



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

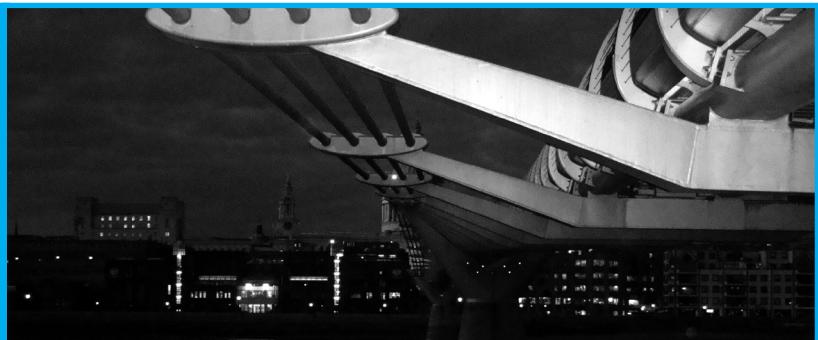
Díaz, R.; Echaveguren, T.; Vargas-Tejeda, S.
Camiones de alto tonelaje y su impacto en ciclo de vida de pavimentos asfálticos
Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 1, abril, 2012, pp. 101-118
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127623090010>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

*Heavy load trucks and
its impact in life cycle
asphalt pavements*

Camiones de alto tonelaje y su impacto en ciclo de vida de pavimentos asfálticos



Autores

DÍAZ, R. Universidad de Concepción,
roddiaz@udec.cl
Concepción, Chile

ECHAVEGUREN, T. Universidad de Concepción,
techaveg@udec.cl
Concepción, Chile

VARGAS-TEJEDA, S. Universidad del Bío-Bío,
svargas@ubiobio.cl
Concepción, Chile

Fecha de recepción 02/08/2011

Fecha de aceptación 09/04/2012

Resumen

En los últimos años se inició el debate sobre la factibilidad técnico-económica de introducir en la flota de transporte de carga configuraciones de alto tonelaje (CAT). Estas configuraciones superan el peso bruto total máximo de 45 t permitido en Chile, distribuyendo la carga sobre un mayor número de ejes. En Chile no existe experiencia en el uso de este tipo de configuraciones de carga, por lo que es prudente y necesario estudiar el impacto global que tendrían en el sistema de transporte interurbano si se implementan.

En este trabajo se analiza en particular el impacto sobre los pavimentos asfálticos. Utilizando un enfoque mecanicista-empírico, se comparó el impacto en el ciclo de vida producido por CAT del tipo bitrén corto y largo, y configuraciones tradicionales del tipo camión-remolque y trato-semirremolque.

En la evaluación se consideraron diferentes estructuras de pavimento,

condiciones climáticas y niveles de tránsito solicitante, representativos de la Región del Biobío. La evaluación mecanicista-empírica se realizó utilizando el método de diseño de pavimentos mecanicista francés Alize-LCPC, y los modelos de deterioro desarrollados por el Asphalt Institute. Para comparar distintos métodos de evaluación y modelos de deterioro, el ciclo de vida fue evaluado utilizando la Ley de Miner implementada en la guía de diseño MEPDG de Estados Unidos.

Los resultados mostraron que el camión-remolque produce mayor daño en el pavimento, mientras que el trato-semirremolque es el que produce menor daño, ambos con 45 t de peso bruto total. El bitrén largo de 75 t produce un impacto estructural levemente menor que el bitrén corto de 61 t. Sin embargo, se encontró evidencia teórica de que las CAT producen mayor ahuecamiento superficial en forma proporcional al peso bruto total.

Palabras Clave: Pavimento asfáltico, camión de alto tonelaje, diseño mecanicista, ahuecamiento, agrietamiento.

Abstract

In recent years a discussion of the technical-economic feasibility of introduce the heavy load trucks (CAT) in goods transport fleet was started. This truck configurations overpass the maximum gross weight of 45 t permitted in Chile. In Chile there not exist experience of using this type of trucks, whence is relevant to study the global impact of it over the interurban transport system.

This paper discusses the impact of heavy load trucks over asphalt pavements. Using a mechanistic-empirical framework, the impact of two types of CAT, long and short bitrén, and a one and two units 45 tons trucks were compared along the life-cycle of the pavement.

Assessment considers different pavement configurations, weather

conditions and traffic levels, typical of the Bio Bio region. The mechanistic-empirical assessment was performed using the Alize-LCPC pavement design tool and the deterioration models of the Asphalt Institute. For comparing deteriorations, the life-cycle was assessed using the Miner Law implemented in the Mechanist-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG.

Results show that the one unit truck induces the greater damage over the pavement and that the two unit truck induces the lower damage. The long bitrén (75 tons) induce a slightly lower impact than the short bitrén. However it was found evidence that the CAT induce the greater rutting in the pavement surface, which increases linearly if the gross weight of the truck increases.

Keywords: Asphalt Pavement, heavy load truck, mechanistic pavement design, rutting, cracking

1. Introducción

El transporte terrestre por carretera es el principal medio de carga utilizado en la macro zona sur de Chile. Según estudios de SECTRA (2006), el camión articulado representa un 74% de la partición modal.

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. Sin embargo, en los últimos años, se inició un debate sobre la factibilidad técnico-económica de elevar la capacidad máxima de carga permitida por la ley, con el objetivo de mejorar la eficiencia y competitividad del transporte de carga desde el punto de vista productivo y operacional. De esta forma, se podrían introducir en la flota de transporte de carga configuraciones de alto tonelaje (CAT), las cuales aumentan el peso bruto total del vehículo (tara + carga) distribuyendo la carga sobre un mayor número de ejes.

Las CAT son combinaciones de tractos, remolques y semirremolques utilizadas para transportar carga pesada que poseen un peso bruto total superior a 45 t. El camión bitrén, o b-doble, es un tipo de CAT que consiste en un vehículo tractor que remolca dos semirremolques, acoplados en dos puntos de articulación por medio de quinta rueda. Usualmente no excede los 25 m de longitud.

En países como Brasil, Canadá y Australia, esta configuración puede circular con niveles de carga que van desde 50 hasta 68 t. En los países que utilizan CAT la legislación impone rigurosas exigencias de control a estos vehículos, limitando el peso bruto total y el peso por eje en función de la distancia entre ejes y la longitud total (CONTRAN, 2006; MOU, 2009; NTC, 2009)

Actualmente en Chile no existe experiencia en el uso de este tipo de vehículos. Por lo tanto, es prudente y necesario estudiar el impacto global que tendrían en el sistema de transporte interurbano en el caso de ser implementados. Estudios como los realizados por el Departamento de Transporte de Estados Unidos (DOT, 2004) y por el Reino Unido (DfT, 2008), muestran que los criterios para aceptar o desechar las CAT no solo están relacionados con la resistencia del pavimento o de las estructuras, sino que involucran los siguientes aspectos de contexto:

- Impacto en el deterioro de pavimentos
- Impacto estructural en puentes
- Características de operación (*Offtracking*, estabilidad, adelantamiento, etc.)

- Compatibilidad geométrica con la infraestructura vial existente
- Efectos en la seguridad y accidentabilidad
- Consumo de combustible, contaminación y emisiones
- Impacto en otros modos de transporte de carga y en la cadena logística en general

Este trabajo discute el impacto estructural ocasionado por CAT y camiones tradicionales en el ciclo de vida de pavimentos asfálticos, utilizando un enfoque mecanicista-empírico para evaluar el consumo de fatiga acumulado durante la vida de diseño del pavimento. Para ello en primer lugar se discuten los estudios realizados en otros países acerca de las CAT y el comportamiento de los pavimentos asfálticos. Posteriormente se presenta el método de evaluación utilizado en esta investigación, resaltando la caracterización de las cargas solicitantes, de los pavimentos a modelar, los modelos de comportamiento empleados, los escenarios de evaluación considerados y los resultados obtenidos.

2. Vehículos pesados y el deterioro de pavimentos asfálticos

El tráfico, las condiciones ambientales, las características de los materiales y las consideraciones de diseño son determinantes para el comportamiento de los pavimentos en el tiempo. Estos factores se relacionan con los dos deterioros estructurales más importantes y recurrentes en pavimentos asfálticos: el agrietamiento por fatiga y el ahuellamiento superficial, debido a las repeticiones de las cargas aplicadas por los vehículos pesados que circulan por el pavimento.

El agrietamiento por fatiga se manifiesta inicialmente como pequeñas grietas longitudinales en la huella de circulación, que luego se propagan rápidamente por la superficie del pavimento formando patrones del tipo piel de cocodrilo. El ahuellamiento superficial por su parte es el resultado de una deformación permanente en cada una de las capas que conforman el pavimento, y se manifiesta como una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos.

Existe evidencia teórica y experimental de que diferentes tipos de camiones con distintas configuraciones de ejes contribuyen en forma diferente al deterioro estructural de un pavimento. 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 un peso bruto total entre 15 y 52 t. Concluyeron que la deformación permanente

en pavimentos flexibles estaba determinada por el peso bruto total de vehículos pesados. Sus resultados mostraron también que el agrietamiento por fatiga no estaba relacionado con el peso bruto total, siendo su magnitud directamente proporcional a la carga individual por eje, según tipo de eje y características de suspensión.

Chatti y El Mohtar (2004) estudiaron la vida de fatiga de una mezcla asfáltica 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 (2004) muestran que el daño producido por tonelada de carga transportada disminuye con el uso de configuraciones de ejes múltiples (tándem y trídem). 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 consideraba la contribución al ahuellamiento que aporta cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento. Salama y Chatti (2006) concluyeron que despreciando la interacción entre ejes en la respuesta de deformación vertical en las capas superiores (carpeta asfáltica y base), 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, utilizando una metodología de análisis estadístico de datos de desempeño de pavimentos en servicio. En su estudio consideraron configuraciones de camiones con pesos brutos totales 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 trídem). Sin embargo, camiones con un mayor peso bruto total tendían a producir mayor ahuellamiento.

Las investigaciones disponibles en la literatura utilizan diferentes enfoques para estudiar el deterioro de pavimentos asfálticos causado por configuraciones de carga pesada. Sin embargo, todas son conclusivas acerca de la necesidad de estudiar el impacto del peso bruto total y del peso por eje en la respuesta estructural del pavimento, considerando cada situación particular de carga.

3. Método de evaluación

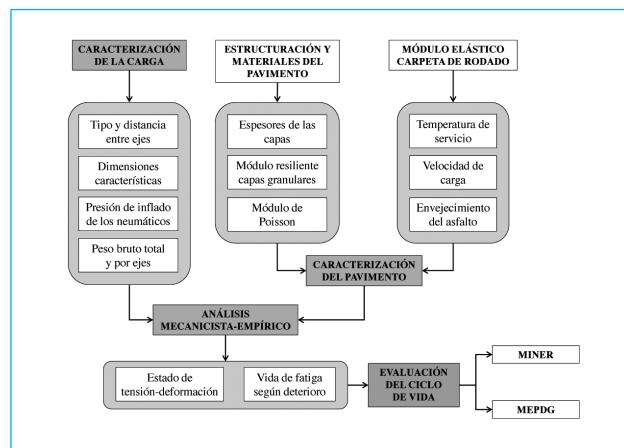
En Chile no existen pavimentos deteriorados por la circulación de CAT, ni los datos de tráfico necesarios para evaluar esta interacción de variables utilizando una metodología estadística. Asimismo, no se dispone de los equipos de laboratorio o dispositivos de simulación necesarios para abordar la evaluación desde un punto de vista experimental. Por lo tanto, en esta investigación se optó por utilizar un enfoque teórico mecanicista-empírico, considerando escenarios de evaluación representativos de la red vial de la Región del Biobío, la cual es representativa de la zona sur de Chile entre las regiones del Maule y Los Lagos.

En este estudio se utilizaron dos métodos de evaluación del ciclo de vida: (1) la evaluación del consumo anual de fatiga según la Ley de Miner y (2), evaluación del ciclo de vida mediante la guía de diseño MEPDG. Las etapas de la evaluación fueron: caracterización de la configuración de carga (3.1), caracterización del pavimento en términos de estructuración y módulo elástico de la carpeta de rodado (3.2), cálculo de vida de fatiga desde un enfoque mecanicista-empírico (3.3), evaluación del ciclo de vida según la Ley de Miner (3.4) y MEPDG (3.5). En la Figura 1 se muestra el esquema metodológico general utilizado.

Los escenarios de evaluación considerados corresponden a la evaluación del daño incremental que ocasiona una determinada configuración de carga, para una capacidad estructural de pavimento y nivel de tránsito solicitante previamente definidos. Se consideró una vida de diseño de 20 años en la evaluación.

3.1. Caracterización de cargas

Figura 1. Método de evaluación del ciclo de vida



Para caracterizar las solicitudes de tráfico se analizó el mercado nacional de vehículos de carga, según la oferta de marcas en Chile, y de fabricantes de CAT en Brasil. El detalle de este estudio puede verse en Díaz (2011).

Como resultado se definieron las características geométricas y operacionales de las CAT y camiones tradicionales a modelar: bitrén corto, bitrén largo, camión-remolque y tracto-semirremolque. En la Figura 2 se resumen los resultados obtenidos.

Figura 2a. CAT tipo bitrén corto de 61 t (C1), dimensiones en m

TIPO DE EJE (*)	PESO POR EJE (t)
ESRS	7
EDRD	18
EDRD	18
EDRD	18

Figura 2b. CAT tipo bitrén largo de 75 t (C2), dimensiones en m

Tipo de eje (*)	Peso por eje (t)
ESRS	7
EDRD	18
ETRD	25
ETRD	25

Figura 2c. Configuración tipo tracto-semirremolque de 45 t (C3), dimensiones en m

Tipo de eje (*)	Peso por eje (t)
ESRS	7
EDRD	18
ETRD	20

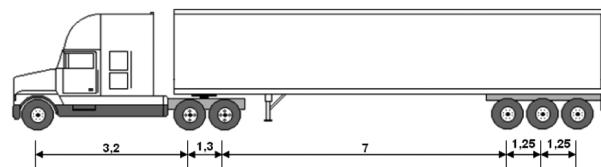
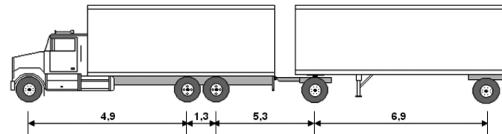


Figura 2d. Configuración tipo camión-remolque de 45 t (C4), dimensiones en m

Tipo de eje (*)	Peso por eje (t)
ESRS	7
EDRD	18
ESRD	10
ESRD 10	



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

3.2. Caracterización de pavimentos

3.2.1 Estructuración del pavimento

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), quien consideró distintos niveles de tránsito/capacidad representativos de la red vial de la Región del Biobío. El

diseño de espesores se realizó utilizando el método AASHTO para pavimentos flexibles según el Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2010).

Las propiedades elásticas de las capas granulares se determinaron a partir de valores recomendados en NCHRP (2004) y ecuaciones de correlación con el valor de soporte CBR (Shell, 1978; NCHRP, 2004; MOP 2010). Los diseños obtenidos se resumen en la Tabla 1.

3.2.2 Módulo dinámico de la carpeta asfáltica

Las propiedades elásticas de la carpeta de rodado varían a lo largo de la vida del pavimento, dependiendo de la temperatura, velocidad de aplicación de las cargas y del envejecimiento de la mezcla. Este comportamiento visco-elástico fue considerado mediante el módulo dinámico bajo diferentes condiciones de operación. El módulo se calculó mediante el modelo de Witczak (NCHRP, 2004), considerando una frecuencia de aplicación de cargas de 10 Hz (equivalente a una velocidad de circulación de aproximadamente 70 km/h en carreteras) y una mezcla asfáltica típica utilizada para carpetas de rodado en Chile, de graduación densa, contenido de asfalto normal (5,5% en peso de la mezcla total) y grado de penetración entre 60 y 80 (NCh2340 Of 1999), equivalente a un asfalto CA 60-80 según la nomenclatura utilizada en Chile.

La temperatura media mensual del pavimento (TMMP, en °F) se estimó en función de los valores de la temperatura media mensual del aire (TMMA, en °F), y de la profundidad de estimación de la temperatura (z, en in), utilizando los valores recomendados en el Manual de Carreteras (MOP, 2010) para la estación de Chillán de acuerdo a la Ecuación 1.

$$\gamma d = \alpha_A \cdot \ln(qd) + \beta_B \quad (1)$$

En la Figura 3 se muestran los resultados del cálculo de la variación mensual del Módulo dinámico (E^*) del asfalto, obtenidos para los primeros cinco años de servicio, en comparación con los resultados obtenidos mediante el software de diseño de la guía MEPDG, considerando las mismas condiciones de evaluación y la base climática propuesta por Merino (2010) para la ciudad de Chillán.

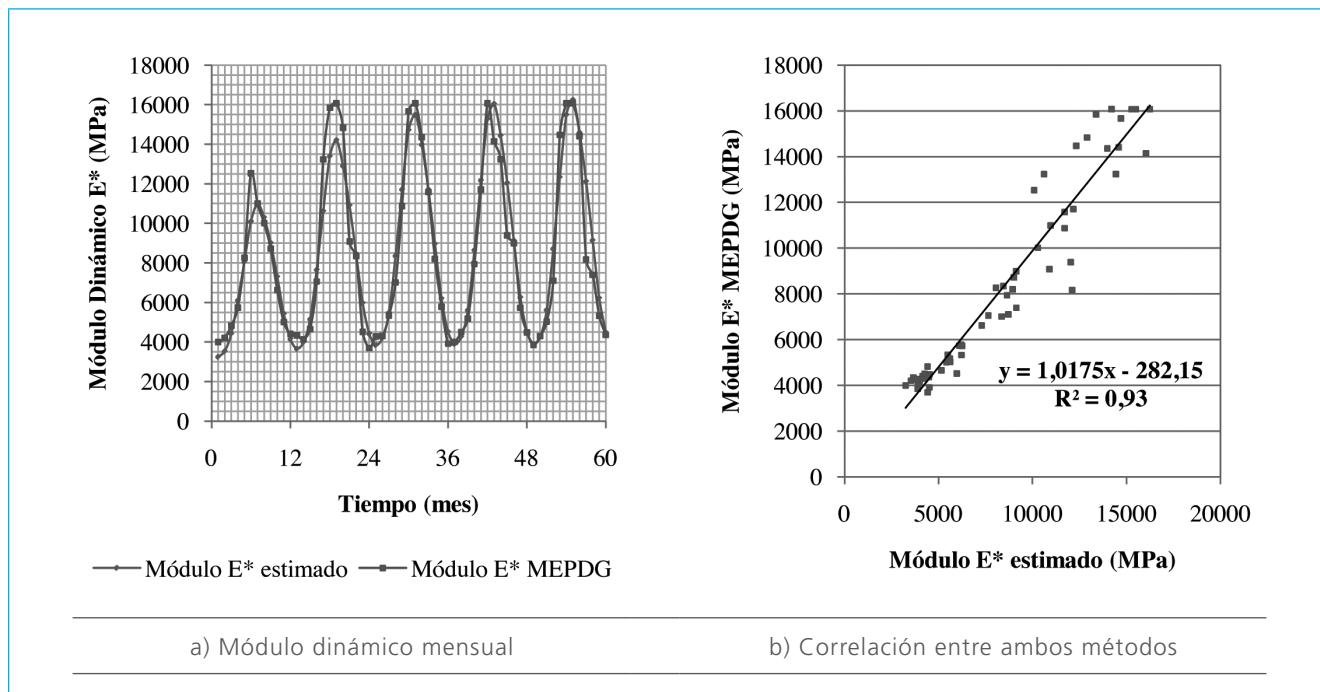
En la Figura 3a se aprecia el efecto del envejecimiento de la mezcla asfáltica durante los primeros años de servicio, el que se traduce en un aumento en su rigidez. Por lo tanto, se definieron dos condiciones de operación para evaluar el consumo de fatiga a lo largo del ciclo de vida:

La primera condición corresponde a los dos primeros años de servicio, representada en forma conservadora

Tabla 1. Caracterización de estructuras de pavimento usadas en la modelación

Capa del pavimento	Parámetro de diseño	Capacidad estructural		
		Baja	Media	Alta
Carpeta asfáltica	Espesor (mm) h_1	110	140	190
	Coeficiente de Poisson		0,35	
Base granular	Espesor (mm) h_2	120	150	150
	Módulo resiliente (MPa)		280	
Subbase granular	Coeficiente de Poisson		0,35	
	Espesor (mm) h_3	120	150	200
Subrasante granular	Módulo resiliente (MPa)		160	
	Coeficiente de Poisson		0,35	
	Módulo resiliente (MPa)			77
	Coeficiente de Poisson		0,40	

Figura 3. Valores del módulo dinámico y su comparación con los valores de MEPDG



por los valores de módulo obtenidos para el primer año. La segunda condición, representa el comportamiento del pavimento desde el tercer año de servicio hasta la vida de diseño, la que se caracterizó mediante los valores de módulo obtenidos en el tercer año.

En la evaluación del módulo dinámico en función de la temperatura estimada del pavimento, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,93 con los valores obtenidos utilizando el modelo climático integrado en MEPDG (ver Figura 3b). Por esto, se decidió utilizar el método simplificado en la evaluación del ciclo

de vida según la Ley de Miner, considerando valores estacionales promedio para la temperatura estimada del pavimento.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de módulo dinámico del asfalto y su variación estacional obtenidos para las dos condiciones de operación antes definidas.

3.3. Modelación mecanicista del pavimento

El deterioro acumulado se evaluó en base a la vida de fatiga, la cual fue estimada en forma teórica mediante

Tabla 2. Valores de módulo E^* (MPa) según estación y envejecimiento

Estación del año	Temperatura media estacional del pavimento (°C)		Edad de servicio	
	Años 1 y 2	Años 3 al 20		
Otoño	18		5.955	8.070
Invierno	12		10.750	15.170
Primavera	18		6.800	8.240
Verano	25		3.890	4.170

un enfoque mecanicista-empírico. La vida de fatiga corresponde al número de aplicaciones o repeticiones de carga con el cual se produce la falla del pavimento debido a algún deterioro específico. Se estima conociendo el estado de tensión-deformación que produce una determinada configuración de carga en la estructura del pavimento y en el suelo.

3.3.1 Estado tensional

Para la evaluación del estado de tensión-deformación se utilizó el software de análisis estructural de pavimentos Alize-LCPC. Este software utiliza la teoría elástica multicapas de Burmister para obtener una solución analítica del estado tensional del pavimento. Permite modelar numerosas configuraciones y puntos de carga, con lo cual se puede construir una envolvente del estado de tensión, deformación, o deflexión que genera la carga de una CAT completa sobre la estructura del pavimento.

Para determinar el agrietamiento por fatiga, se evaluó el estado de tensión-deformación horizontal de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica. Para determinar el ahueamiento superficial, se evaluó el estado de tensión-deformación vertical de compresión en la superficie de la subrasante.

En la Tabla 3 se muestra la matriz factorial en que fueron agrupadas las distintas combinaciones consideradas en la evaluación de la vida de fatiga, según configuración de carga (*) y capacidad estructural del pavimento. La modelación se realizó considerando la carga completa de cada camión, evaluando el estado tensional para cada uno de los ejes que conforman la configuración de carga totalizando 240 simulaciones.

3.3.2 Modelos de fatiga

La forma funcional más usada para modelar el agrietamiento por fatiga de abajo-arriba (piel de cocodrilo) es función de las deformaciones críticas por tensión y del módulo elástico de la mezcla asfáltica. En este estudio, se utilizó el modelo desarrollado por el Asphalt Institute (1981) (ver Ec. 2).

$$q_d = \frac{1}{A_c} \times \frac{E}{e} \times \frac{M}{M + P} \quad (2)$$

En que:

N_f : Número de repeticiones de carga para que se produzca el agrietamiento por fatiga.

M: Factor de corrección por composición de la mezcla.

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).

En este modelo la segunda etapa de agrietamiento 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.

Para el ahueamiento superficial, 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, de acuerdo con el modelo empírico del Asphalt Institute (1981) (ver Ec. 3).

Tabla 3. Escenarios de evaluación considerados en la modelación mecanicista

Condición de operación	Estructuración débil								Estructuración media							
	Año 1				Año 3				Año 1				Año 3			
Otoño	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Invierno	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Primavera	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Verano	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4

(*) C1: Bitrén corto; C2: Bitrén largo; C3: Tracto-semirremolque; C4: Camión-remolque.

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{4,477} \quad (3)$$

En que:

N_d : Número de repeticiones de carga para que se produzca la falla por ahuellamiento.

ϵ_v : Deformación vertical de compresión sobre la subbase ($\mu_{def} \times 10^6$).

En este modelo, el criterio de falla se define como el número mínimo de repeticiones de carga que causan 13 mm de ahuellamiento superficial.

3.4. Evaluación del ciclo de vida según la Ley de Miner

Para estimar la progresión de los deterioros en el tiempo, se calculó el consumo de fatiga acumulado a lo largo del ciclo de vida del pavimento según la Ley de Miner. Esta ley de adición de daño es la más utilizada en el diseño y evaluación de pavimentos (Sun *et al.*, 2003; Huang, 2004).

La proporción de fatiga que se consume cada vez que pasa una CAT u otra configuración de carga sobre un pavimento asfáltico, se estima mediante la Ley de Miner como la adición del daño ocasionado por cada uno de los ejes que conforman la configuración.

Considerando que la condición de falla ocurre cuando la razón de daño alcanza la unidad, el número (N_c) de pasadas de camión que producen la falla por fatiga del pavimento, se obtiene en forma generalizada mediante la Ecuación 4.

$$N_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i}} \quad (4)$$

Donde:

N_c : Vida de fatiga asociada a una determinada configuración de carga.

N_i : Vida de fatiga asociada al eje o conjunto de ejes número "i" de una determinada configuración de carga formada por "k" ejes o conjuntos de ejes.

La vida de fatiga varía dependiendo de la capacidad resistente del pavimento, la que a su vez depende de las condiciones climáticas de operación y del envejecimiento. Esta variabilidad en la condición del pavimento se tomó en cuenta considerando los valores de módulo

dinámico estacional de la carpeta asfáltica definidos en la Tabla 2.

Conocida la vida de fatiga estacional, y el tránsito anual de camiones solicitantes para la configuración de carga, se estimó el consumo anual de fatiga como la suma del daño producido en forma estacional. Esta adición de daño se realizó según la Ley de Miner utilizando la Ecuación 5.

$$D_{anual} = \sum_{j=1}^4 \frac{n_j}{n_{cj}} \quad (5)$$

Donde:

D_{anual} : Fracción (o razón) de daño consumida anualmente por la configuración.

j : Estación del año (otoño = 1, invierno = 2, primavera = 3, verano = 4).

n_j : Tránsito solicitante de camiones en la estación "j".

N_{cj} : Vida de fatiga para la configuración de carga en la estación "j".

Luego, para cada año de servicio, se determinó el consumo acumulado de fatiga () como la suma del daño () ocasionado anualmente por la configuración de carga. El año en que el consumo acumulado de fatiga iguala o supera la unidad (), el pavimento alcanza el umbral de falla según el modelo de fatiga considerado. $acumDanualDacumD1 \geq$

3.5. Evaluación del ciclo de vida utilizando MEPDG

El segundo método corresponde a la evaluación del ciclo de vida utilizando la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecánica (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG), desarrollada en Estados Unidos por el Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (National Cooperative Highway Research Program, NCHRP). Esta guía de diseño incorpora en forma continua la interacción entre las características del pavimento, las solicitudes de tráfico y el efecto del clima, en la determinación de los deterioros y su progresión en el tiempo a lo largo de la vida de diseño del pavimento.

Dependiendo de la calidad de datos disponibles por el usuario, MEPDG utiliza tres niveles jerárquicos de diseño. El nivel 1 requiere información calibrada a nivel local incluyendo ensayos de laboratorio y en terreno. El nivel 2 utiliza un nivel de detalle intermedio, que puede ser obtenido mediante bases de datos históricos,

ensayos limitados, o correlaciones empíricas. El nivel 3 de diseño utiliza valores por defecto, o valores promedio típicamente utilizados (NCHRP, 2004). En este estudio se utilizó el software computacional asociado con el método MEPDG, considerando distintos niveles de calidad de datos según la información disponible.

Los datos de entrada para utilizar MEPDG se clasifican en 4 categorías: General, Tráfico, Clima y Estructura.

3.5.1 Entrada general

Las entradas de datos generales corresponden a la descripción del tipo de proyecto, la vida de diseño, criterios de diseño, e información para identificar los archivos asociados al proyecto. En la Tabla 4 se resumen los datos de entrada utilizados.

Tabla 4. Datos de entrada generales para la evaluación con MEPDG

Información requerida	Valor considerado
Vida de diseño	20 años
Fecha de puesta en servicio	Julio
Tipo de diseño	Pavimento nuevo, flexible
IRI inicial	1,5 m/km (95 in/mile)
IRI terminal	5,2 m/km (330 in/mile)
Agrietamiento abajo-arriba (piel de cocodrilo)	20%
Deformación permanente total	13 mm (0,52 in)

Se consideró el mes de julio para la puesta en servicio del pavimento, debido al desfase de 6 meses que existe entre los hemisferios norte y sur con respecto a las estaciones del año. De esta forma, las condiciones climáticas asociadas a la puesta en marcha del pavimento durante el mes de julio en Estados Unidos (verano), son equivalentes a una puesta en marcha en el mes de enero en Chile.

Con respecto al nivel de confianza, en este estudio se consideraron niveles del 70 y 80% dependiendo si el nivel de tránsito solicitante es bajo o medio-alto respectivamente.

3.5.2 Entradas de tráfico

Dado el objetivo de esta investigación, cada configuración de carga se evaluó en forma aislada, asumiendo que la configuración estudiada correspondía al 100% de la composición vehicular. Por ejemplo, en el caso de evaluación del bitrén corto, esto implica que el pavimento es solicitado exclusivamente por ejes simples de 7 t y ejes tandem de 18 t.

Se utilizaron los factores de ajuste mensual (FAM) y de distribución horaria (FDH) recomendados por Merino (2010) para la Región del Biobío. Para la distribución de vehículos por clase, se asignó un 100% a la configuración evaluada y 0% al resto de las clases vehiculares, considerando una tasa de crecimiento anual del 6%.

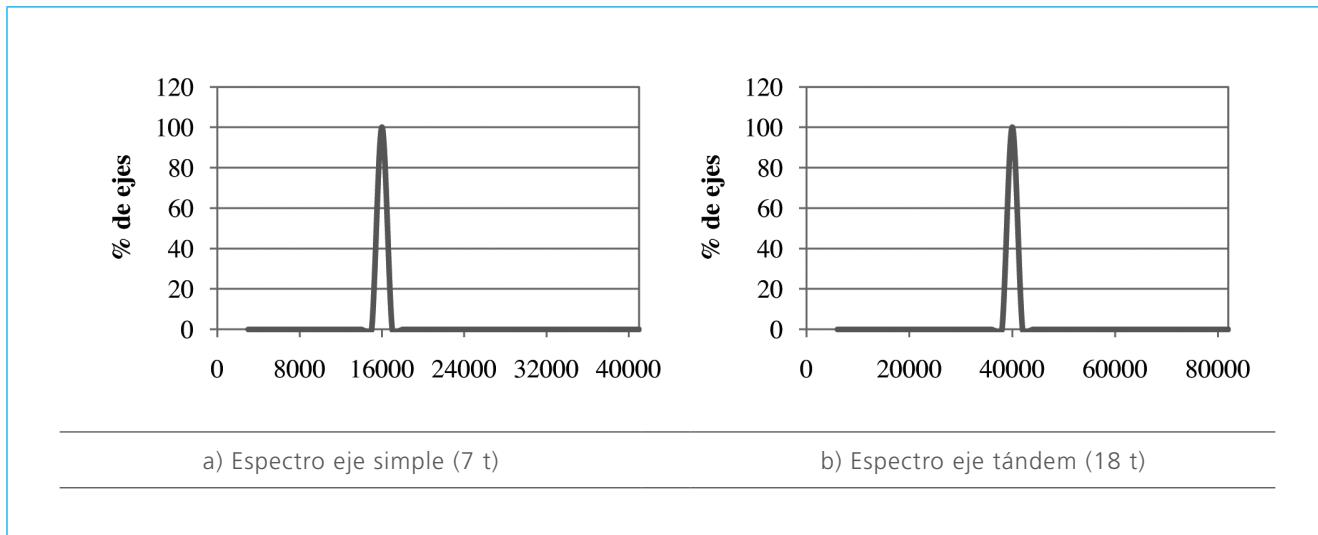
Se asumió la siguiente equivalencia entre las configuraciones de carga evaluadas y la clasificación vehicular de la Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration, FHWA*) de Estados Unidos: bitrén corto (clase 12), bitrén largo (clase 13), tractor-semirremolque (clase 10) y camión-remolque (clase 11).

Para estimar los factores de distribución de carga por eje (espectros de carga), se elaboraron espectros artificiales para cada una de las configuraciones de carga. Estos espectros representan el número de repeticiones consideradas según nivel de carga, para cada uno de los tipos de ejes o conjuntos de ejes (simple, tandem, tridem y cuádruple) que solicitan el pavimento. Para construirlos, se elaboró una rutina computacional basada en la metodología de Merino (2010). A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestran los espectros de carga por eje elaborados para el bitrén corto de 61 t.

De acuerdo con la Figura 4a, el espectro muestra que el 100% de los ejes simples que solicitan el pavimento se encuentran en el rango de carga entre 15.000 y 16.000 lb (6,80 a 7,25 t). Con respecto a los ejes tandem (Figura 4b), el 100% de los ejes se encuentran en el rango de carga entre 38.000 y 40.000 lb (17,23 a 18,14 t).

Para la información general de tráfico, se utilizaron los valores de caracterización de ejes definidos en la sección 3.1, y los valores por defecto incluidos en el software para la información no disponible. En la definición de número de ejes/camión, se asignó un valor de 0 en todos los tipos de ejes para las clases vehiculares no evaluadas.

Figura 4. Espectros de carga por eje elaborados para el bitrén corto.



3.5.3 Información de clima

En este estudio se utilizaron las bases climáticas desarrolladas por Merino (2010) para la Región del Biobío, quien confeccionó archivos en formato *.icm (input climate model) compatibles con MEPDG. Estos archivos contienen información horaria de cinco variables climáticas relevantes para la evaluación del pavimento: temperatura, velocidad del viento, porcentaje de insolación, precipitación, y porcentaje de humedad relativa.

3.5.4 Estructura del pavimento

Se utilizó la caracterización de pavimentos definida en la sección 3.2 para los valores de espesor, módulo elástico y de Poisson para cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento. Para la carpeta de rodado se consideró un ligante asfáltico de clasificación Superpave PG 64-22, equivalente al ligante CA 60-80 según clasificación por penetración (Thenoux y

Carrillo, 2002). Para los materiales granulares de base, subbase y subrasante, se asumieron materiales A-1-a, A-2-4 y CL respectivamente.

4. Escenarios de modelación

Se asumió un camino bidireccional de una pista por sentido, por el cual solo circula la configuración de carga evaluada. Se consideraron dos niveles de tránsito solicitante en la evaluación: bajo ($\text{TMDA} < 1000$) y medio-alto ($1000 < \text{TMDA} < 5000$). Las combinaciones de tránsito/capacidad consideradas en la evaluación se muestran en la Tabla 5.

Para cada uno de estos niveles de tránsito, es necesario determinar el número de camiones solicitantes durante la vida de diseño. En la Tabla 6 se muestran los valores seleccionados para las variables de tránsito, de acuerdo con las recomendaciones de Merino (2010) para la Región del Biobío.

Tabla 5. Combinaciones de tránsito/capacidad consideradas en la evaluación

Capacidad estructural	Nivel de tránsito (veh/día)							
	TMDA < 1000				1000 < TMDA < 5000			
Débil	C1	C2	C3	C4	-	-	-	-
Media	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4

Tabla 6. Variables de tránsito consideradas en la evaluación

Variable	Tmدا<1000	1000<Tmدا<5000
TMDA medio (veh/día)	338	2254
Porcentaje de vehículos pesados	32,2	35,4
Número de pistas en la dirección de diseño	1	1
Porcentaje de camiones en dirección de diseño	52,5	52,5
Porcentaje de camiones en la pista de diseño	100	100
Tránsito medio diario anual de camiones (TMDAC)	57	419

5. Análisis de resultados

5.1 Agrietamiento por fatiga

5.1.1 Tránsito bajo: TMDA < 1000

Cuando el tránsito solicitante es inferior a 1000 veh/día, MEPDG predice que el pavimento no falla por agrietamiento durante su vida de diseño, independiente de la capacidad estructural o configuración de carga considerada. Sin embargo, mediante el consumo anual de fatiga (Ley de Miner), se estimó que el pavimento de estructuración débil alcanza el umbral de falla entre los 8 y 14 años de servicio, dependiendo de la configuración de carga.

En la Tabla 7 y la Figura 5 se muestra un resumen comparativo de los resultados obtenidos según ambos métodos para un pavimento de estructuración débil

Considerando un pavimento de estructuración media, ambos métodos coinciden en que el pavimento cumple su vida de servicio sin alcanzar el umbral de agrietamiento, excepto en el caso del camión-remolque (C4), en que la evaluación del consumo de fatiga predice la condición de falla luego de 17 a 18 años de operación. En la Tabla 8 y la Figura 6 se muestran estos resultados.

5.1.2 Tránsito medio-alto: 1000 < TMDA < 5000

Para un tránsito solicitante medio-alto, la vida de servicio por agrietamiento obtenida mediante MEPDG es mayor en todos los casos. Sin embargo, ambos métodos coinciden en la tendencia de daño según configuración de carga. La configuración que produce mayor impacto es el camión-remolque (C4), alcanzando la condición de falla luego de 3 o 6 años de servicio según el método considerado. Las CAT (C1 y C2) se encuentran en un punto intermedio,

Tabla 7. Falla por agrietamiento según ambos métodos (TMDA < 1000 y estructuración débil)

Configuración de carga	Falla por agrietamiento (años)	
	Miner	MEPDG
C1 (CAT)	10,0	No falla
C2 (CAT)	11,0	No falla
C3	14,0	No falla
C4	8,5	No falla

Tabla 8. Falla por agrietamiento según ambos métodos (TMDA < 1000 y estructuración media)

Configuración de carga	Falla por agrietamiento (años)	
	Miner	MEPDG
C1 (CAT)	No falla	No falla
C2 (CAT)	No falla	No falla
C3	No falla	No falla
C4	17,5	No falla

Figura 5. Falla por agrietamiento: TMDA < 1000 y estructuración débil

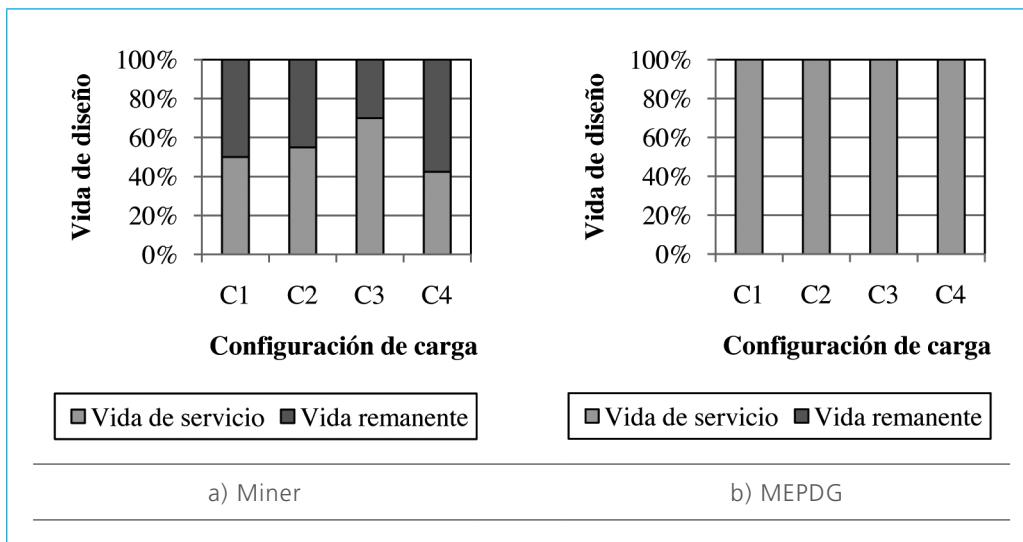
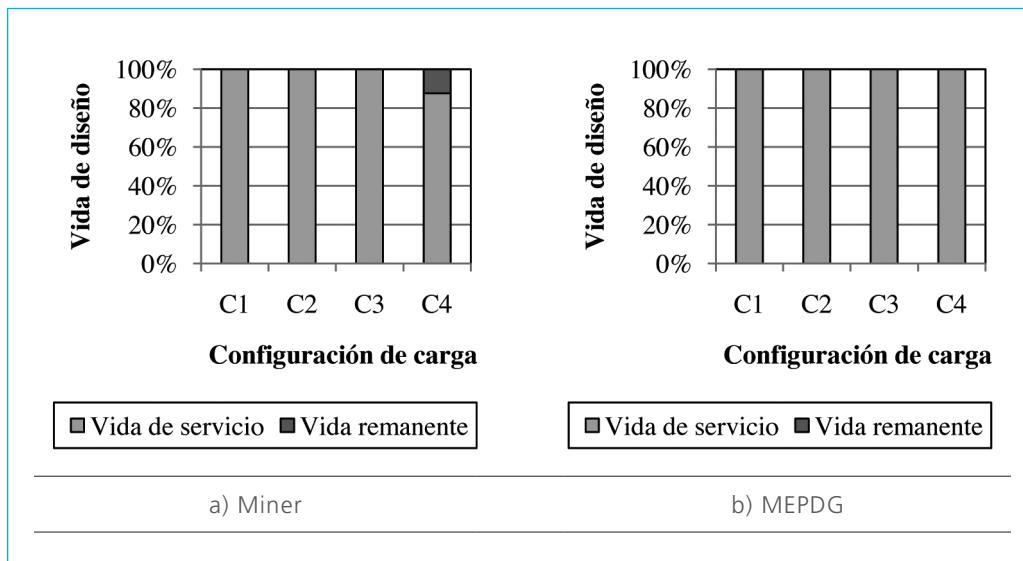


Figura 6. Falla por agrietamiento: TMDA < 1000 y estructuración media



alcanzando la falla aproximadamente a los 5 y 8 años para cada uno de los métodos. Aunque ambas CAT producen un nivel de daño similar, el impacto ocasionado por el bitrén largo (C1) es levemente menor. La configuración de carga que produce menor impacto en la estructura del pavimento es el tracto-semirremolque (C3), alcanzando el umbral

de agrietamiento luego de 7 o 14 años de servicio dependiendo del método considerado.

En la Tabla 9 y la Figura 7 se muestra un resumen comparativo de los resultados obtenidos mediante ambos métodos, para un nivel de tránsito medio-alto y estructura de pavimento con capacidad media.

Figura 7. Falla por agrietamiento: $1000 < \text{TMDA} < 5000$ y estructuración media

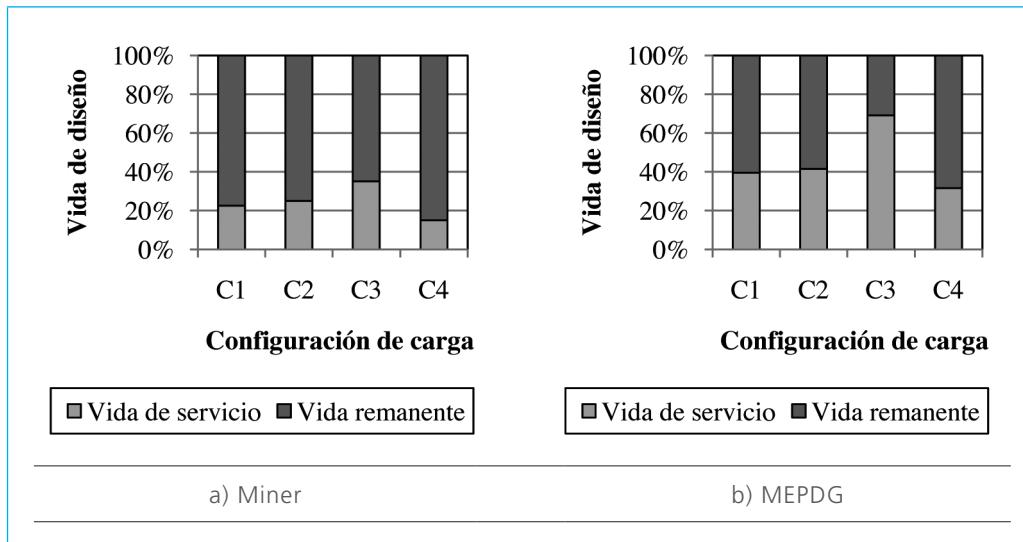


Tabla 9. Falla por agrietamiento según ambos métodos ($1000 < \text{TMDA} < 5000$ y estructuración media)

Configuración de carga	Falla por agrietamiento (años)	
	Miner	MEPDG
C1 (CAT)	4,5	7,9
C2 (CAT)	5,0	8,3
C3	7,0	13,8
C4	3,0	6,3

En general, los resultados obtenidos mediante MEPDG subestiman el agrietamiento del pavimento con respecto a la evaluación del consumo anual de fatiga. Esta diferencia es más notable en pavimentos de capacidad estructural baja. Para todos los casos evaluados, ambos métodos coinciden en la tendencia de daño según configuración de carga. La configuración más desfavorable para el ciclo de vida del pavimento es el camión-remolque de 45 t (C4). Para las CAT se obtuvo un nivel de impacto intermedio, en que el bitren largo de 75 t (C2) produce un daño levemente menor que el bitrén corto de 61 t (C1). La configuración tradicional del tipo

tracto-semirremolque de 45 t (C3) es la que produce menos impacto por agrietamiento.

5.2. Ahuellamiento superficial

5.2.1 Tránsito bajo: $\text{TMDA} < 1000$

Para un nivel de tránsito solicitante bajo y estructuración de pavimento débil, ambos métodos coinciden en que el pavimento alcanza el umbral de ahuellamiento antes de cumplir su vida de diseño. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante MEPDG sobreestiman el ahuellamiento con respecto a la evaluación del consumo anual de fatiga. De acuerdo con MEPDG, el impacto estructural por ahuellamiento es más importante en aquellas configuraciones de mayor peso bruto total, tendencia que no se aprecia en los resultados obtenidos mediante el consumo de fatiga.

En la Tabla 10 y la Figura 8 se muestra un resumen comparativo de estos resultados.

Considerando una estructura de pavimento con capacidad media, la evaluación del consumo de fatiga predice que el pavimento no alcanza el umbral de ahuellamiento, independiente de la configuración de carga considerada. Por el contrario, los resultados obtenidos mediante MEPDG indican que la condición de falla se produce para todas las configuraciones, en forma proporcional al peso bruto total. Estos resultados se resumen en la Tabla 11 y la Figura 9.

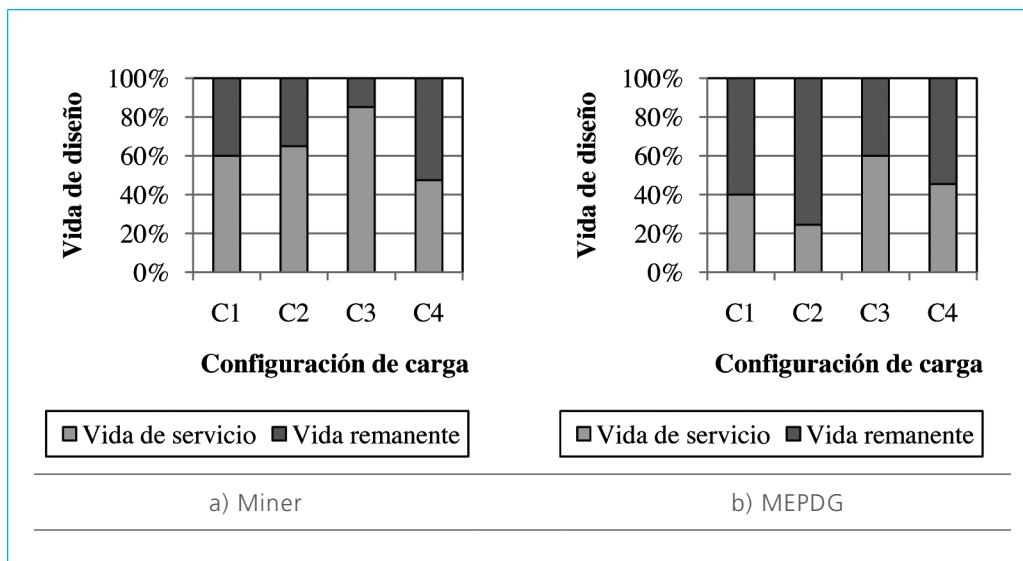
Tabla 10. Falla por ahuellamiento según ambos métodos ($TMDA < 1000$ y estructuración débil)

Configuración de carga	Falla por ahuellamiento (años)	
	Miner	MEPDG
C1 (CAT)	12,0	8,0
C2 (CAT)	13,0	4,9
C3	17,0	12,0
C4	9,5	9,1

Tabla 11. Falla por ahuellamiento según ambos métodos ($TMDA < 1000$ y estructuración media)

Configuración de carga	Falla por ahuellamiento (años)	
	Miner	MEPDG
C1 (CAT)		13,2
C2 (CAT)		8,3
C3		18,3
C4		15,1

Figura 8. Falla por ahuellamiento: $TMDA < 1000$ y estructuración débil



5.2.2 Tránsito medio-alto: $1000 < TMDA < 5000$

Cuando el tránsito solicitante es medio-alto, ambos métodos coinciden en que el pavimento alcanza el umbral de ahuellamiento antes de cumplir la vida de diseño. Sin embargo, la vida de servicio obtenida mediante MEPDG es menor en todos los casos. De acuerdo con MEPDG, la condición de falla ocurre en forma muy prematura, luego de 1 a 3 años de servicio dependiendo de la configuración de carga. En la Tabla 12 y la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos según ambos métodos, considerando un pavimento de capacidad estructural media.

Tabla 12. Falla por ahuellamiento según ambos métodos ($1000 < TMDA < 5000$ y estructuración media)

Configuración de carga	Falla por ahuellamiento (años)	
	Miner	MEPDG
C1 (CAT)	9,0	1,8
C2 (CAT)	10,0	1,0
C3	14,0	2,9
C4	7,0	2,0

Figura 9. Falla por ahuellamiento: $TM_{DA} < 1000$ y estructuración media

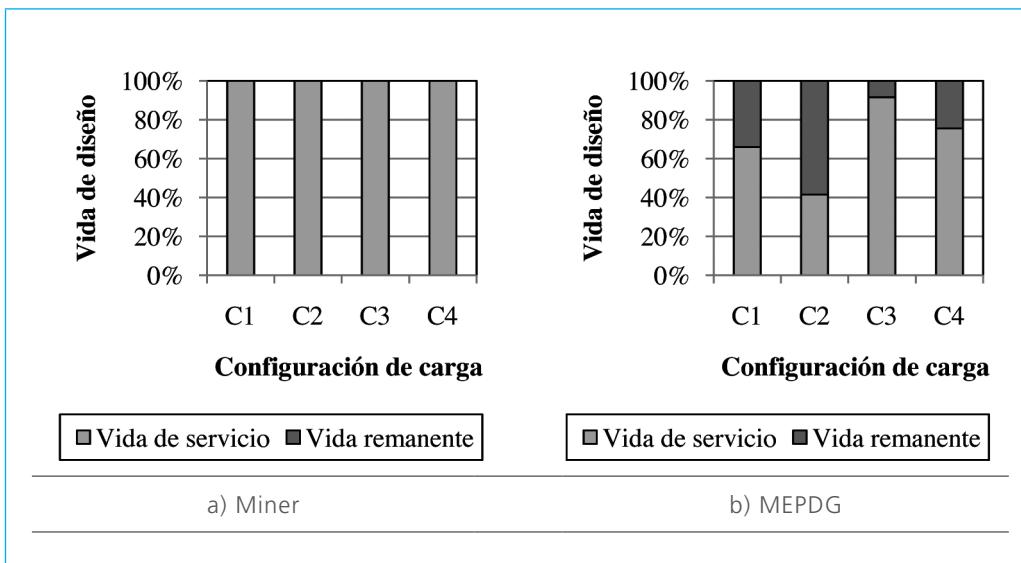
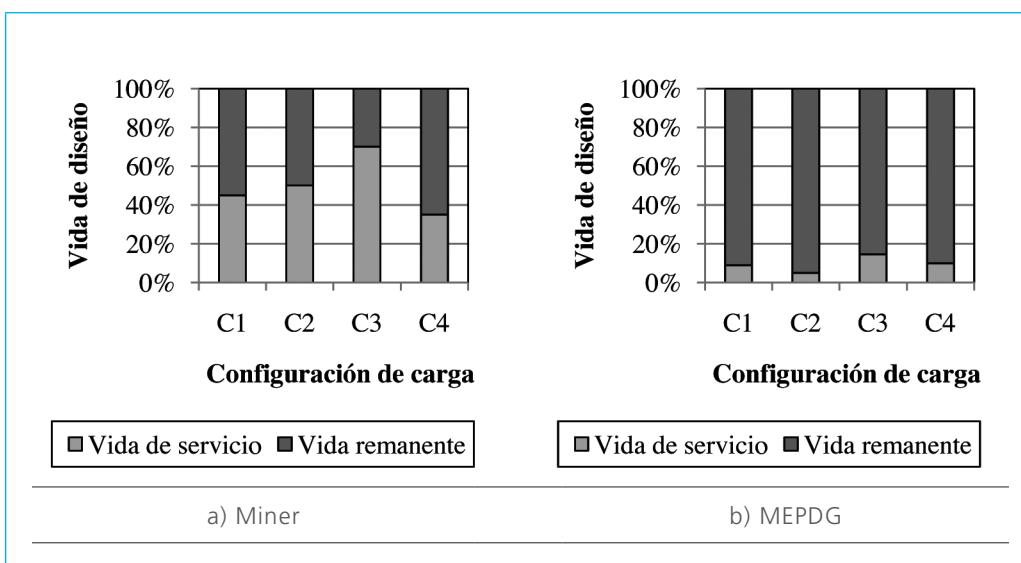


Figura 10. Falla por ahueamiento: $1000 < \text{TMDA} < 5000$ y estructuración media



En general, los resultados obtenidos mediante MEPDG sobreestiman el ahuellamiento superficial del pavimento, con respecto al método del consumo anual de fatiga. Además, la tendencia obtenida según MEPDG indica que el ahuellamiento es proporcional al peso

bruto total. Este resultado se debe a que el modelo de deterioro utilizado por MEPDG considera el ahuecamiento superficial como el resultado de una deformación permanente en cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento.

6. Conclusiones

Se propuso un método de comparación teórico de la vida de fatiga de CAT bajo un enfoque de análisis mecanicista-empírico considerando la totalidad de cada camión típico considerado. El estudio contempló el uso de los métodos de diseño francés (ALIZE-LCPC) y americano (MEPDG) complementado con la aplicación de la Ley de Miner de acumulación de fatiga. El modelo permitió realizar una comparación detallada del ciclo de vida de pavimentos asfálticos típicos, solicitados por configuraciones de alto tonelaje (CAT) y configuraciones convencionales.

De las cuatro configuraciones evaluadas, tanto para el agrietamiento por fatiga como para el ahuellamiento superficial, la que produce mayor impacto estructural es el camión-remolque (C4), y la que produce menor impacto es el tracto-semirremolque (C3), ambas con un nivel de carga de 45 t. En una condición intermedia se encuentran las CAT, donde el bitrén largo de 75 t (C2) produce un impacto levemente menor que el bitrén corto de 61 t (C1). Estos resultados son válidos para la evaluación del consumo de fatiga según la Ley de Miner.

Los resultados obtenidos mediante MEPDG subestiman el impacto por agrietamiento con respecto a la evaluación del consumo de fatiga, estimando en todos los casos una vida de servicio mayor. Aunque la tendencia de impacto estructural según configuración de carga se mantiene.

Por el contrario, con respecto al ahuellamiento superficial, MEPDG sobreestima el impacto estructural con respecto a la evaluación del consumo de fatiga, estimando en todos los casos que el pavimento alcanza el umbral de ahuellamiento a los pocos años de la puesta en servicio.

Además, la tendencia de daño obtenida según MEPDG indica que el ahuellamiento es proporcional al peso bruto total. De esta forma, la configuración que

alcanza el umbral de ahuellamiento más rápidamente es el bitrén largo de 75 t (C2), seguido por el bitrén corto de 61 t (C1). De las configuraciones tradicionales (C3 y C4), el tracto-semirremolque produce un menor impacto que el camión-remolque, ambas con 45 t.

A pesar de las limitaciones para el uso de MEPDG en Chile, los resultados de ahuellamiento superficial entregan una tendencia clara de la relación que existe entre el peso bruto total y este tipo de deterioro, con lo cual se obtiene evidencia teórica de que las CAT producen un mayor nivel de ahuellamiento en forma proporcional al peso bruto total. Este resultado, se debe a que el modelo de deterioro utilizado por el método MEPDG, considera el ahuellamiento superficial como el resultado de la deformación permanente en cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento. Por el contrario, el modelo de ahuellamiento utilizado en la evaluación del consumo de fatiga, considera el ahuellamiento superficial como el resultado de niveles excesivos de tensión-deformación en la subrasante.

A la luz de los resultados obtenidos, se puede decir que los pavimentos de estructuración débil no son adecuados para el transporte de alto tonelaje, aun cuando el tránsito solicitante sea bajo. Con respecto a las estructuras de pavimento de capacidad media, su uso parece ser adecuado para caminos con un bajo nivel de tránsito de camiones, sin embargo, para el nivel de tránsito considerado como medio-alto, el pavimento alcanza el umbral de falla tanto por agrietamiento como ahuellamiento en forma prematura, mucho antes de cumplir con su vida de diseño.

Se recomienda evaluar el impacto de CAT en otro tipo de estructuras de pavimentos presentes en la red vial nacional: como pavimentos de hormigón y recapados asfálticos sobre pavimentos de hormigón. Con esto, se podría realizar una evaluación de la compatibilidad con la operación de CAT de la infraestructura vial a nivel interregional, lo cual es fundamental para definir rutas de transporte de carga pesada

REFERENCIAS

1. Asphalt Institute (1981). Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways & Streets. Manual Series MS-1. Lexington, UK.
2. 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.
3. CONTRAN (2006). Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga - CVC, a que se referem os arts. 97, 99 e 314 do Código de Trânsito Brasileiro-CTB. Resolução nº 211/2006. Conselho Nacional de Trânsito. Brasil.
4. 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.
5. Díaz (2011). Transporte de Alto Tonelaje: Impacto Estructural en Pavimentos Asfálticos. Memoria de Título. Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Chile.
6. DOT (2004). Comprehensive Truck Size and Weight Study. United States Department of Transportation. Estados Unidos.
7. 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.
8. Huang, Y. (2004). Pavement Analysis and Design. Second Edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey.
9. 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.
10. MOP (1980). Peso máximo de vehículos que pueden circular por caminos públicos. Decreto Supremo 158/1980. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
11. MOP (2010). Manual de Carreteras Volumen N° 3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
12. 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. Canada.
13. NCHRP (2004). Guide for Mechanistic Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report. NCHRP Project 1-37A. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, National Research Council. EE.UU.
14. NTC (2009). Quick Reference Guide to National Heavy Vehicle Access Schemes and Arrangements. National Transport Commission. Australia.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. SECTRA (2006). Análisis Estratégico del Sistema de Transporte Intermodal de la Macrozona Sur. Secretaría de Planificación de Transporte. Chile.
19. Shell (1978). Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. Shell International Petroleum Company Limited SIPCL. United Kingdom.
20. Sun, L., Hudson, W. y Zhang, Z. (2003). Empirical-Mechanistic Method Based Stochastic Modeling of Fatigue Damage to Predict Flexible Pavement Cracking for Transportation Infrastructure Management. ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, N°2, pp. 109-117.
21. Thenoux, G. y Carrillo, H. (2002). Análisis de Casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. Actas 6^º Congreso Internacional PROVIAL, pp. 11-26.