

IMPACTO DE CAMIONES DE ALTO TONELAJE EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Rodrigo Díaz

M. Sc. – Investigador – Universidad de Concepción, Chile
roddiaz@udec.cl

Tomás Echaveguren (Autor para correspondencia)

Dr. Cs. – Profesor Asociado – Universidad de Concepción, Chile
techaveg@udec.cl

Sergio Vargas-Tejeda

Dr. Cs. – Profesor Asistente – Universidad del Bio Bio, Chile
svargas@ubiobio.cl

RESUMEN

Para mejorar la competitividad del transporte de carga en la región del Bio Bio los operadores de transporte tienen el interés de elevar la capacidad máxima de carga permitida por la ley hasta 60 t, proponiendo como alternativa el uso del camión bitrén. En Chile no existe experiencia del uso de este tipo de vehículos ni investigaciones acerca del impacto de este tipo de vehículos en el sistema de transporte por lo que es necesario estudiar el impacto global que tendrían inicialmente en los pavimentos y luego en otros aspectos tales como el diseño geométrico la seguridad, logística del transporte, puentes entre otras.

En este trabajo se presenta la evaluación del impacto de configuraciones carga de alto tonelaje sobre pavimentos asfálticos. Utilizando un enfoque mecanicista-empírico, se estudió el daño relativo de bitrenes corto, largo, camiones remolque y tracto-semiremolque. Se consideraron diferentes estructuras de pavimento y condiciones climáticas representativas del sur del país. Se obtuvieron estados tensionales, factores de daño por ahuellamiento, agrietamiento y envolventes de deflexión superficial. La modelación se realizó con el modelo mecanicista de diseño de pavimentos Alize-LCPC, de origen francés.

Los resultados mostraron que el camión bitrén largo de 75 t produce un impacto estructural levemente menor que el bitrén corto de 61 t. En comparación con los vehículos que admiten mayor tonelaje en Chile, se encontró que el camión remolque produce mayor deterioro sobre pavimento mientras que el tracto-semiremolque produce menor daño al estar ambos cargados hasta un peso bruto total de 45 t en consistencia con los resultados de ensayos empíricos de fatiga acelerada vistos en la literatura. Sin embargo, los bitrenes corto y largo producen mayor deflexión superficial en forma proporcional al peso bruto total, por lo cual el análisis de daño utilizando sólo el factor de daño es insuficiente para dimensionar la magnitud del daño de este tipo de camiones.

Palabras Clave: Pavimento asfáltico – camión de alto tonelaje – ahuellamiento – agrietamiento – deflexiones.

1.- INTRODUCCION

El transporte terrestre es el principal medio de carga utilizado en la zona sur de Chile. A su vez, el camión con remolque representa un 74% de la partición modal del transporte de carga (SECTRA, 2006). Este importante rol en la productividad regional y nacional ha despertado el interés de los operadores de transporte de carga en elevar la capacidad máxima de carga permitida por la ley hasta 60 t, con el objetivo de mejorar la eficiencia y competitividad desde el punto de vista productivo y operacional. En consecuencia, se ha iniciado un debate sobre la factibilidad técnico-económica de introducir en la flota de transporte nuevas configuraciones de carga, las cuales aumentan el peso bruto total del vehículo (tara + carga), distribuyendo la carga sobre un mayor número de ejes entre ellas el denominado "camión bitrén".

El tonelaje máximo legal de carga permitido en Chile está regulado por el Decreto MOP 158/1980 (MOP, 1980), el cual determina los pesos máximos por eje y limita el peso bruto total a 45 t. Los operadores de transporte de carga argumentan que con la inclusión de configuraciones de carga de alto tonelaje disminuye el consumo de combustible, el desgaste de los equipos y la contaminación por tonelada transportada, lo cual se traduce en mayor competitividad y eficiencia en el transporte. En el ámbito internacional en tanto, solo en algunos países se utilizan configuraciones de alto tonelaje, en concordancia con la tendencia al uso de camiones modulares utilizados para movilizar contenedores de 20 ft y 40 ft (Nagl, 2007).

Puesto que en Chile no existe experiencia en el uso de vehículos con tonelajes superiores a los establecidos por el decreto MOP 158/1980, es prudente cuestionar el impacto global que tendrían en el sistema de transporte interurbano, en el caso de ser implementados.

Desde este punto de vista, estudios como el realizado por los Departamentos de Transporte de Estados Unidos, Reino Unido y Suiza, muestran diversas temáticas que han sido abordadas para de implementar regulaciones de peso límite por eje, peso bruto total y longitud máxima permitida legal de sus flotas de transporte de carga pesada. Particularmente para configuraciones de alto tonelaje los siguientes aspectos han sido tomados en consideración al evaluar el uso o no de camiones de alto tonelaje (DOT, 2004; DfT, 2008, Vierth, et al 2008; Leduc, 2009):

- Impacto en el deterioro de pavimentos
- Impacto estructural en puentes
- Características de operación (*Off-tracking*, estabilidad, adelantamiento, etc.)
- Compatibilidad geométrica con la infraestructura vial existente
- Efectos en la seguridad y accidentabilidad
- Consumo de combustible, contaminación, emisiones, ruido.
- Impacto en otros modos de transporte de carga y en la cadena logística en general
- Requerimientos de seguridad activa y pasiva y regulaciones técnicas de ingreso al mercado.

Este trabajo en particular discute solamente el impacto producido por configuraciones de carga de alto tonelaje (CAT) en el deterioro de pavimentos asfálticos, a fin de comprender y dimensionar la problemática y orientar la evaluación de las CAT para su posible incorporación al sistema de transporte nacional.

En este sentido, este trabajo no pretende reafirmar los beneficios de las CAT por sobre otras configuraciones de carga utilizadas actualmente sino que más bien evaluar en el contexto de la flota de transporte de carga que circula hoy en Chile el efecto sobre una de las 8 características que al menos deben evaluarse antes de tomar una decisión al respecto y que tiene que ver directamente con estado de la infraestructura vial.

2.- LAS CONFIGURACIONES DE ALTO TONELAJE

El término “Configuraciones de Alto Tonelaje”, (CAT), se refiere a las combinaciones de tractos, camiones, remolques y semi-remolques utilizadas para transportar carga pesada, que resulten en un peso bruto total superior a las 45 t.

Las CAT se pueden clasificar en dos grupos: “Bitrén” y “Rodotrén”. En el primero, dos o tres remolques están acoplados exclusivamente mediante el uso de quinta rueda y dan origen a una combinación más corta que los rodotrenes. Estos últimos, resultan del uso de *Dolly* o combinaciones de *Dolly* con quinta rueda para realizar el acoplamiento de dos o más remolques.

El desarrollo de políticas de transporte de carga pesada ha sido una preocupación en países como Australia, Canadá, Brasil, Suecia, Finlandia, Holanda y Estados Unidos, entre otros. De estos países, sólo Australia, Brasil y Canadá tienen políticas de transporte de alto tonelaje bien definidas, que garantizan la operación de CAT en todo el país. Australia es el país con más experiencia en el mundo en el transporte de alto tonelaje, cuenta con una acabada regulación en cuanto a seguridad, permisos de circulación, distintos niveles de privilegios para los operadores según exigencias de acreditación, y rutas especialmente habilitadas para distintos niveles de carga (NTC, 2006a, 2006b, 2006c, 2009).

Canadá, en los últimos 20 años, ha logrado un importante desarrollo en cuanto a investigación y desarrollo de políticas asociadas a CAT, con lo cual han implementado acuerdos de transporte interprovincial que permiten la operación de CAT en todo el país (MOU, 2009). En el caso de implementar CAT en Chile, es posible que se adopte la tecnología de Brasil, ya que es el único país latinoamericano con mayor experiencia en el desarrollo, operación y legislación sobre transporte de alto tonelaje.

Por otro lado, la legislación internacional muestra que países que utilizan CAT imponen rigurosas exigencias de control a estos vehículos para acceder a caminos exclusivamente habilitados para acogerlos, permisos especiales de circulación y una legislación rigurosa que controla el peso bruto total y el peso límite por eje, dependiendo de la distancia entre ejes y la longitud total.

3.- IMPACTO DE LOS CAT EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

Existe evidencia teórica y experimental que muestra que diferentes tipos de camiones con distintas configuraciones de ejes, contribuyen en forma diferente al deterioro de un pavimento. Las investigaciones revisadas utilizan diferentes enfoques para estudiar los deterioros causados por configuraciones de carga pesada en pavimentos asfálticos. Todas confluyen hacia la necesidad de estudiar el impacto del peso bruto total y del peso por eje en la respuesta estructural del pavimento para cada situación particular de carga.

Gillespie et al. (1993) utilizaron un enfoque teórico-mecanicista para evaluar la interacción entre vehículos pesados y el deterioro de pavimentos, considerando configuraciones de carga con peso bruto total entre 15 y 52 t. Concluyeron que la deformación permanente en pavimentos flexibles está determinada por el peso bruto total de vehículos pesados. Por el contrario, sus resultados mostraron que el agrietamiento por fatiga no está relacionado con el peso bruto total, siendo su magnitud directamente proporcional a la carga individual por eje, según tipo de eje y sus características de suspensión.

Chatti y El Mohtar (2004) estudiaron la vida de fatiga de una mezcla asfáltica bajo diferentes configuraciones de vehículos pesados mediante un ensayo cíclico de tensión indirecta, utilizando pulsos de carga equivalentes a la pasada de un conjunto completo de ejes de camión. En su evaluación consideraron 20 configuraciones distintas de vehículos pesados, cubriendo un rango de dos hasta 11 ejes. Los resultados obtenidos por Chatti y el Mohtar muestran que el daño producido por tonelada de carga transportada disminuye con el uso de configuraciones de ejes múltiples (tándem y tridem). Es decir, al incrementar el número de ejes para un mismo nivel de carga, disminuye el agrietamiento por fatiga.

Salama y Chatti (2006) evaluaron el efecto de múltiples configuraciones de camiones pesados en el ahuellamiento de pavimentos asfálticos, utilizando un modelo empírico-mecanicista calibrado con datos de laboratorio. El modelo que utilizaron considera la contribución al ahuellamiento que aporta cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento. Los resultados de Salama y Chatti (2006) muestran que hay muy poca interacción entre ejes en la respuesta de deformación vertical en las capas superiores (carpeta asfáltica y base), y que esta interacción entre ejes se incrementa con la profundidad hasta hacerse significativa en la subrasante. Despreciando la interacción entre ejes en las capas superiores del pavimento, los resultados del análisis muestran que el ahuellamiento es proporcional al peso bruto total si se considera el pulso completo de carga en la evaluación.

Salama et al (2006) estudiaron el efecto de camiones pesados con ejes múltiples en el deterioro de pavimentos asfálticos. En su estudio consideraron configuraciones de camiones con niveles de peso bruto total desde 6 hasta 68 t, concluyendo que los camiones con ejes simples afectan en mayor medida el agrietamiento por fatiga que aquellas configuraciones de carga pesada con conjuntos de ejes múltiples (tándem y tridem). Sin embargo, camiones con un mayor peso bruto total tendían a producir mayor ahuellamiento.

4.- MODELACION DE DAÑO RELATIVO DE LAS CAT

Para estudiar el daño relativo que producen las CAT en pavimentos asfálticos, se consideraron escenarios de evaluación representativos de la región del Bio Bio,. Para cada uno de estos escenarios y para una configuración específica de carga se evaluó el factor de camión (FC), el cual es válido para una determinada combinación de estructura de pavimento, temperatura de servicio y velocidad de operación. El factor de camión se utilizó como base de comparación en el contexto de la flota de transporte de carga que circula por la región del Bio Bio de acuerdo a SECTRA (2006). El procedimiento utilizado en el estudio consistió en:

- Caracterización de Configuraciones de Carga. Se definieron 4 tipos de camiones, 2 CAT y 2 estándares, a los cuales se les definió la configuración geométrica de ejes, peso por eje, y peso bruto total. La elección de los 4 tipos de camiones se realizó considerando la flota que actualmente circula por el país y los 2 tipos de CAT que potencialmente ingresarían a Chile.
- Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos. Se diseñaron 3 estructuras de pavimento siguiendo el método AASHTO, en base a las recomendaciones de Pradena (2008), representando estructuras, débiles intermedias y fuertes.
- Modelación mecanicista. Se realizó una modelación mecanicista de los pavimentos aplicando en cada corrida la configuración de carga completa. Para ello se utilizó el software Alize-LCPC, de origen francés.

4.1.- Caracterización de Cargas

Para caracterizar las solicitaciones de tráfico se realizó un análisis del mercado nacional caracterizando marcas, dimensiones, pesos, y oferta de marcas en Chile y de fabricantes. El detalle de este estudio puede verse en Díaz (2011). El resultado de dicho estudio permitió definir las características de los camiones a modelar. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2. En ella se muestran los camiones bitren corto, bitren largo camión remolque y semi-remolque. Estos últimos 2 son los con mayor presencia en el parque vehicular de transporte de carga en el país según SECTRA (2006).

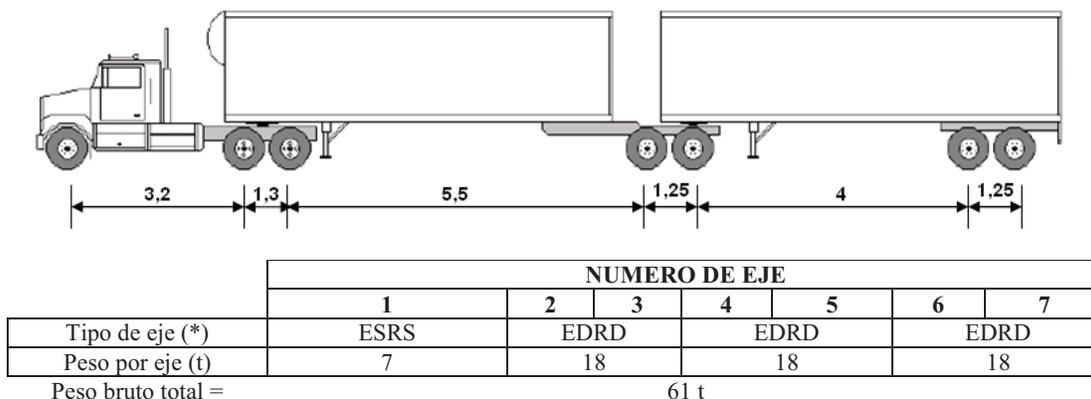


Figura 1a Caracterización de la configuración tipo bitrén corto (C1)

(*) ESRS: eje simple rueda simple; EDRD: eje doble rueda doble; ETRD: eje triple rueda doble

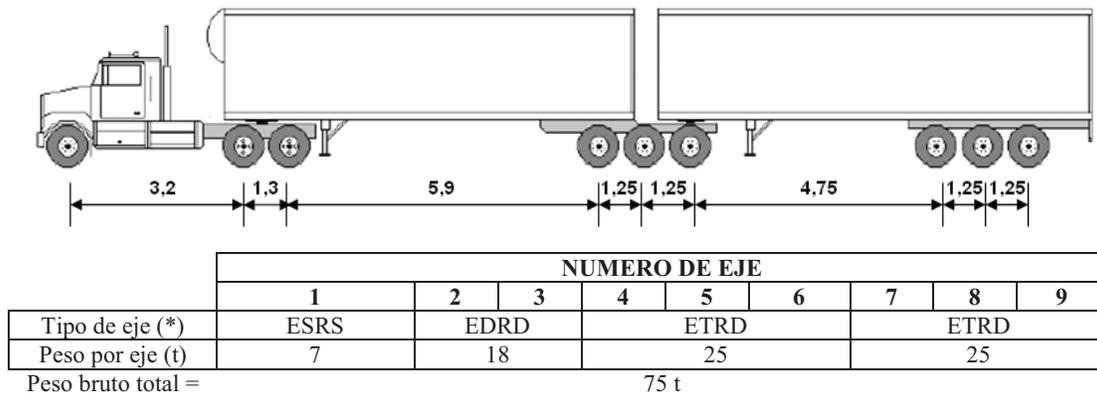


Figura 1b: Caracterización de la configuración tipo bitrén largo (C2)

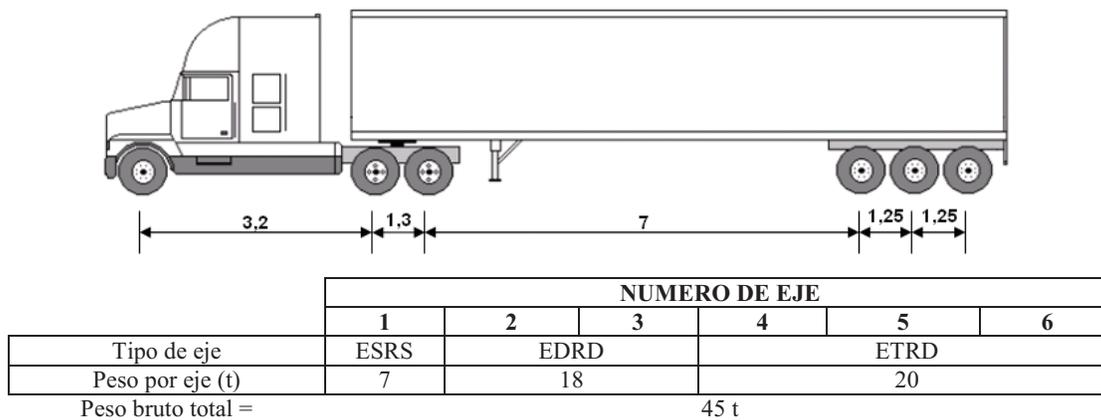


Figura 1c Caracterización de la configuración tipo tracto-semiremolque (C3)

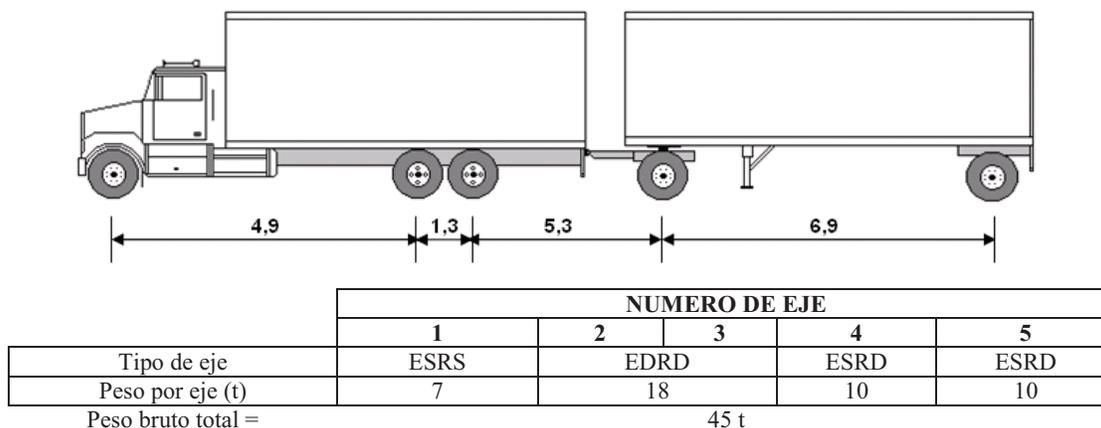


Figura 1d Caracterización de la configuración tipo camión-remolque (C4)

Las configuraciones de carga C1 y C2, corresponden a camiones Bitren que operan actualmente en Brasil (MdC, 2008), en tanto que las configuraciones C3 y C4, corresponden a las más usadas en Chile y que también se encuentran operando en flotas de Estados Unidos, Suiza y Canadá entre otros países (SNRA, 1999; USDOT, 2004; MTQ, 2005; MOU, 2009).

4.2.- Estructuración de Pavimento

La capacidad estructural de un pavimento debe ser adecuada a las solicitaciones de tráfico. Estas últimas se estimaron en base al trabajo de Merino (2010). Para mantener coherencia entre los niveles de tránsito y la estructuración de pavimentos, se utilizaron los rangos de valores de número estructural del concreto asfáltico propuestos por Pradena (2008).

Asimismo, se realizó un análisis y adaptación del valor del módulo dinámico, teniendo en cuenta su variabilidad respecto del clima, lo cual se traduce también en una variabilidad en las resistencias y en los estados tensionales en el pavimento. Posteriormente se aplicó el método de diseño AASHTO 1998 recomendado en el Manual de Carreteras para Chile (MOP, 2010) para obtener los diseños estructurales de referencia para el estudio. El resultado final del diseño se resume en la Tabla 1.

Tabla 1 Caracterización de estructuras de pavimento usados para modelar CAT

Carpeta asfáltica			
Espesores h_1 (mm)	110	140	190
Coefficiente de Poisson	0,35		
Base granular			
Espesores h_2 (mm)	120	150	150
Módulo resiliente (MPa)	280		
Coefficiente de Poisson	0,35		
Subbase granular			
Espesores h_3 (mm)	120	150	200
Módulo resiliente (MPa)	160		
Coefficiente de Poisson	0,35		
Subrasante granular			
Módulo resiliente (MPa)	77		
Coefficiente de Poisson	0,40		

Las propiedades elásticas de la carpeta de rodado, varían a lo largo de la vida del pavimento dependiendo de las condiciones de temperatura y velocidad de carga. Este comportamiento visco-elástico fue considerado mediante el módulo dinámico bajo diferentes condiciones de operación. En la Tabla 2 se muestran los resultados de esta caracterización para distintos tipos de asfalto, clima y velocidad de aplicación de carga.

Tabla 2 Valores de módulo dinámico (E^* , MPa) utilizados en el análisis

Condición de Operación	Asfalto CA 60-80		Asfalto CA 80-100	
	25 km/h (5Hz)	70 km/h (10Hz)	25 km/h (5Hz)	70 km/h (10 Hz)
Invierno (12°C)	8.800	9.800	6.500	7.400
Promedio (18°C)	6.000	6.800	4.300	5.000
Verano (25°C)	3.700	4.300	2.600	3.100

4.3.- Modelación Mecanicista del estado tensional en el pavimento

Para la evaluación del estado de tensión-deformación, se utilizó el software de análisis de estructuras de pavimento Alize-LCPC. Este software utiliza la teoría elástica multicapa de Burmister para obtener una solución analítica del estado tensional del pavimento considerando los siguientes supuestos:

- Las propiedades de los materiales son homogéneas dentro de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento
- Cada una de las capas tiene un espesor finito uniforme, excepto el suelo de fundación que se asume semi-infinito.
- Todas las capas son infinitas en la dirección horizontal
- El comportamiento de los materiales que constituyen las distintas capas del pavimento es lineal elástico e isotrópico
- La carga aplicada sobre la calzada se modela como una impronta circular

Existen otros programas computacionales que realizan este tipo de análisis. Por ejemplo: BISAR, MEPADS, ELSYM5, EVERSTRESS. Por su parte, Alize-LCPC es el único software que permite modelar numerosas configuraciones y puntos de carga sin necesidad de separar grupos de ejes, con lo cual se puede construir una envolvente del estado de tensiones, deformaciones o deflexiones que genera la carga completa de un camión sobre la estructura del pavimento y la subrasante.

4.4.- Modelación de Fatiga por agrietamiento

La forma funcional más usada para este caso es la función de las deformaciones críticas por tensión, y el módulo elástico de la mezcla asfáltica. En este estudio, se utilizó la calibración de éste modelo desarrollada por el Asphalt Institute (1981) (Ver Ec. 1).

En ésta versión del modelo, la segunda etapa de agrietamiento, o propagación vertical de las grietas, está considerada por medio de un factor de ajuste $C = 18,4$. Este factor de ajuste considera como criterio de falla un nivel de agrietamiento del 20 % en la huella de circulación.

$$N_f = 18,4 \cdot 10^M \cdot 6,167^{-5} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,291} \cdot \left(\frac{1}{E^*}\right)^{0,854} \quad (1)$$

En que:

- M : Factor de corrección por composición de la mezcla que depende del diseño de la mezcla asfáltica
 N_f : Numero de repeticiones de carga para que se produzca el agrietamiento por fatiga.
 ϵ_t : Deformación horizontal de tracción en el inferior de la capa asfáltica ($\mu_{def} \times 10^6$).
 E^* : Módulo dinámico de la capa asfáltica (MPa).

4.5.- Modelación de Fatiga por Ahuellamiento Superficial

Para este deterioro, se supuso que la falla por deformación permanente está relacionada con niveles excesivos de tensión-deformación inducidos por las repeticiones de carga en la superficie de la subrasante. Según el modelo empírico del Asphalt Institute (1981), la relación entre la falla por ahuellamiento, y las deformaciones verticales de compresión en la parte superior del suelo de fundación, está representada por el número de aplicaciones de carga según la Ec. 2. En este modelo, el criterio de falla se define como el número mínimo de repeticiones de carga que causan 13 mm de ahuellamiento superficial.

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{4,477} \quad (2)$$

En donde:

- N_d : Numero de repeticiones de carga para que se produzca la falla por ahuellamiento.
 ϵ_v : Deformación vertical de compresión en la parte superior de la subrasante, en $\mu_{def} \times 10^6$.

4.7.- Estimación del Factor de Camión

Para comparar el daño que producen distintas configuraciones de carga sobre una misma estructura de pavimento se utilizó el factor de camión (FC). Este representa el daño relativo que produce en el pavimento una determinada configuración de carga con respecto a un eje estandarizado.

En este estudio, se adoptó la definición AASHTO de eje estándar, que corresponde a un eje simple de rueda doble (ESRD) con 80 kN de carga y una presión de inflado de los neumáticos de 80 psi. Se determinó agregando el daño relativo de cada eje (Factor de Eje Equivalente), en función de la vida de fatiga del eje estándar y de cada eje de las configuraciones de camión de la Figura 1.

El estado tensional asociado a cada eje de cada camión se obtuvo a partir de la evaluación mecanicista realizada con el software Alize – LCPC. Este cálculo se realizó considerando la vida de fatiga por ahuellamiento y agrietamiento, para cada uno de los escenarios de la Tabla 3 siguiente.

4.8.- Escenarios de Evaluación

Se consideraron escenarios de evaluación representativos de la región del Bio Bio para distintas estructuras de pavimentos, temperaturas de la carpeta de rodado, y velocidades de operación. En la Tabla 3 se muestra la matriz factorial en que fueron agrupadas las distintas combinaciones de evaluación.

Tabla 3 Escenarios de evaluación considerados en la modelación

CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CONDICION DE OPERACIÓN																											
	INVIERNO (12°C)								PROMEDIO (18°C)								VERANO (25°C)											
	25 km/h				70 km/h				25 km/h				70 km/h				25 km/h				70 km/h							
BAJA	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
MEDIANA	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
FUERTE	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
BAJA (CA 80-100)	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4

Las condiciones operacionales de temperatura y velocidad de carga, están asociadas al valor del módulo dinámico de la carpeta asfáltica, el cual depende del tipo de ligante asfáltico utilizado en la mezcla. Para todos los casos de evaluación se consideró un asfalto estándar CA 60-80, y para la estructuración débil, un ligante blando del tipo CA 80-100.

5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para estimar el daño relativo se consideraron 2 indicadores: el factor de camión (FC), que corresponde a la suma de los daños relativos de todos los ejes del camión respecto de un eje estándar de 8.17 t, y las deflexiones, que permiten visualizar las deformaciones de toda la estructura del pavimento. El factor de camión se calculó para las condiciones de agrietamiento y ahuellamiento. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

5.1.- Estado Tensional

Se verificó la tensión en cada una de las capas de pavimento para todos los escenarios de la Tabla 3, los 4 tipos de camiones y para cada eje por camión. Las tensiones máximas en la subrasante no superaron los 0,1 MPa. Asimismo, se verificó que para los casos más desfavorables, estas tensiones se disiparon totalmente entre los 2,1 y 2,4 m de profundidad respecto de la superficie del pavimento. Por su parte, las tensiones máximas alcanzaron los 0,6 MPa en promedio en todos los casos. En ningún caso los valores de tensiones alcanzaron las tensiones admisibles de los materiales por lo cual este análisis no se realizó con mayor detalle.

5.2.- Agrietamiento

Independiente de la configuración de carga considerada, el agrietamiento por fatiga es mayor en la estructura más débil de pavimento, y disminuye a medida que éste aumenta su rigidez, ya sea en términos de su espesor o del módulo elástico de la mezcla. Estos resultados son consistentes con el comportamiento reológico del asfalto y el modelo de agrietamiento utilizado.

Por lo tanto, el caso más desfavorable corresponde a una estructuración débil en condiciones elevadas de temperatura (verano). En la Figura 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para ésta condición de operación, considerando un ligante asfáltico estándar CA 60-80. Para una condición de operación de verano y una velocidad de carga de 25 km/h, considerada como lenta, la configuración de carga que produce un mayor deterioro por agrietamiento es el camión-remolque, con un FC que va desde 6,2 hasta 6,7 dependiendo de la capacidad estructural del pavimento.

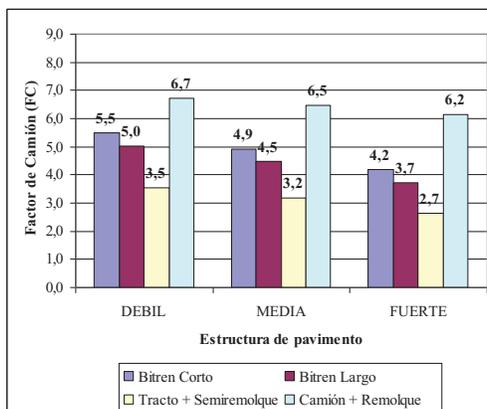


Figura 2 Agrietamiento por fatiga en verano y carga lenta (25 km/h)

La que produce menor daño es el tracto-semiremolque, con un valor del FC igual a 3,5 en el caso más desfavorable. Las CAT se encuentran en un punto intermedio, donde el bitrén corto de 61 t produce un mayor impacto estructural que el bitrén largo de 75 t. Para el bitrén corto, se obtuvieron valores del FC que van desde 4,2 para una estructuración fuerte hasta 5,5 en el pavimento más débil. En el caso del bitrén largo, el FC varía entre 3,7 y 5,0 dependiendo de la estructura. A pesar de la variabilidad entre la forma en que cada una de estas configuraciones de carga contribuye al agrietamiento por fatiga, existe un patrón de comportamiento claramente definido y consistente con la respuesta esperada del pavimento.

5.3.- Ahuellamiento

Para las configuraciones tradicionales (semirremolque y tracto-semiremolque) se obtuvieron resultados consistentes con el comportamiento esperado del pavimento, es decir, el ahuellamiento es mayor en pavimentos con capacidad estructural débil y/o elevadas temperaturas de servicio. Por el contrario, para las CAT el comportamiento del ahuellamiento es más variable, y no hay una tendencia definida que sea válida para todas las condiciones de evaluación.

Los valores obtenidos muestran que para una mezcla asfáltica elástica, asociadas a condiciones de operación de verano, el ahuellamiento superficial es mayor en la estructura más débil, y disminuye a medida que el pavimento tiene mayor capacidad estructural. Además, el ahuellamiento es sensible a la configuración de carga, y las diferencias son marcadas entre cada una de ellas (Figura 3).

Para una estructura de pavimento débil, los valores del FC ordenados de mayor a menor impacto por ahuellamiento son: 8,8 para el camión-remolque, 6,8 para el bitrén corto, 5,9 el bitrén largo y 4,2 el tracto-semiremolque. Estos valores representan la interacción más crítica entre el pavimento y las configuraciones de carga. En pavimentos con una capacidad estructural media y fuerte, el nivel de deterioro que producen las CAT por ahuellamiento es independiente de la estructuración, ya que el valor del FC se mantiene constante en 6,0 para el bitrén corto y en 5,1 para el bitrén largo. Para las configuraciones tradicionales los resultados muestran una leve dependencia de la estructuración. Para el camión-remolque el valor del FC varía entre 8,0 y 7,6, y para el tracto-semiremolque varía entre 3,4 y 3,1.

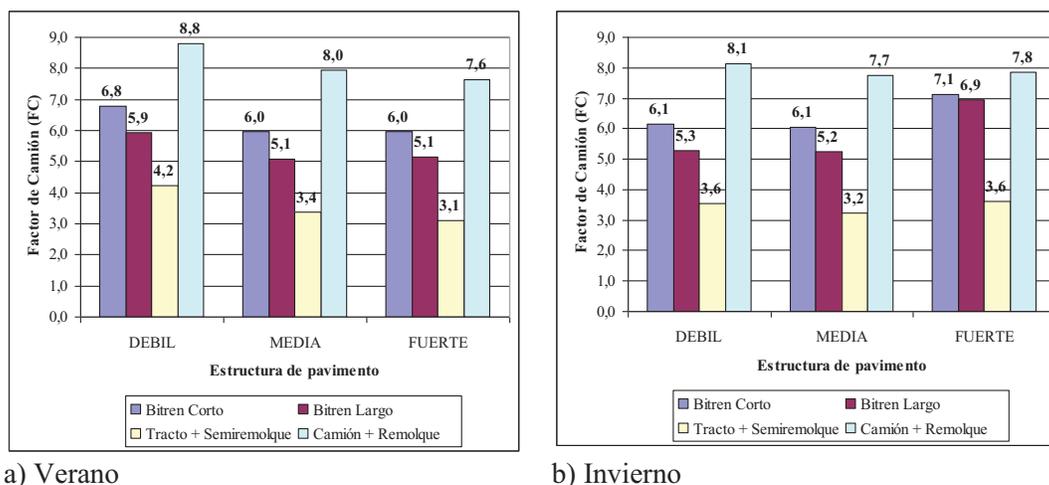


Figura 3 Daño relativo por Ahuellamiento para carga lenta (25 km/h)

En pavimentos con una capacidad estructural fuerte, el nivel de deterioro que producen las CAT por ahuellamiento es independiente de la configuración de carga. Para el bitrén corto, se obtuvo un resultado del FC igual a 7,1, el cual es prácticamente igual al FC de 6,9 obtenido para el bitrén largo. Además, estos valores del FC son de un orden de magnitud cercano al valor de 7,8 obtenido para el camión-remolque. Este comportamiento es consistente con el hecho de que el pavimento es menos sensible al ahuellamiento a medida que aumenta su rigidez.

5.4.- Deformaciones

La deformación permanente de la capa asfáltica ocurre por la acumulación de deformaciones plásticas pequeñas de la mezcla que ocurren cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. El asfalto y la mezcla exhiben un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, esto es, las deformaciones corresponden a una combinación entre deformación plástica y elástica. A continuación se presentan las envolventes de deflexiones obtenidas para cada una de las configuraciones de carga, considerando una estructura de pavimento débil, y una velocidad de carga de 25 km/h considerada como lenta.

Para el bitrén corto, la deflexión instantánea máxima obtenida es de 1,2 mm bajo el eje tándem del primer semi-remolque. La envolvente de deflexión muestra un valor promedio aproximado de 0,4 mm asociado a toda la configuración de carga (Figura 4).

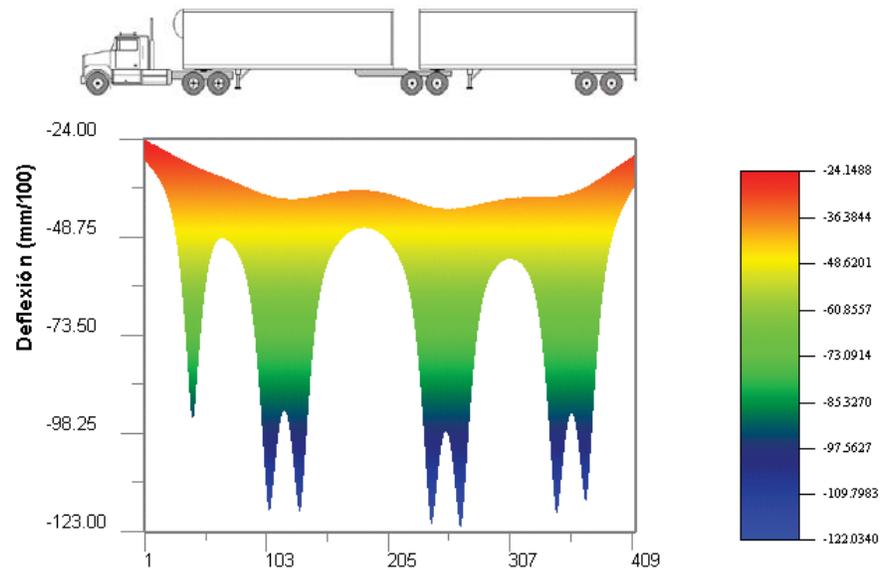


Figura 4 Envolvente de deflexiones (mm/100) para bitrén corto

Para el bitrén largo (Figura 5), la deflexión instantánea máxima obtenida es de 1,3 mm bajo el eje tándem del primer semi-remolque. La envolvente de deflexión muestra un valor promedio aproximado de 0,5 mm asociado a toda la configuración de carga.

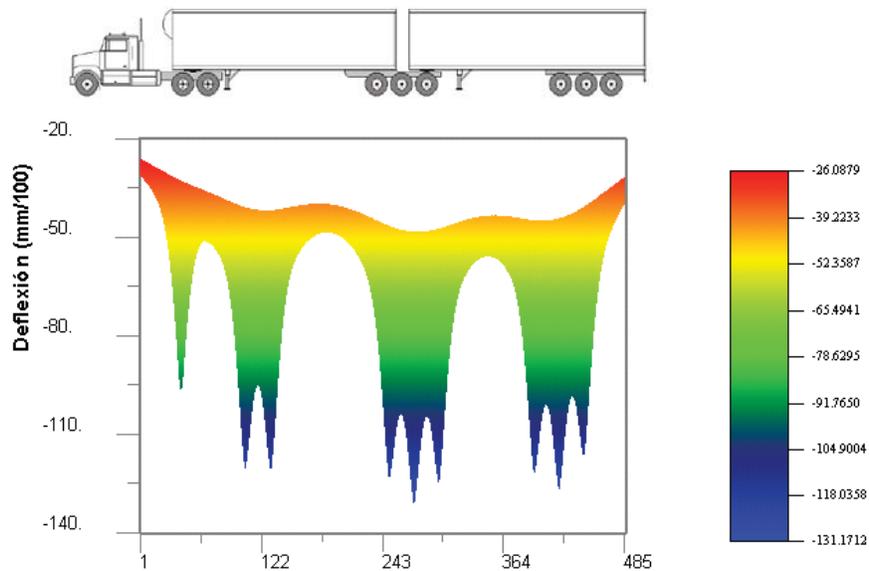


Figura 5 Envolvente de deflexiones (mm/100) para bitrén largo

Para el tracto-semiremolque, la deflexión instantánea máxima obtenida fue de 1,1 mm bajo el eje tándem del tracto. La envolvente de deflexión muestra un valor promedio aproximado de 0,3 mm asociado a toda la configuración de carga (Figura 6).

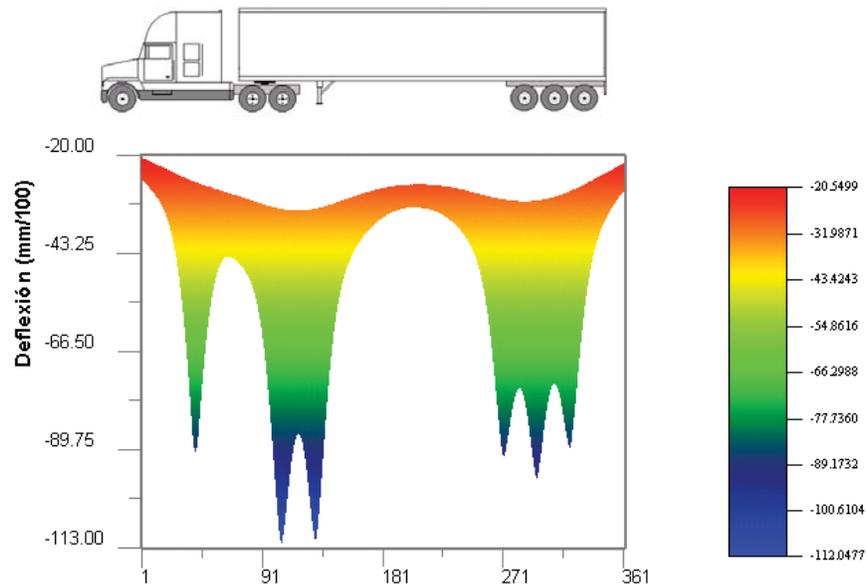


Figura 6 Envolvente de deflexiones (mm/100) para tracto-semiremolque

Para el camión-remolque, la deflexión instantánea máxima obtenida es de 1,1 mm bajo el eje tándem del camión. La envolvente de deflexión muestra un valor promedio aproximado de 0,3 mm asociado a toda la configuración de carga (Figura 7).

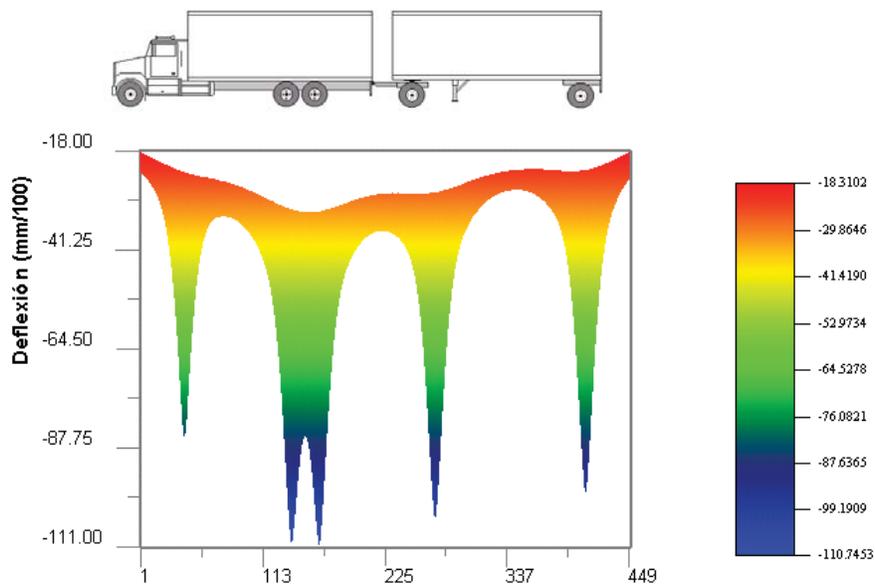


Figura 7 Envolvente de deflexiones (mm/100) para camión-remolque

Los valores obtenidos indican que las CAT producen mayores niveles de deflexión que las configuraciones tradicionales. En este sentido, el bitrén largo de 75 t produce una mayor deflexión superficial que el bitrén corto de 61 t, lo cual se explica por el efecto del peso bruto total sobre la superficie del pavimento. De las configuraciones tradicionales, el tracto-semiremolque produce un mayor nivel de deflexiones que el camión-remolque, ambos con 45 t. La diferencia entre los resultados se debe a efecto de superposición asociado a configuraciones de ejes múltiples (tándem y trídem).

6.- CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó un enfoque mecanicista-empírico para obtener indicadores del impacto de configuraciones de carga de alto tonelaje (CAT) y camiones tradicionales en el deterioro estructural de pavimentos asfálticos. La modelación se realizó para 4 configuraciones de carga: bitren corto de 61 t, bitren largo de 75 t, camión remolque de 45 t y tracto-semiremolque también de 45 t. La modelación se realizó para cada camión completo, lo cual le da más precisión al análisis frente al análisis por eje.

Independiente de la estructura de pavimento y condición de operación, la configuración de carga que produce mayores niveles de deterioro es el camión-remolque y la que produce menor daño es el tracto-semiremolque, ambas con 45 t de peso bruto total. Las CAT se encuentran en un punto intermedio, donde el bitrén largo de 75 t, produce un menor impacto estructural que el bitrén corto de 61 t. Estos resultados son válidos tanto para el agrietamiento por fatiga, como para el ahuellamiento superficial.

Para la situación más desfavorable, el camión-remolque produce un 90 % más de daño por agrietamiento y un 108 % más de daño por ahuellamiento que el tracto-semiremolque. Con respecto al bitrén corto, el camión-remolque produce un 22% más de daño por agrietamiento y un 30% más de daño por ahuellamiento. Entre CAT, el bitrén largo produce un 9 % menos de impacto estructural por agrietamiento que el bitrén corto, y un 14 % menos de daño por ahuellamiento.

Para evaluar el efecto del aumento en el peso bruto total en la deformación permanente de la carpeta de rodado, se realizó un análisis de deflexiones. Los resultados muestran que las CAT producen mayores deflexiones que las configuraciones tradicionales de menor peso total. Esto se puede traducir en ahuellamiento superficial debido a que las deformaciones permanentes (plásticas) del asfalto son mayores para condiciones de tráfico pesado y/o lento y altas temperaturas de operación.

Bajo este criterio, si bien el daño equivalente se encuentra en un punto intermedio del producido por la flota actual, es posible que este tipo de camión favorezca el ahuellamiento superficial en mayor medida que los tipos de camiones utilizados en Chile. Por tanto, si se compara el camión bitrén con los usados en Chile solamente por daño relativo y no por deflexiones, es muy probable que se esté sub-estimando el real daño de estos camiones a los pavimentos chilenos y en consecuencia, sería necesario reforzar las estructuras de pavimento en todas las rutas que se habiliten para la circulación de este tipo de camión.

Por otro lado, la experiencia internacional muestra que el daño sobre pavimentos y puentes no es la única variable a considerar, por lo cual es necesario realizar un estudio completo de la infraestructura vial nacional en materia de otros tipos de pavimentos y diseño geométrico y por otro lado estudiar modificaciones normativas en cuanto a tonelajes máximos, dimensiones entre ejes y longitud máxima total, rutas habilitadas, sistemas de seguimiento de flota con GPS, aspectos de seguridad activa y pasiva (por ejemplo exigencia y normalización de sistemas de frenos auxiliares de alta potencia de frenado). En este sentido, este trabajo aporta resultados sólo en una de las dimensiones del problema, por lo cual este análisis no es definitorio sino que más bien prospectivo.

REFERENCIAS

- Asphalt Institute (1981). Thickness Design – Asphalt Pavements for Highways & Streets. Manual Series MS-1. Lexington, UK.
- Chatti, K. y El Mohtar, C. (2004). Effect of different axle configurations on fatigue life of asphalt concrete mixture. Transportation Research Record 1891, 121-130.
- Díaz, R. (2011). Transporte de Alto Tonelaje: Análisis Mecanicista-empírico del impacto estructural en pavimentos asfálticos. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Concepción. Chile.
- DfT (2008). Longer and/or Longer and Heavier goods Vehicles (LHVs) – A study of the likely effects if permitted in the UK. Department for Transport. UK.
- 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.
- Merino, J. (2010). Metodología de elaboración de datos de tránsito y clima para el diseño de pavimentos flexibles usando MEPDG en Chile. Memoria de Título Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Chile.
- Leduc, G. (2009). Longer and Heavier Vehicles. An Overview of Technical aspects. JRC Scientific Technical Reports. European Commission. Luxemburgo.
- Nagl, P. (2007). Longer Combination Vehicles (LCV) for Asia and the Pacific Region: Some Economic Implications. UNESCAP Working Paper WP/07/02. United Nation Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Thailand.
- MdC (2008). Homologa os veículos e as combinações de veículos de transporte de carga e de passageiros, constantes do Anexo desta Portaria. Portaria 93/2008. Departamento Nacional de Trânsito. Ministerio des Cidades, Brasil.
- MOP (1980). Peso máximo de vehículos que pueden circular por caminos públicos. Decreto Supremo 158/1980. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- MOP (2010). Manual de Carreteras Volumen N° 3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- MOU (2009). Heavy Truck Weight and Dimension Limits for Interprovincial Operations in Canada. Resulting from the Federal-Provincial-Territorial Memorandum of Understanding on Interprovincial Weights and Dimensions. Canadá.
- MTQ (2005). Vehicle Loads and Size Limits Guide. Quebec, Canadá.
- NTC (2006a). Road Transport Legislation – Mass and Loading Regulations. National Transport Commission. Australia.
- NTC (2006b). Concessional Mass Limits. National Transport Commission. Australia.

- NTC (2006c). Road Transport Legislation – Higher Mass Limits. National Transport Commission. Australia.
- NTC (2009). Heavy Vehicle Access Schemes and Arrangements. National Transport Commission. Australia.
- Pradena, M. (2008). Análisis del índice de regularidad internacional IRI, en la construcción, operación y condición final de caminos pavimentados. Tesis para optar al grado de Magíster en Construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.
- Salama, H. y Chatti, K. (2006). Evaluating flexible pavement rut damage caused by multiple axle and truck configurations. Proceedings 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. Pennsylvania. Estados Unidos.
- Salama, H., Chatti, K. y Lyles, R. (2006). Effect of Heavy Multiple Axle Trucks on Flexible Pavement Damage Using In-Service Pavement Performance Data. Journal of Transportation Engineering, 132(10), 763-770.
- SNRA (1999). Legal Loading Weights and Dimension Limits for Heavy Vehicles. Suiza.
- SECTRA (2006). Análisis Estratégico del Sistema de Transporte Intermodal de la Macrozona Sur. Secretaría de Planificación de Transporte. Chile.
- USDOT (2004). Comprehensive Truck Size and Weight Study. United States Department of Transportation. Estados Unidos.
- Vierth, I. et al (2008). The effect of long and heavy trucks on the transport system. VTI rapport 605A. Suecia.