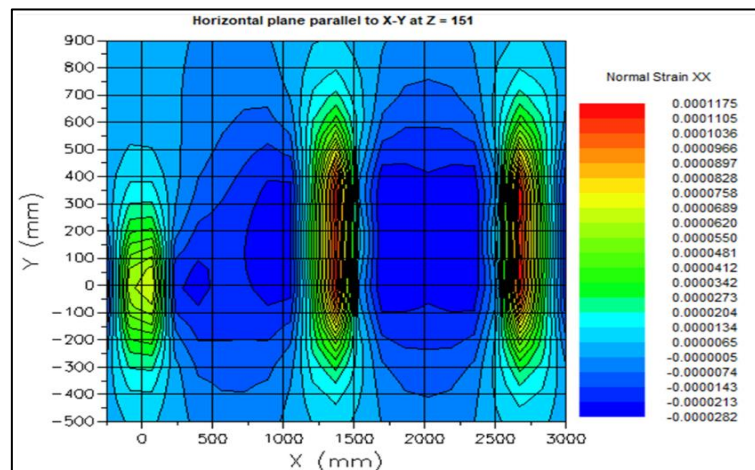


Figura 2. Ejemplo de salida Programa mePads para Eje Triple(RS+2RD)

4.2 CÁLCULO TENSIONES Y FEE PARA PAVIMENTO DE HORMIGÓN

Para el cálculo de las tensiones máximas en los pavimentos de hormigón se utilizó el método de elementos finitos. La estructura utilizada corresponde a un pavimento de hormigón de espesor $D = 25$ cm el cual se presenta en la Figura 3. A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra la salida gráfica del programa.

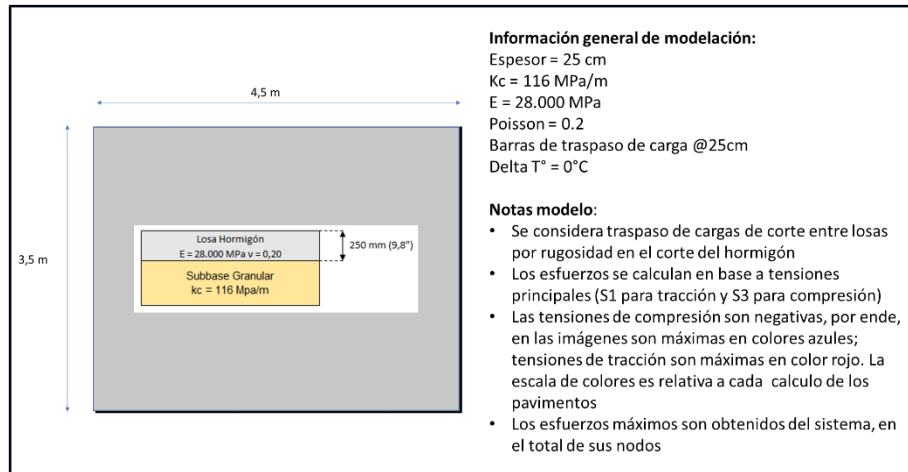


Figura 3. Estructura Utilizada para el Análisis

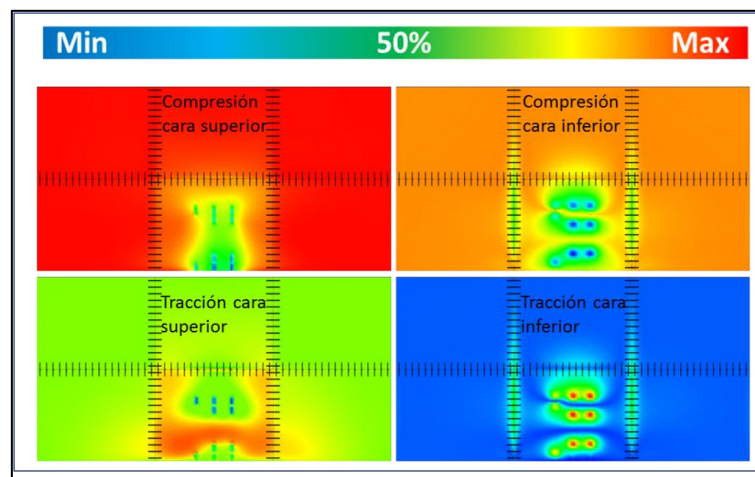


Figura 4. Ejemplo Salida Gráfica Programa Elementos Finitos para Eje Triple(RS+2RD)

4.3 DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR FEE

A partir de las ecuaciones (4) y (5) se determina el número de Ejes Equivalentes (W_x) para un Nivel de Serviciabilidad final “ $pt=2,5$ ” en función del estado de deformaciones/tensiones que genera una determinada carga. Luego, se siguieron los siguientes pasos:

- Utilizando la ecuación 1 [$FEE = (W_x/W_{18})$], se obtiene, el factor FEE de los ejes atípicos para distintos niveles de carga.
- Con estos factores se construye la curva exponencial en un gráfico de Peso por Eje versus FEE para cada eje atípico [(ESRS, EDRS, ED/(RS+RD) y ET/(RS+2RD)].
- Luego, la curva se ajusta al comportamiento de la prueba AASHTO de los ejes ESRD, EDRD y ETRD y se obtiene la ecuación de regresión con el exponente “n” y la carga estándar “Ls”.

Las Tablas 2a y 2b, presentan las fórmulas exponenciales para pavimento de asfalto y de hormigón obtenidas.

Tabla 2a. Fórmula Exponencial Pavimento de Asfalto

Configuración de Eje	Ecuaciones Eje Equivalente. Lx en (t)
ESRS	$(Lx/6,77)^{3,9}$
ESRD	$(Lx/8,16)^{3,9}$
EDRS	$(Lx/11,6)^{4,0}$
ED(RD+RS)	$(Lx/12,9)^{4,0}$
EDRD	$(Lx/15,1)^{4,0}$
ET(2RD+RS)	$(Lx/17,6)^{4,0}$
ETRD	$(Lx/21,6)^{4,0}$

Tabla 2b. Fórmula Exponencial Pavimento de Hormigón

Configuración de Eje	Ecuaciones Eje Equivalente
ESRS	$(Lx/6,0)^{4,1}$
ESRD	$(Lx/8,16)^{4,2}$
EDRS	$(Lx/9,3)^{4,1}$
ED(RS+RD)	$(Lx/10,6)^{4,1}$
EDRD	$(Lx/13,2)^{4,1}$
ET(2RD+RS)	$(Lx/14,6)^{4,1}$
ETRD	$(Lx/17,5)^{4,1}$

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE FACTORES DE ESTRATIGRAFÍA DE CARGA (FEC) UTILIZADOS EN CHILE

Durante la vida en servicio de un pavimento, circularán una gran variedad de vehículos pesados con diferentes tipos de configuraciones de ejes traduciéndose en una “infinita” variedades de cargas. El Factor Estratigrafía de Carga (FEC) corresponde al Factor de Ejes Equivalentes (FEE) promedio de todos los ejes de una categoría de vehículos pesados que circularan por el pavimento durante todo el período de su vida útil. El FEC permite transformar una categoría particular de vehículos en Ejes Equivalentes.

La categorización de vehículos pesados en Chile se encuentra definida en el Manual de Carreteras en donde Chile, es el país que utiliza la menor segregación de vehículos pesados (solo tres categorías) no obstante, utilizar una mayor segregación no necesariamente significa obtener un resultado más confiable. La segregación de vehículos pesados utilizada en Chile es la siguiente:

- Buses Inter Urbanos (BIU): Dentro de esta categoría se agrupan los buses de 2, 3 y 4 ejes que realizan recorridos interurbanos.
- Camiones de 2 ejes (C2E): Dentro de esta categoría se agrupan todos los camiones de un solo chasis (rígido) y con un máximo de 2 Ejes.
- Camiones de más de 2 ejes (C+2E): Dentro de esta categoría se agrupan todo el resto de los tipos de camiones, tanto de chasis rígido como articulados.

Utilizar una mayor segregación de vehículos pesados en mediciones de tránsito podría resultar en un estudio más exacto para un escenario específico, pero de igual modo se hacen presente otros factores que presentan mayor dificultad en ponderar y que afecta la exactitud buscada. A saber:

- En países como Chile el tipo de carga presenta un factor estacional importante y muy diferente en distintas regiones
- Cuando se realizan estudios o controles de pesos móviles, en menos de una hora comienza la evasión de vehículos con sobrecarga o vehículos modifican la posición de ejes retráctiles.

- Si los estudios de pesos se realizan a partir de una plaza de pesaje fijas, se debe tener en consideración que estas se encuentran principalmente ubicadas en carreteras principales en donde circula una tipología de vehículos muy particular dependiendo de la región y a su vez una tipología de vehículos diferentes a las que se pueden observar en redes secundarias y terciarias.

Más importante que el nivel de segregación que se utilice, resulta ser el Factor de Estratigrafía de Carga (FEC) que se adopte para cada categoría de vehículo. El Manual de Carreteras en sus últimas versiones recomienda realizar un estudio de pesos para determinar los FEC de cada proyecto y que solamente en caso de no disponer de dicha información, se deben emplear los factores FEC que proporciona el Manual. En la práctica, las oficinas de ingeniería utilizan solo los valores que se prescriben en el Manual debido a que realizar estudios de pesos es significativamente más complejo que un estudio de tránsito.

Los factores FEC que entrega Manual de Carreteras se actualizan cada cierto tiempo. El factor FEC se entrega para las tres categorías de vehículos (BIU, C2E y C+2E) y dos tipos de pavimentos (asfalto y hormigón). En el presente trabajo se estudian las tres últimas actualizaciones del factor FEC propuesto por el Manual de Carreteras: (1981, 1998, y 2005) y se observa un significativo cambio en los valores propuestos.

Las tres actualizaciones mantienen las tres categorías de vehículos pesados (BIU, C2E y C+2E). El criterio de selección según tipo de carretera se modifica en la última actualización. En la versión del año 1981 y 1998 (Tabla 3) se utiliza, además del criterio del tipo de vehículo pesado, el tipo de carretera definido como: carretera con tránsito liviano, medio y pesado. El criterio para determinar el tipo de tránsito no está definido, pero se asume que una oficina de ingeniería con experiencia propondrá el factor FEC adecuado, el cual además será visado por la inspección.

Tabla 3. FEC recomendados en Manual de Carreteras de Chile
Elaborado a partir de información del Manual de Carreteras años

Tipo de Pavimento	Tipo de Vehículo	Estratigrafía 1981			Estratigrafía 1998		
		Liviana	Mediana	Pesada	Liviana	Mediana	Pesada
Asfalto	BIU	0,8034	0,8034	0,8034	1,3745	1,3745	1,3745
	C2E	1,0260	1,6635	4,1989	1,2383	1,4237	1,6191
	C+2E	3,5000	5,4223	7,2272	3,4992	4,0557	4,5951
Hormigón	BIU	0,7900	0,7900	0,7900	1,3684	1,3684	1,3684
	C2E	1,1016	1,6601	4,2082	1,2249	1,4171	1,5992
	C+2E	3,7970	5,7755	8,0769	4,3787	5,0852	5,6980

La actualización del factor FEC del 2005, no utiliza el criterio de tipo de tránsito (tránsito liviano, medio y pesado) sino que entrega los factores FEC de forma “Regional” obtenido de 10 plazas de pesaje fijas del MOP distribuidas desde Chacalluta a Los Ángeles. A partir de lo anterior, las oficinas de diseño deben emplear el criterio de cercanía geográfica para elegir los factores FEC. Otro criterio incorporado el año 2005, fue incorporar el índice Serviciabilidad final utilizado en el diseño (2,0 o 2,5). En términos generales, las autopistas de alto estándar emplean un Índice de Serviciabilidad final de 2,5 y los caminos secundarios un valor de Índice de Serviciabilidad final de 2,0. Un último aspecto de la actualización del 2005 es que incluye la direccionalidad del tránsito, es decir, en un mismo punto geográfico se debe distinguir si el tránsito es en dirección Norte-Sur u Oriente-Poniente.

Para cuantificar el efecto de los cambios que han experimentado los factores FEC en las tres últimas actualizaciones se realizarán dos tipos de análisis. A saber:

- a) Comparar como se modifican los Ejes Equivalentes de Diseño considerando los factores FEC utilizados en las tres últimas décadas.
- b) Estudiar cómo se modifican los diseños estructurales de pavimentos considerando los factores FEC utilizados en las tres últimas décadas. Este estudio será presentado en un futuro artículo.

Para comparar los Ejes Equivalentes de diseño que se obtendrían a partir de las diferentes actualizaciones del Manual de Carreteras se siguió el siguiente procedimiento:

- Se definieron tres escenarios de tránsito que representan en promedio el tipo de tránsito (TMDA) en una carretera de: tránsito bajo, mediano y alto.
- Para cada escenario de tránsito se asumió un período de 20 años de diseño empleando tasas de crecimiento promedio típico de 16 plazas de peaje desde los años 2009 al 2017.
- Se utilizó la misma información de las plazas de peaje para obtener una distribución representativa de vehículos livianos y de las tres categorías de vehículos pesados (BIU, C2E y C+2E).
- Se calcularon los $TMDA_{Ac}$ para los tres escenarios de tránsito y categoría de vehículos.
- Los $TMDA_{Ac}$ calculados para los tres escenarios de tránsito y categoría de vehículos se transformaron en Ejes Equivalentes de Diseño empleando las tres actualizaciones del factor FEC realizadas por el Manual de Carreteras. Para determinar los valores de FEC mínimo y máximo de la actualización 2005 se asumió $pt = 2,0$ para tránsito bajo y, $pt = 2,5$ para tránsito mediano y alto.

Las Tablas 4a y 4b presentan un resumen de los resultados de ejes equivalentes empleando los diferentes FEC para pavimentos de asfalto y hormigón respectivamente.

Tabla 4a. Comparación Ejes Equivalentes de Diseño Utilizando Diferentes FEC - Asfalto

Tipo de Tránsito	TMDA	FEC 1981	FEC 1998	FEC 2005	
				Mínimo	Máximo
BAJO	1.500	3.260.000	3.480.000	1.570.000	4.220.000
MEDIANO	6.000	17.880.000	14.290.000	5.450.000	13.880.000
ALTO	15.000	60.960.000	37.850.000	12.860.000	32.780.000

Tabla 4b. Comparación Ejes Equivalentes de Diseño Utilizando Diferentes FEC – Hormigón

Tipo de Tránsito	TMDA	FEC 1981	FEC 1998	FEC 2005	
				Mínimo	Máximo
BAJO	1.500	3.520.000	4.160.000	1.720.000	4.860.000
MEDIANO	6.000	18.870.000	17.200.000	6.050.000	16.940.000
ALTO	15.000	66.610.000	45.130.000	14.290.000	40.000.000

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones de la presente publicación son:

- La metodología AASHTO entrega fórmulas para determinar los factores de ejes equivalentes para los ejes ESRD, ESRD y ETRD. La metodología no entrega fórmulas para determinar los ejes equivalentes de otros tipos de ejes que se observan comúnmente en carreteras actuales.
- Es posible determinar factores FEE para diferentes condiciones de carga empleando métodos mecanicistas. En el presente trabajo utiliza el modelo lineal elástico multicapa para pavimentos de asfalto y elementos finitos para pavimentos de hormigón y obtuvieron fórmulas de factor FEE para todo tipo de eje que circula en carreteras de Chile.
- La variación de Ejes Equivalentes de diseño producto de las variaciones del factor FEC a lo largo de las distintas actualizaciones del Manual de Carreteras es significativamente grande y no se encuentra explicación de ningún tipo. Las variaciones experimentadas por el factor FEC en las últimas tres décadas crean un nivel de incertidumbre muy importante respecto de los diseños de pavimentos realizados en el pasado, los actuales y futuros. La variación en los espesores de diseños de pavimento para un mismo tránsito es significativa. Este estudio se encuentra aún en desarrollo
- El FEC actual (FEC 2005), es de carácter regional. No obstante, una misma región puede presentar condiciones muy diferentes en su red interna de caminos.
- Para el diseño estructural de pavimentos se consideran solamente vehículos pesados los cuales corresponden a camiones y buses. Existe una gran variabilidad de buses y camiones, pero en Chile estos se agrupan solo en tres categorías: Buses Interurbanos (BIU), Camiones Simples (C2E), Camiones de más de dos ejes (C+2E). Otros países utilizan en los estudios de tránsito una clasificación

con mayor segregación para contabilizar los camiones C+2E. Utilizar una mayor segregación de vehículos pesados en mediciones de tránsito puede resultar en un estudio más exacto, no obstante, este aspecto no resulta extremadamente relevante en términos de los resultados del estudio realizado e ingeniería para el diseño.

~~• No obstante, en un futuro cercano, se recomienda separar el grupo (C+2E) en camiones semirremolque (CSR) y camiones remolque (CR) debido a que el camión CR (medido en Chile) presenta un factor FEC significativamente mayor al camión CSR.~~

- El Factor FEE depende de: a) del peso del grupo de ejes, b) del tipo de configuración de eje, c) del espesor de pavimento y d) del Índice de Serviciabilidad final (parámetro que se relaciona con el nivel de deterioro al término de la vida útil). Sin embargo, el peso del eje es el factor que más afecta el valor del factor FEE (relación exponencial).

- Una limitación de la metodología AASHTO es que entrega fórmulas para determinar los factores de ejes equivalentes solo para los ejes ESRD, EDRD y ETRD. La metodología no entrega fórmulas para determinar los ejes equivalentes de otros tipos de ejes que se observan comúnmente en carreteras actuales. Por este motivo el presente estudio requirió determinar el factor FEE para otras configuraciones de eje.

- La metodología AASHTO no permite cuantificar el efecto de los factores secundarios indicados tales como presión de inflado, ancho de rueda y suspensión neumática.

- Si bien la metodología AASHTO fue realizada bajo las condiciones particulares de los años en que se realizó la prueba (1958-1960), lo cual es un período relativamente corto, no es correcto desacreditar la metodología sobre la base de estos argumentos, como lo hacen muchos investigadores nuevos. Desde el punto de vista de la ingeniería de diseño, el método AASHTO está avalado por la experiencia y uso por más de seis décadas.

- La fórmula exponencial o regla de la cuarta potencia representa el efecto en la durabilidad del pavimento por el incremento de la carga en los diferentes tipos de ejes. No obstante, se conoce que la durabilidad del pavimento también depende del espesor y del umbral que se defina para determinar el término de la vida útil. Estos dos últimos factores afectan el valor exponencial de la fórmula en donde las fórmulas exponenciales propuestas, representan un espesor promedio recomendado por AASHTO.

- Las fórmulas exponenciales para los ejes de la prueba AASHO para ejes típicos, se obtuvieron a partir de las ecuaciones de regresión de la fórmula AASHTO y las fórmulas exponenciales para ejes no típicos se obtuvieron a partir de modelos mecanicista (estudio de esfuerzos y deformaciones).

- La variación de Ejes Equivalentes de diseño producto de las variaciones del factor FEC que ha tenido en las tres últimas actualizaciones del Manual de Carreteras es significativamente importante lo cual complica varios aspectos relacionados a la gestión de ingeniería y conservación de pavimentos. Los factores tienden a la baja lo que no se condice con lo observado en las plazas de pesaje de MOP y Concesiones.

- Las importantes variaciones del factor FEC, que se observan en las diferentes versiones del Manual de Carreteras, no permitirán realizar un estudio y evaluación objetiva de la influencia que tendría cambios en la reglamentación de pesos y configuración de camiones. No se conoce cuál es en realidad el punto de referencia. También dificulta calibrar y ajustar programas de conservación.

- Los criterios para seleccionar el valor FEC en las diferentes versiones del Manual son diferentes. Ninguno de los criterios empleados es recomendable.

- Los factores FEC actuales del Manual de Carreteras (estadística 1999) son significativamente menores a los calculados utilizando la información de las plazas de pesaje obtenidas para el presente estudio (2018). Este aspecto es uno de los más preocupantes ya que genera incertidumbre sobre los diseños realizados en los últimos años para las carreteras chilenas. La diferencia entre los valores actualmente utilizados y los valores calculados para la plaza de pesaje de Los Ángeles, la cual rige para regiones con la mayor densidad de caminos, es preocupantemente alto.

- El factor FEC actual (FEC 2005), es de carácter regional. No obstante, una misma región puede presentar condiciones muy diferentes en su red interna de caminos. Si los estudios de pesos se realizan a partir de una plaza de pesaje fijas, se debe tener en consideración que estas se encuentran principalmente ubicadas en carreteras principales en donde circula una tipología de vehículos muy

particular al tipo de región o provincia. En general, en redes primarias, se pueden observar una tipología de vehículos diferentes a las que se observan en redes secundarias y terciarias.

- La diferencia del factor FEC tendrá un impacto mayor, en términos de ejes equivalentes, en pavimentos de bajo, medio y alto volumen de tránsito. Sin embargo, los factores que afectan en mayor medida a los pavimentos de bajo volumen de tránsito (pavimentos de menor espesor) son las cargas máximas admisibles.
- Cabe hacer notar que el factor FEC 2018, utilizado en los cálculos del presente capítulo, no son conservadores. Para plazas de pesaje fijas, se conoce que existe un porcentaje (no determinado) de camiones que evaden controles o camiones que luego de ser pesados transitan con ejes retraídos.
- Existen además otros factores que podrían disminuir la exactitud de los FEC obtenidos a partir de las plazas de pesaje oficiales del MOP, a saber:
 - Para plaza de pesaje móvil, se conoce que en menos de una hora comienza la evasión de vehículos con sobrecarga o vehículos modifican la posición de ejes retráctiles.
 - La presencia de sobre-cargas puede ser mayor en sectores alejados de las plazas de pesaje o sectores con menor fiscalización.
 - En países como Chile el tipo de carga presenta un factor estacional importante y muy diferente en distintas regiones. Por ejemplo, debido épocas de siembra y cosecha.

Las principales recomendaciones de la presente publicación son:

- En un futuro cercano, se recomienda separar el grupo (C+2E) en camiones semirremolque (CSR) y camiones remolque (CR) debido a que el camión CR (medido en Chile) presenta un factor FEC significativamente mayor al camión CSR.
- La fórmula exponencial es más sencilla y permite calcular el factor FEE para diferentes tipos de eje además de los utilizados en la prueba AASHTO. Del mismo modo, la fórmula exponencial, hace más simple el procesamiento de datos obtenidos a través de plazas de pesaje fijas o en movimiento.
- Se debe realizar urgentemente una actualización completa de factores FEC del Manual de Carreteras donde la data debe ser tomada no solo para obtener factores FEC sino que se puedan producir los espectros de carga requerido por los nuevos métodos de diseño. El estudio de actualización de nuevos factores FEC no solo debe realizarse en rutas principales, sino que en rutas representativas de cada región.

No obstante, no ha sido desarrollado en la presente publicación, se considera necesario presentar un resumen de las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas del estudio completo. El cual puede ser solicitado al MOP o al autor principal.

- En cuanto al peso bruto vehicular, la normativa chilena es muy generalista. Países desarrollados y otros países las limitaciones legales de pesos se especifican según el tipo de vehículo pesado.
- En términos generales, los pesos brutos y por eje máximos permitidos en Chile son superiores al resto del Latinoamérica y el mundo en general.
- Como caso especial se recomienda, aumentar las exigencias generales de camiones con remolque de acuerdo a países desarrollados que aún utilizan esta configuración. Esta exigencia debe mejorar exigencias de configuración de ejes según magnitud de carga y sistemas de seguridad.
- El método de diseño estructural de pavimentos utilizado en Chile corresponde al Método AASHTO modificado por el MOP. El método sub-diseña en relación al método original AASHTO 93.
- La variación de espesor de pavimento es más significativa en los FEE de ejes ESRD en pavimentos de asfalto y más significativo en los ejes ETRD en pavimento de hormigón.
- El uso del eje retráctil en camiones cargados puede significar un aumento desde un 50% hasta un 1.000% del factor FEE por eje y entre 30% a un 600% aproximadamente del factor FEE de un camión.
- El eje Tándem es el eje que mayor daño puede provocar si se utiliza el eje retraído para cualquier carga sobre 11 ton. El efecto de un eje retráctil en un eje Trídem es menor relativo al eje

Tándem, pero de igual modo, el efecto destructivo es porcentualmente alto (300% para pavimento de asfalto y 200% para pavimento de hormigón aproximadamente).

- El efecto en el factor FEE en los límites de tolerancias admisibles de cargas es significativamente variable para los diferentes tipos de ejes y se desconoce los criterios considerados para determinar estas tolerancias.

- Los ejes ESRS y ESRD presentan una mayor tolerancia en términos del factor FEE.
- El argumento que se utiliza para justificar el uso de ejes retráctiles (“ahorro de combustible y menor desgaste de neumático”), son considerados más bien un paradigma. No existen estudios que soporten este argumento.

- A modo de recomendación, se propone:
 - Prohibir el uso de eje retráctil para ejes Tándem.
 - Buscar/consensuar un criterio que uniformice las tolerancias de peso por eje y limitar más la tolerancia para el eje ESRD.
 - Estudiar una posible reducción del peso máximo por eje, para el eje ESRD.
- En la prueba AASHTO se utilizó un neumático tipo Bias Ply o diagonal, los cuales fueron reemplazados por los tipos radial. Estudios indican que la diferencia en el daño generado en estos tipos de neumáticos es despreciable.

- La distribución de presión en la impronta no es uniforme y varía significativamente según carga y presión de neumático. A mayor carga y menor presión de inflado mayor es la presión de borde un neumático.

- La presión de neumático en conjunto con la carga dinámica solo afecta pavimento de asfalto tipo sellos superficiales. Para pavimentos de asfalto, la presión de neumático (alta o baja) pasa a tener un rol importante en el comportamiento de soluciones tipo sellos debido a la distribución no uniforme de la intensidad presión y la magnitud de esfuerzo de cizalle.

- La presión de neumático no afecta significativamente los pavimentos de hormigón. No obstante, tanto pavimentos de asfalto como de hormigón, se incrementa la tasa de deterioro de grietas, baches y juntas producto de la combinación de una alta presión y carga dinámica.

- Las empresas que comercializan neumáticos afirman que existen ahorros en los costos operacionales al emplear los neumáticos de rueda ancha comparada con el empleo del ESRD, en particular: ahorro en gasto de combustible. También, indican que el uso de estos neumáticos permite llevar mayor carga (al ahorrar el peso de un neumático extra) y es más fácil realizar chequeos de la presión de aire comparado a una configuración de rodado doble. Sin embargo, una significativa cantidad de usuarios de este tipo de ruedas, afirman que la conducción es más inestable, menos seguro en condiciones nieve y no otorgan margen de maniobrabilidad en caso de que una rueda ancha falle a diferencia de un eje con rodado doble.

- Los estudios en los centros de investigación comparan distintos tipos de rueda ancha con el rodado doble. La primera generación de ruedas (super single) es más destructiva que las nuevas generaciones de ruedas anchas o también llamadas NGWB.

- En términos generales, el efecto destructivo de las nuevas generaciones de rueda ancha o NGWB es igual o levemente mayor que un eje de rodado doble. Esto variará dependiendo de la estructura a evaluar y del criterio de falla considerado.

- Los modelos de elementos finitos indicaron que los neumáticos de rueda ancha generan mayor esfuerzo en la base del asfalto y mayor compresión en la parte superior de la base y la subrasante. Sin embargo, los ensayos instrumentados a escala real, indicaron que la diferencia de esfuerzos y deformaciones entre ambos tipos de ruedas es en la práctica despreciable.

- El amortiguamiento que ofrezca el sistema de suspensión a la carga dinámica, que se produce por la variación vertical de la superficie de rodado, depende de una infinidad de factores los cuales son difícil de aislar para acreditar una recomendación general respecto del uso de un tipo de amortiguador en particular. Del mismo modo los factores que afectan el amortiguamiento afectan en proporción significativa los estudios de presión y ancho de neumático.

- En general, la investigación que se ha desarrollado en el diseño de neumáticos, ruedas y sistemas de suspensión no han tenido como objetivo principal extender la durabilidad de un pavimento.

El objetivo de estos estudios y desarrollos apuntan al confort, protección de la carga y durabilidad mecánica de diversos componentes de camiones y buses.

- No se recomienda para Chile poner un incentivo a los sistemas de suspensión neumática en función de un aumento de carga debido a que las cargas máximas legales ya se encuentran sobre las cargas máximas legales de otros países y esto sin considerar la presencia de sistema de suspensión neumática. No habiendo una demostración clara de la hipótesis relacionada al deterioro del pavimento, se considera que el estado no debe ser participe en la promoción de sistemas de suspensión neumático.

- En general no se recomienda regular ninguno de los tres factores secundarios por lo complejo que resultaría controlarlos de forma efectiva en plazas de pesaje fijas o móviles. Así mismo llevar la estadística de presión de neumático, tipo de neumático, ancho de rueda, sistema de suspensión asociado a todas las categorías de vehículos, ejes y cargas.

- No es posible definir con exactitud un escenario base para estudiar y comparar con un escenario futuro, el efecto que tendría en los espesores de estructuras de pavimento y su desempeño frente a un posible aumento de los límites de carga y tipología de camiones. Esto, debido a que los factores FEC que se utilizan en la actualidad (para el cálculo de Ejes Equivalentes y diseño de pavimentos), son menores a la realidad. Del mismo modo, también es difícil diseñar un escenario futuro debido a que es muy complejo modelar una estratigrafía de cargas para una carretera y aún más complejo modelar la red secundaria de caminos de las diferentes regiones del país.

- Por los motivos anteriores, se planteó un estudio de sensibilidad para evaluar el déficit estructural actual de los pavimentos sobre la base de la información de datos existentes correspondientes a las plazas de pesaje de la Región Metropolitana y Región del Bío Bío. Por este último motivo los resultados de este estudio solo se podrían considerar “representativo” para la red principal de caminos de la Región Metropolitana y red principal de caminos de la Región del Bío Bío.

- De los estudios y resultados presentados en los Capítulos 3 al 7, queda categóricamente indicado (y demostrado) que no se recomienda modificar los límites legales de las cargas por eje y tampoco queda recomendado aumentar las tolerancias de control. Es más, se recomienda disminuir la tolerancia admitida para los ejes tipo ESRD (Eje Simple Rueda Doble) y se recomienda prohibir el uso de ejes retractiles para todo tipo de camión. Se propone una sola excepción de aumento de carga por eje y esta es, el aumento de carga límite del eje direccional de Buses Inter Urbanos (BIU) siempre y cuando no esté asociado a otros factores de seguridad y desempeño de este tipo de vehículos. Esta situación se analizará con mayor detalle en Capítulo 9, Sección 9.4.

- Cualquier política que se ponga en práctica a futuro deberá primeramente actualizar los factores FEC. En estudios independientes y los realizados en el presente proyecto se demuestra que los factores FEC son mayores a los actuales del Manual de Carreras y además se estima que la tendencia es que, estos factores se mantengan o aumenten, aún sin modificar la reglamentación debido a las siguientes razones:

- Para vías principales (Ejemplo: Ruta 5, vías a puertos y fronteras principales), los sistemas de gestión de transporte están logrando cada vez más una optimización de transporte de cargas lo que conlleva a una disminución de viajes de camiones vacíos y por lo tanto un subsecuente aumento del factor FEC promedio.

- Para vías secundarias (que incluye un gran número de vías transversales) se pueden presentar uno o más de los siguientes factores: cargas direccionales (en donde el factor FEC queda controlado por la dirección de las cargas direccionales), menor control de pesos, empleo de ejes retractiles sin respetar normativas.

- Un pavimento de asfalto menor a 9,5 cm podría experimentar falla prematura por aumento de cargas legales. También, se puede concluir que cualquier capa de asfalto menor a 6,5 cm podría presentar fallas prematuras aun con las cargas legales vigentes (11 ton). Más aún cualquier capa de asfalto menor 10 cm podría presentar fallas con la carga legal vigente más su tolerancia (11,8 ton).

- Un pavimento de hormigón de espesor menor a 18 cm podría fallar por carga legal. En la actualidad el espesor mínimo de losa que especifica el MOP es de 18 cm por lo cual un aumento del límite legal de cargas afectará a todos los pavimentos que presenten el diseño de espesor mínimo de 18 cm y obviamente espesores menores en pavimentos urbanos (no administrados por el MOP) en donde es posible encontrar espesores de hasta 13 cm. Más aún, si se considera la actual tolerancia al límite

legal de las cargas (11,8 ton) el espesor mínimo para la cual la losa de concreto podría fallar es de 19 cm.

- En Chile se utiliza un gran número de estructura de pavimentos de asfalto menor a 10 cm de espesor y pavimentos de concreto menor a 18 cm por lo cual no se recomienda (bajo ningún motivo) el aumento en los límites de cargas legales. Todos los estudios de sensibilidad se realizaron sobre un escenario más bien optimista por lo cual no hay mucho más que se pueda afinar este trabajo si se desea obtener otra conclusión.

- Se recomienda permitir un incremento de la carga legal a 8 ton en eje direccional de BUI (Buses Inter Urbanos), si y solo si, se utiliza rueda ancha. El límite de 7 ton se debe mantener de forma muy estricta si se utiliza rueda estándar tanto por un tema de seguridad como por su efecto en la estructura de pavimento. El estudio de la Comunidad Europea (revisado en Sección 6.3), definió un nuevo concepto con el cual se evalúa de forma relativa el grado destructivo de diferentes tipos de ruedas y cargas, lo cual permitiría respaldar el aumento de 1 ton de carga máxima en un eje simple, pero que utilice rueda ancha.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Obras Públicas por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Bibliografía

- AASHTO (1993). *AASHTO AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, D.C., EUA.
- Addis, R. R. (2002). COST 334: *Effects of wide single tyres and dual tyres*. European Commission, Directorate General Transport Aimar, F. (2014). El uso del Camión Bitren en Argentina.
- Díaz, R., Echaveguren, T., & Vargas-Tejeda, S. (2012). *Heavy load trucks and its impact in life cycle of asphalt pavements*. *Revista de La Construcción*, 11(1), 101–118. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100010>
- Highway Research Board (1962). *The AASHO Road Test, Report 7, Summary Report*. Washington D.C., EUA: National Academy of Sciences – National Research Council
- Huang, Y.H. (2004) *Pavement Analysis and Design*. PEARSON, Prentice Hall, Kentucky.
- Kawa, I., Zhang, Z., y Hudson, W. R. (1998). *Evaluation of the AASHTO 18-Kip Load Equivalency Concept*.
- Garnica, P. (2009). *Espetros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos*.
- Ministerio de Obras Públicas (1981). *Manual de Carreteras de Chile Vol. 3 Instrucciones y de Diseño*.
- Ministerio de Obras Públicas (2002). *Manual de Carreteras de Chile Vol. 3 Instrucciones y Criterios de Diseño*.
- Ministerio de Obras Públicas (2019). *Manual de Carreteras de Chile Vol. 3 Instrucciones y Criterios de Diseño*.
- National Copperative Highway Research Program. (1993). Report 353. *Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*.
- Oliveira, T., Dias, S., Nunes, H., y Pelegrini, M., *Load Equivalency Factors for off-road trucks*
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (1998). *Dynamic Interaction Between Vehicles And Infrastructure Experiment (DIVINE)* (Vol. 6).
- Ortega, A., Vassallo, J. M., & Pérez-martínez, P. J. (2011). *Efecto de la implantación del Megatruck de 60 Toneladas en España*.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement Design and Materials* (John Wiley & Sons, Ed.). New Jersey.
- Parker, A. (2004). *Generación de Espetros de Carga por Eje para Ruta de la Región Metropolitana*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Prozzi, J. A., & de Beer, M. (1997). *Equivalent damage factors (EDFs) for multiple load and axle configurations*. World Meeting of the International Road Federation, Toronto, Canada.
- Scala, A. J., Cogill, W. J., & McNeil, A. (1970). *Comparison of the Response of Pavements to Single and Tandem Axle Loads*. Fifth ARRB Conference (5A), 2321–252.
- Vasquez, M. (2016). *Factores de Equivalencia de daño en pavimentos flexibles: análisis para condiciones típicas de Argentina*.
- Van Til, C., J., McCullough, B., A. y Varga, B., A. (1972). *Evaluation of AASHO Intern Guide for Design of Pavement Structures*. NCHRP Report 128
- Vuong, B., & Jameson, G. (2003). *Equivalent load for a quad axle. Proceedings - Conference of the Australian Road Research Board*, 21, 2375–2391.
- Witczak, M., W. *Equivalent Wheel Load Factor*. Report prepared for Association of American Railroads. University of Maryland, EUA.
- Zhang, Z. Kawa, I. y Hudson, W. R. (2005). *Impact of Changing Traffic Characteristic and Environmental Conditions On Performance of Pavements*.