

ANÁLISIS MECANICISTA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS UTILIZADAS EN CHILE DISEÑADAS POR EL METODO AASHTO-93

Por Guillermo Thenoux Z. y Rodrigo Gaete P.

Resumen

En el presente trabajo, se estudian un conjunto de estructuras de pavimento diseñadas por el método AASHTO 93, para combinaciones de tránsito y suelos característicos en la realidad chilena, las cuales son analizadas mediante modelos y criterios de falla del tipo mecanicistas. Los criterios de falla del modelo mecanicista utilizado son el agrietamiento de las capas asfálticas y la deformación permanente de la subrasante. De los resultados obtenidos se proponen recomendaciones de diseño para cuando se utilice el método AASHTO-93. Las recomendaciones se relacionan con la estructuración de pavimentos y espesores mínimos de diseño para las capas asfálticas.

1. INTRODUCCION

El método AASHTO-93, se basa en experiencias empíricas de la prueba AASHTO efectuada en la década del 50 en el estado de Illinois, Estados Unidos. De la aplicación del método se obtienen valores requeridos de espesores para distintas estructuraciones de pavimentos (asfálticas y granulares), de modo de asegurar que durante un período de tiempo determinado, bajo una sollicitación de tránsito y nivel de confiabilidad dada, el pavimento no baje de un nivel mínimo de servicio (serviciabilidad). Sin embargo, el umbral de serviciabilidad por sí solo, no considera y/o discrimina otros deterioros importantes que se presentan en los pavimentos cuando la falla de éste es netamente estructural. Es decir, el agrietamiento por fatiga de las capas asfálticas, el ahuellamiento por fatiga de la subrasante, etc., los cuales en el mediano y largo plazo no solo afectan la serviciabilidad, sino que además, la integridad estructural de las diferentes capas que conforman el pavimento.

El objetivo de este trabajo, es el estudio de un conjunto de estructuras de pavimento diseñadas por el método AASHTO 93 (AASHTO, 1993), para distintos niveles de sollicitaciones de tránsito y capacidad de soporte de suelos de fundación más usuales en la realidad chilena, las cuales son analizadas mediante modelos y criterios del tipo mecanicistas.

La metodología empleada consistió en determinar los espesores necesarios de pavimentos, diseñados según el método AASHTO de acuerdo a la última versión de 1993, utilizando una combinación matricial para las variables de tránsito y capacidad de soporte del suelo de fundación. Los parámetros de diseño AASHTO uti-

lizados correspondieron a aquellos recomendados para la realidad chilena. Las estructuras de pavimento, diseñadas por el método AASHTO, fueron luego analizadas mediante un modelo mecanicista, el cual utiliza la herramienta computacional MEMUC (Modelo Estructural Multicapa Universidad Católica), desarrollada por la Universidad Católica de Chile durante las investigaciones realizadas para el Ministerio de Obras Públicas de Chile (PUC, 1989).

2. METODOLOGIA AASHTO PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1 Antecedentes Generales

Durante la década del 50 se realizó en el estado de Illinois una investigación denominada "AASHTO Road Test", cuya finalidad fue desarrollar un método empírico de diseño para los pavimentos, tanto rígidos como flexibles, para ser utilizado en forma general en los distintos estados norteamericanos (AASHTO, 1972). Este modelo considera que el deterioro de un pavimento con el tránsito sollicitante se manifiesta como la pérdida de serviciabilidad, hasta llegar a un nivel que resulta inaceptable para el usuario. Con el fin de poder determinar la habilidad con que un pavimento sirve al usuario, se desarrolló un parámetro denominado PSR (Present Serviciability Rating), el que califica la calidad de una carretera a través de la opinión (subjetiva) de un panel de usuarios y conductores. La calificación se realiza empleando una escala como la que se presenta en Tabla 1.

De acuerdo a la calificación PSR, un pavimento nuevo obtiene una calificación entre 4 y 5, y a medida que se deteriora va disminuyendo su calidad de servicio hasta valores que hacen necesaria su rehabilitación.

Tabla 1. Calificación del índice de serviciabilidad PSR.

PSR	Calificación
0 - 1	Muy mala
1 - 2	Mala
2 - 3	Regular
3 - 4	Buena
4 - 5	Muy buena

Con posterioridad, además de la evaluación subjetiva de como los usuarios calificaban la serviciabilidad de los pavimentos (PSR), se incorporaron mediciones físicas del comportamiento y del estado del pavimento, como indicadores que permiten cuantificar objetivamente el deterioro asociado a la pérdida de serviciabilidad que experimenta un pavimento en servicio. La evaluación cuantitativa de la serviciabilidad, se denominó PSI (Present Serviability Index) y utiliza la misma escala de calificación utilizada por el índice PSR.

La relación entre el valor PSI, y los distintos indicadores de deterioro considerados para la evaluación en pavimentos asfálticos es la siguiente:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 0.01\sqrt{C + P} - 1.38 RD^2 \quad (1)$$

donde:

- SV : Promedio de la varianza de las mediciones de la inclinación (slope variance), en ambas huellas del pavimento con respecto a la rasante inicial.
 C : Area con grietas visibles expresadas en ft² por cada 1.000 ft² de superficie de pavimento.
 P : Area de superficie bacheada, expresada en ft² por cada 1.000 ft² de superficie de pavimento
 RD² : Ahuellamiento promedio, pulgadas

De la relación anterior, se puede observar que el indicador de deterioro que tiene la mayor influencia en la serviciabilidad del pavimento corresponde a la variable SV (Slope Variance), la cual en la práctica se relaciona con la rugosidad del pavimento.

2.2. Uso del método AASHTO en Chile

La primera versión de la guía AASHTO de 1972, fue adaptada en Chile por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras (MOP, 1981). En 1986 se adoptó la nueva versión de la guía AASHTO la cual incorporó importantes modificaciones conceptuales tales como el uso de una confiabilidad del diseño y variabilidad de los parámetros de diseño. La nueva guía incorporó también procedimientos de diseño para recapados, procedimiento que fue mejorado en la versión corregida de 1993. Esta última versión es la que se utiliza en la actualidad en Chile.

Debido a que el método de diseño AASHTO es un método empírico, una parte importante de las recomendaciones de diseño para su empleo, responden más bien a resultados de investigación y/o experiencias locales en los Estados Unidos de Norte América, las que no necesariamente responden a situaciones específicas de Chile. Esta última situación, requiere adoptar el método de diseño e incorporar recomendaciones propias a nuestra realidad sin embargo, al momento de adoptar el método AASHTO, no se cuenta con investigación y/o experiencia documentada que respalde las modificaciones que se requieran realizar a las recomendaciones propuestas para el método original.

Dada esta situación base, en Chile se adoptan procedimientos propios para el manejo de las variables y la definición de los parámetros de diseño.

2.2.1 Variables de Diseño

- a) **Tránsito:** El tránsito se expresa en Ejes Equivalentes el cual es el producto del tránsito pesado acumulado para el período de diseño y un factor de estratigrafía de carga. En Chile se han realizado varios estudios al respecto, recomendándose distintas estratigrafías de carga de los vehículos pesados en donde se consideraran, diferentes configuraciones de ejes, niveles de carga y estructura del pavimento, nivel de serviciabilidad final, presión de inflado, etc. (MOP, 1995); (Alaff, 1989); (Inserrato, 1990); (MINVU, 1991); (MOP, 1993). Diversos estudios de estratigrafías de carga de la flota camiones en Chile, demuestran que existe una importante parte de la red de caminos que está sometida a cargas muy en exceso a las cargas máximas permitidas legalmente. Esto último, trae como consecuencia que los Ejes Equivalentes proyectados se cumplan antes del período de diseño. Del mismo modo, hay que considerar que el efecto destructivo (Factor de Eje Equivalente) de ejes sobrecargados se obtiene extrapolando las correlaciones AASHTO, por lo que la validez del diseño en general está circunscrita al uso de sobrecargas normales y no excesivas.
- b) **Suelo de Fundación** (Módulo Resiliente): Para la caracterización de la capacidad de soporte del suelo de fundación se debiera utilizar en rigor el Módulo Resiliente obtenido según el Método de Ensaye AASHTO T-294. Debido a la dificultad de disponer del equipamiento necesario para estos ensayos, se ha considerado la estimación de este parámetro a través de correlaciones con el ensaye CBR (MOP, 1993):

$$M_r = 17.6 CBR^{0.64} \quad \text{si } 2 < CBR < 12 \quad (2)$$

$$M_r = 22.1 CBR^{0.55} \quad \text{si } 12 \leq CBR \leq 80 \quad (3)$$

Otro aspecto importante del procedimiento se refiere a la definición del valor de diseño a utilizar debido a la variabilidad propia de los estratos de suelos y la variabilidad a lo largo del eje. La toma de muestras y el número de éstas, está supeditada al tipo de ensaye que se va a efectuar y las características propias del terreno. Existen por lo tanto, diversos métodos para calcular el valor más representativo de diseño del Módulo Resiliente.

Otra alternativa de medición, es mediante la utilización del Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer), el cual produce mayor variabilidad por medición pero permite una mayor cantidad de lecturas. Este último procedimiento está especialmente recomendado para aplicado el diseño de recapados.

2.2.2 Parámetros de Diseño

a) **Confiabilidad:** El método AASHTO-93 introduce el concepto de confiabilidad para asegurar estadísticamente, que el diseño cumpla con un nivel de serviciabilidad mayor o igual al considerado, aceptando un margen de "error". La asignación de un nivel de confiabilidad de un proyecto, considera una relación de riesgo de inversión y costo del proyecto en donde a menor incertidumbre en el diseño mayor el costo del pavimento por efecto del mayor espesor final que se diseña. Los valores usuales de confiabilidad utilizados en Chile, van desde un 50% para caminos secundarios de bajo tránsito, hasta un 80% para el caso de vías importantes de alto tránsito

b) **Variación Estándar:** La desviación estándar, considera las variaciones debidas tanto a la predicción del tránsito como a la variación propia que experimentan los parámetros de diseño en el proceso de construcción. El valor usualmente utilizado en Chile en pavimentos asfálticos es de 0.45.

Una primera diferencia que pudiera existir entre las condiciones de un país desarrollado y uno en vías de desarrollo es que las tasas de crecimiento del tránsito y su proyección a 10 ó 20 años pueden presentar una probabilidad de variación mayor. Esto último, básicamente por la inestabilidad propia de los países en vías de desarrollo. Una segunda diferencia se refiere a la variabilidad que experimentan los parámetros de diseño por variaciones de la construcción. Los valores que propone AASHTO, se determinan sobre un valor medio y una variabilidad media de los proyectos de construcción típicos de Norte América. Se estima que en Chile tanto el valor medio como la variabilidad de construcción es diferente a los de un país desarrollado.

En la aplicación del método AASHTO, el rango de coeficientes de variación que se puede utilizar no es tan significativo en comparación con la selección de un valor de Confiabilidad sin embargo, es posible demostrar a través del método mecanicista que la variabilidad que pueden experimentar algunos parámetros de diseño en la construcción pueden afectar significativamente el comportamiento de una estructura de pavimento.

c) **Drenaje:** Se consideran las condiciones drenantes del pavimento por medio de un coeficiente m_i , el cual mayor o menor los coeficientes estructurales de las capas de un pavimento según la calidad de drenaje y el porcentaje del tiempo que la estructura está expuesta a niveles cercanos a la saturación. De acuerdo a la experiencia y estudios realizados en Chile, los valores para este parámetro pueden oscilar entre 1.00 para condiciones regulares de drenaje y altas precipitaciones, hasta 1.40 para condiciones de buen drenaje y mínimas precipitaciones (LEN,1995).

d) **Coefficientes Estructurales:** Los coeficientes estructurales que habitualmente se consideran para los materiales más utilizados en estructuras de pavimentos asfálticos en Chile, se presentan en la Tabla 2. Se adoptan directamente los valores recomendados por AASHTO:

Tabla 2. Coeficientes estructurales en pavimentos asfálticos.

Tipo de material	Coefficiente estructural
Concreto asfáltico de rodadura	0.43
Concreto asfáltico intermedio	0.41
Base asfáltica graduación gruesa	0.33
Base asfáltica graduación abierta	0.28
Base granular (CBR \leq 80%)	0.13
Subbase granular (CBR \leq 40%)	0.12

e) **Pérdida del Índice de Serviciabilidad:** El Índice de Serviciabilidad inicial p_i que se considera para el diseño, corresponde al obtenido en la prueba AASHTO en pavimentos asfálticos y que tiene un valor de 4.2. Para el Índice de Serviciabilidad final p_f , se considera un valor de 2.0 para la mayoría de los casos, utilizándose en algunas vías de mayor importancia un valor de 2.5. Según las técnicas de construcción que se emplee, en la actualidad es posible conseguir pavimentos con Índices de Serviciabilidad inicial, mejor al considerado por AASHTO. Empleando modelos de deterioro de pavimento, es posible demostrar que si se obtiene un mayor Índice de Serviciabilidad inicial, la vida útil de un pavimento se extiende.

2.2.3 Estructuración de capas

De la aplicación de la metodología AASHTO, se determina un número estructural correspondiente a todo el conjunto de capas de pavimento sobre la sub-rasante, el que se calcula del siguiente modo:

$$NE = h_1 a_2 + h_2 a_2 m_2 + h_3 a_3 m_3 \quad (4)$$

donde:

- h_i : Espesor de capa i
- a_i : Coeficiente estructural de capa i
- m_i : Coeficiente de drenaje de capa i

Sin embargo, existen muchas combinaciones de espesores de capas que satisfacen el número estructural requerido. Para determinar en forma mas precisa los espesores mínimos de cada capa del pavimento, el método AASHTO utiliza el procedimiento de análisis por capas, el cual consiste en calcular primero el número estructural de las capas asfálticas sobre la base granular, y posteriormente ajustar el espesor de las capas granulares por la diferencia de la veri-

ficación sobre la base y la subrasante, tal como se muestra en el esquema presentado en la Figura 1. En Chile, la práctica habitual considera efectuar el análisis por capas para solicitaciones mayores a 10 millones de Ejes Equivalentes.

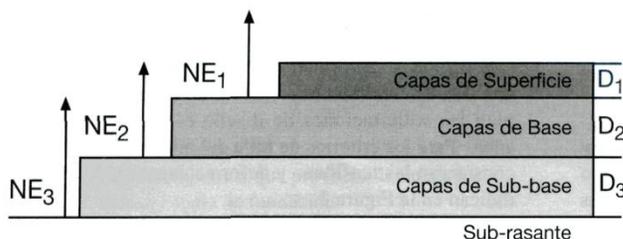


Figura 1. Verificación por Capas Según AASHTO 93.

2.3 Diseño de Estructuras de Pavimentos por Método AASHTO para un Rango de Condiciones Típicas Chilenas

En el presente trabajo, se estudian un conjunto de estructuras de pavimento diseñadas por el método AASHTO 93, para combinaciones de tránsito y suelos característica en la realidad chilena. Estas son:

- Solicitaciones de Tránsito: 1, 2, 5, 10, 20, 40, 60 y 80 Millones de E.E.
- CBR Suelo (%): 5, 10, 20 y 40

Los parámetros de diseño utilizado para las diferentes condiciones de tránsito y suelo son:

- Confiabilidad R (%): 50 % para tránsitos de 1, 2 y 5 Millones de E. E.
70 % para tránsitos de 10 y 20 Millones de E. E.
75 % para tránsitos de 40, 60 y 80 Millones de E. E.
- Serviciabilidad: $P_i = 4.2$
 $P_f = 2.0$
- Variabilidad: $S_o = 0.45$
- Coef. Estructurales: (Ver Tabla 2)
- Coefficiente de Drenaje: $m_i = 1.10$ (valor promedio)
- Análisis por capas: Sólo para solicitaciones iguales o mayores a 10 Millones de E.E.

Las estructuras resultantes de la aplicación del método AASHTO de diseño para cada una de las combinaciones de las variables tránsito y suelos, y utilizando los respectivos parámetros considerados en cada caso, se presentan en Tabla 3.

3. ANALISIS MEDIANTE MODELO MECANICISTA

Tomando en consideración que el nivel de serviciabilidad no considera en forma significativa otros dete-

rioros importantes como ser: el agrietamiento y la deformación de la subrasante, los cuales en el mediano y largo plazo afectan la integridad estructural del pavimento, y por lo tanto la calidad de servicio al usuario, se verifican las estructuras de pavimento diseñadas por el método AASHTO 93, mediante modelos y criterios del tipo mecanicistas.

La verificación por el método mecanicista, se realiza utilizando la herramienta computacional MEMUC (Modelo Estructural Multicapa Universidad Católica), desarrollada por la Universidad Católica de Chile durante las investigaciones realizadas para el Ministerio de Obras Públicas de Chile (PUC, 1989), la cual utiliza como subrutina para el cálculo de tensiones y deformaciones al programa ELSYM5 (Ahlborn Gale, 1972))

En este modelo la representación del pavimento se realiza mediante una estructura multicapa, solicitada por una carga vertical uniformemente repartida en un área circular, aplicada en la superficie del pavimento. La modelación del pavimento se hace considerando un sistema estructural multicapa, donde cada capa "i", se caracteriza por su espesor (h_i), módulo de elasticidad (E_i) y coeficiente de Poisson (u_i)

Para esta estructuración se asume que se cumplen las hipótesis a partir de las cuales Burmister desarrolló sus ecuaciones, y son las siguientes (Huang, 1967):

- El pavimento está compuesto por capas planas paralelas, de extensión infinita en cualquier dirección sobre el plano horizontal.
- Todas las capas tienen un espesor finito, con excepción de la última (suelo de fundación), que es semi-infinita en el sentido vertical.
- El apoyo de cada capa sobre la inmediatamente subyacente es uniforme.
- Los materiales que constituyen cada capa son homogéneos e isótropos.
- La relación tensión-deformación de los materiales es lineal.

La modelación habitual de los pavimentos asfálticos se realiza en base a tres tipos de capas:

- Capas asfálticas
- Capas granulares
- Suelo de sub-rasante

En el caso de que un pavimento este compuesto por capas asfálticas de diferente rigidez como ser una capa de rodadura, capa intermedia y una capa de base asfáltica, se puede estimar un módulo de elasticidad equivalente según la siguiente relación (PUC, 1989):

$$E_{ca} = \left(\frac{h_1 \sqrt[3]{E_1} + h_2 \sqrt[3]{E_2} + \dots + h_n \sqrt[3]{E_n}}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \right) \quad (5)$$

donde:

- Eca : Módulo de elasticidad equivalente capas asfálticas
- hi : Espesor capa asfáltica i
- Ei : Módulo de elasticidad capa asfáltica i

Nota: Para las capas de rodadura, se considera un módulo de elasticidad a 20°C de 3000 MPa, y para la base asfáltica se considera un módulo de elasticidad de 1700 MPa.

Para considerar el efecto de la temperatura y velocidad de carga en la rigidez de las mezclas, el modelo calcula los módulos de elasticidad de las capas asfálticas correspondientes a cada condición de temperatura y velocidad. Para esto, se utiliza la expresión general propuesta en las investigaciones de la Universidad Católica, que permite determinar el valor del módulo de elasticidad de una capa asfáltica en condiciones de temperatura y velocidad de pasada en relación al valor del módulo para condiciones normalizadas (T = 20°C y v = 4 km/h) (PUC, 1989).

$$E_{T,v} = E_{20,4} * [(1.054)^{20-T} * (\frac{v}{4})^{0.2}] \quad (6)$$

donde:

- $E_{T,v}$ = Módulo de elasticidad capa asfáltica a una temperatura T (°C) y velocidad de pasada de los vehículos de v (km/h).
- $E_{20,4}$ = Módulo de elasticidad de la capa asfáltica a 20°C de temperatura y una velocidad de pasada de los vehículos de 4 (km/h).

En el caso de las capas granulares, las metodologías para determinar sus propiedades mecánicas son complejas, debido que no existe una relación lineal entre tensiones y deformaciones, existiendo por lo tanto un módulo de elasticidad que es variable con el nivel de tensiones.

Para la estimación de los módulos de elasticidad de las capas granulares, se adoptó la metodología propuesta por Shell, donde el módulo de cada capa, depende del módulo de la capa subyacente de acuerdo a la siguiente relación:

$$E_i = k E_{i-1} \quad (7)$$

$$k = 0.2 h_i^{0.45} \quad \text{con } 2 < k < 4$$

donde:

- Ei : Módulo de elasticidad capa i
- hi : Espesor de capa i (mm)

Como coeficiente de Poisson se consideró 0.35 para las capas asfálticas y granulares, y 0.40 para el suelo de fundación. Los parámetros de tránsito se modelan mediante la sollicitación de ejes equivalentes con una carga de referencia de 40 KN (mitad del eje estándar), presión de inflado de 690 Mpa (100 psi) y velocidad de circulación de vehículos comerciales de 80 km/hr. Las sollicitaciones del primer año se calculan de modo que a una tasa de crecimiento promedio de un 6% anual se cumplan las sollicitaciones de diseño esperadas durante 20 años. Para los criterios de falla del modelo mecanicista se consideran las tensiones y deformaciones críticas que se indican en la Figura 2.

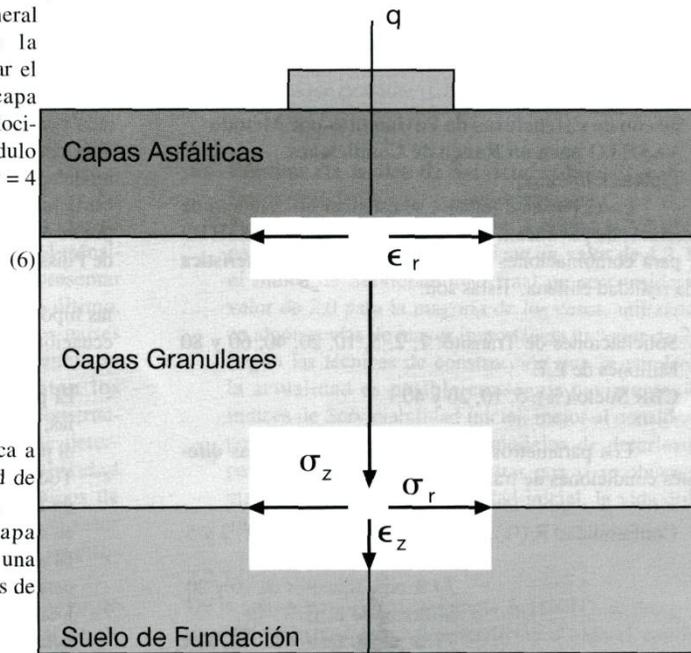


Figura 2. Tensiones y deformaciones críticas en un pavimento asfáltico.

Las leyes de fatiga que utiliza el modelo son las siguientes:

- a) La fatiga de las capas asfálticas se modela, según las leyes propuestas por Asphalt Institute, la cual muestra una buena relación al comportamiento de las mezclas mas comunes en Chile (PUC, 1992):

$$N = 6.608685 \times 10^{-3} \times \epsilon_r^{-3.291} \times E^{-0.854} \quad (8)$$

donde:

- Na : Número de ciclos que provocan la fatiga por agrietamiento de las capas asfálticas
- ϵ_r : Deformación unitaria radial de tracción en la



4. ANALISIS DE RESULTADOS

- la cara inferior de la capa asfáltica
 E : Rigidez de la mezcla, kg/cm²
- b) Para modelar la fatiga del suelo se utiliza la fórmula del método Shell (Shell, 1978):

$$N_s = 6.146 \times 10^{-7} \times E \epsilon_z^{-4} \tag{9}$$

donde:

- N_a : Número de ciclos que provocan la fatiga por falla del suelo de fundación
- ε_z : Deformación unitaria vertical de compresión en la superficie del suelo

Nota: Junto con aplicar las leyes de fatiga se verifica el estado tensional en la cara inferior de las capas granulares, para prever el peligro de descompactación (Kraemer y Martínez, 1977). Para esto se debe verificar la siguiente relación:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_z + q} \leq K_r \tag{10}$$

donde:

- σ_r : Tensión radial de tracción en la cara inferior de la capa granular.
- σ_z : Tensión vertical de compresión en la cara inferior de la capa granular.
- K_r : Coeficiente de roce interno del material (Para φ=45°, k= tg(φ) =1).
- q : Presión debida al peso propio de los materiales.

El modelo permite determinar la fatiga, discriminando por las distintas estaciones del año en donde se presenten diferencias de temperaturas significativas entre las temperaturas medias estacionales. Las temperaturas medias del pavimento consideradas para los cálculos, fueron obtenidas a partir de mediciones efectuadas en tramos testigos durante las investigaciones de la Universidad Católica de Chile. A saber: 23.2 °C, 13.5 °C y 18.0 °C , para las estaciones de Verano, Invierno y Primavera respectivamente.

Para calcular las solicitaciones admisibles sumando todas las condiciones de temperatura en el año, se utiliza la ley de Miner:

$$N = \frac{1}{\sum(1/N_i)} \tag{11}$$

en donde:

- N : Total de solicitaciones admisibles para todas las estaciones
- N_i : Solicitaciones admisibles para cada estación i

A las estructuras de pavimento de la Tabla 3, diseñadas según AASHTO 1993, se las analizó mediante el programa MEMUC estimándose la cantidad de solicitaciones admisibles que causan la falla de la estructura según sea el deterioro analizado.

En la Figura 3, se muestra la pantalla típica de entrada de datos del programa MEMUC, con un ejemplo de aplicación para el caso de una estructura diseñada según AASHTO para admitir 10 millones de E.E. sobre un suelo con un CBR de 10%. En la Figura 4, se muestra un análisis con las tensiones y deformaciones críticas de cada capa, y en la Figura 5, se muestra la salida con el análisis de fatiga para cada uno de los deterioros considerados.

En el ejemplo presentado, se predice un inicio de la fatiga por agrietamiento de las capas asfálticas alrededor del año 7. Para la fatiga por deformación de la subrasante, el modelo predice una cantidad superior a 15 veces las solicitaciones esperadas de diseño para los 20 años, con lo cual este deterioro no debiera presentarse en teoría en esta estructura. Para la verificación de la relación de tensiones de las capas granulares, los valores encontrados resultan menores a 1.0 . Al verificar la fatiga de las capas asfálticas para el resto de las estructuras, el modelo predice el inicio del agrietamiento a edades que fluctúan entre los 2 y 9 años, según se muestra en la Tabla 4, con lo cual los diseños de pavimentos analizados pueden parecer en primera instancia inadecuados respecto al agrietamiento por fatiga del asfalto.

Es importante señalar, que en el modelo AASHTO no está considerado en forma directa el agrietamiento, según se desprende de la relación (1), ya que el objetivo principal de este método es diseñar estructuras de pavimento que tengan un comportamiento adecuado "solamente respecto del Índice de Serviciabilidad p". Sin embargo, en forma indirecta el modelo AASHTO considera la posibilidad de aplicar acciones de mantenimiento preventivo como ser: sello de grietas, riegos de gravilla, lechadas, etc., con el objeto de prevenir una caída brusca del nivel de servicio, por efecto de agrietamiento, antes de completarse el ciclo de vida útil. Al respecto, AASHTO define al mantenimiento preventivo como: "acciones que permiten retardar el deterioro futuro o mejorar la condición funcional del pavimento sin incrementar su capacidad estructural" (Ref. 1). Por lo tanto consideraremos que una estructura de pavimento está adecuadamente diseñada, si solo requiere de la aplicación de 1 a 2 acciones de mantenimiento preventivo durante el período de diseño.

Por otra parte, de acuerdo a la experiencia chilena basada en el seguimiento en pavimentos en servicio, las estructuras que han tenido un adecuado comportamiento al tránsito solicitante presentan los primeros síntomas de agrietamiento entre los años 7 y 10 desde su construcción, a los cuales normalmente es necesario efectuarles con posterioridad una conservación tipo sello asfáltico (tratamiento superficial o lechada), pudiendo así completar los primeros 20 años de diseño con un nivel aceptable de dete-

rioro. Esto permite extender la vida útil de estos pavimentos a un nuevo período de diseño mediante la aplicación de un recapado de bajo espesor. En el otro extremo, estructuras de pavimento con espesores de capas insuficientes en relación al tránsito solicitante y soporte del suelo, presentan agrietamientos prematuros por fatiga antes del 4º año desde su construcción, requiriendo normalmente un recapado de mayor espesor antes de completar la mitad de su vida útil.

En base a estas consideraciones, se definen los siguientes criterios para clasificar la suficiencia en el diseño estructural del pavimento, analizado desde un punto de vista mecanicista:

- a) estructura suficiente (S): inicio de grietas a los 7 ó mas años según el modelo mecanicista, lo que puede asegurar que dentro de los 20 años solo se requerirá acciones de mantenimiento preventivo (tratamiento superficial o lechadas).
- b) estructura levemente insuficiente (L): inicio de grietas entre 4 a 6 años, con lo cual además de los tratamientos preventivos, es posible que se requiera de un refuerzo dentro de los 20 años.
- c) Estructura insuficiente (I): inicio de grietas antes de los 4 años, con lo que el pavimento se deteriora prematuramente, requiriéndose una rehabilitación antes de la mitad de su vida útil.

En la Tabla 4, se presenta la clasificación para las estructuras según el criterio definido anteriormente. Se observa que de las estructuras clasificadas como insuficientes, una alta proporción corresponden a las diseñadas sobre suelos de baja capacidad de soporte (CBR 5%); sin embargo, las estructuras diseñadas para las mismas solicitaciones, sobre suelos con CBR de 10% mejoran significativamente su resistencia a la fatiga para las capas asfálticas. Otros casos de clasificación insuficiente se producen al utilizar espesores mínimos para tránsitos con más de 5 millones de E.E.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis efectuado mediante la aplicación de conceptos mecanicistas, a las estructuras diseñadas mediante la metodología AASHTO 93, utilizando los parámetros y criterios habituales en Chile, se tienen las siguientes conclusiones:

- Las estructuras de pavimento diseñadas por AASHTO sobre subrasantes de baja capacidad de soporte (CBR de 5% o menor) tienen una menor resistencia a la fatiga. Se recomienda en estos casos considerar el mejoramiento de la subrasante mediante reemplazo de material de mejor calidad o estabilización del suelo, de modo de poder lograr un CBR de diseño mayor o igual a 10%, lo que puede mejorar el comportamiento del pavimento.

- Los casos en que se realiza el análisis por capas muestran en general un comportamiento adecuado a la fatiga, con excepción de los diseños en suelos de CBR de 5%.
- La mayoría de las estructuras no presentan teóricamente problemas según criterio de falla por deformación de las sub-rasante. Esto se verifica con el comportamiento real de pavimentos en servicio en Chile, donde el ahueamiento, por efecto de la deformación de la subrasante, es un problema de poca ocurrencia. Por lo tanto respecto a este criterio de comportamiento, el método AASHTO proporciona una adecuada estructuración.
- En la mayoría de los casos, las estructuras tienen un adecuado comportamiento desde el punto de vista mecanicista.
- La mayoría de las estructuras no presentan teóricamente problemas según falla por deformación de las capas granulares.
- Espesores mínimos de 6 cm de capas asfálticas no son adecuados para solicitaciones mayores a 2.000.000 de E.E. en 20 años, ya que el modelo mecanicista predice fallas prematuras por fatiga de la capa asfáltica.

Del análisis realizado y de la experiencia práctica, se presentan las siguientes recomendaciones:

- En los casos de diseños sobre subrasantes de baja capacidad de soporte (CBR 5% o menor) es recomendable considerar el mejoramiento de la subrasante, lo que puede asegurar un mejor comportamiento del pavimento.
- En el caso de diseños sobre CBR mayores a 40%, es posible considerar espesores mínimos de capas asfálticas para solicitaciones hasta 5 millones de E.E..
- Entre 2.000.000 y 5.000.000 de E.E. se recomienda considerar un espesor mínimo de 10 cm de capas asfálticas. Esto concuerda con las recomendaciones de AASHTO y del Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1983).
- El análisis por capas que propone la AASHTO es recomendable que se realice para solicitaciones sobre 5.000.000 de E.E en 20 años. Los casos en que se realiza el análisis por capas muestran un adecuado comportamiento a la fatiga, excepto en subrasantes de baja capacidad de soporte.
- La utilización de espesores mínimos de pavimento, solo se recomienda para solicitaciones menores a 2 millones de E.E. en 20 años. Entre 2 y 5 millones de E.E. debiera considerarse un espesor de al menos 10 cm de capas asfálticas, y sobre los 5 millones de E.E. resulta recomendable realizar el análisis por capas.
- Para el caso de las estructuras clasificadas como levemente insuficientes, como ser las de mayores solicitaciones de tránsito, es más adecuado como alternativa al aumento de espesores iniciales, tener en cuenta la aplicación de una capa de refuerzo delgada durante su vida útil. Esto tiene como ventaja adicional, poder incrementar la capacidad estructural del pavimento de acuerdo a las solicitaciones reales que se tendrán en el futuro. En la Tabla 5, se entregan las recomendaciones

de mejoramiento de diseño para el caso de las estructuras de pavimento clasificadas como insuficientes.

- Finalmente, es importante señalar que la nueva guía AASHTO programada para el año 2002, y que actualmente se encuentra en estudio, incorporará conceptos del tipo mecanicista, lo cual redundará en un método de diseño que tomará en cuenta otros tipos de deterioros adicionales a la pérdida de serviciabilidad para el diseño de estructuras de pavimento.

REFERENCIAS

- AASHTO (1972) Interim Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO (1996) Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- ALAFF, V. (1989) Análisis de Factores de Equivalencia Isoestructurales para Configuraciones de Ejes No – Convencionales en Firmes Flexibles. Memoria de Título, Ing. Civil U. de Ch.
- AHLBORN GALE (1972). Elastic Layered System with one to ten normal Identical Circular Uniform Loads. Unpublished Computer Application. University of California at Berkeley: Institute of Transportation and Traffic Engineering.
- ASPHALT INSTITUTE, MS-17 (1983) Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation.
- HUANG, Y.M. (1967). Stress and Displacements in viscoelastic layered systems under circular loaded areas. II International Conferences on the Estructural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan, U.S.A.
- INSERRATO, M.(1990). El Efecto de la Presión de Inflado y Otros Parámetros en los Factores de Equivalencia de los Firmes Flexibles. Memoria de Título, Ing. Civil U. de Ch.
- KRAEMER, E. Y MARTINEZ, A (1977). Análisis de Tensiones y Deformaciones y Estudio de la Fatiga de las Secciones Estructurales de Firmes Flexibles de la Norma 6.1. España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- LEN Y ASOCIADOS LTDA (1995). Drenabilidad y Tiempos de Saturación para Bases de Pavimentos.
- MINVU (1991), Investigación sobre Estratigrafías de Pesos por Eje en Pavimentos Urbanos.
- MOP (1981). Manual de Carreteras, Volumen 3, Instrucciones de Diseño. Ministerio de Obras Públicas de Chile, Dirección de Vialidad, Santiago.
- MOP (1993). Ord. 12358, Recomendaciones Generales para el Diseño Estructural de Pavimentos según Método AASHTO, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Dirección de Vialidad.
- MOP (1995). Ord. 7870, Estratigrafías de Carga, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Dirección de Vialidad.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE. (1989) Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos, Informe Final, Volumen 11, Análisis Estructural.

Pontificia Universidad Católica de Chile (1992). Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos, Informe Final, Volumen III, Acciones y Estándares de Conservación.

SHELL (1978). Shell Pavement Design Manual. Shell International Petroleum Company Limited, Londres.

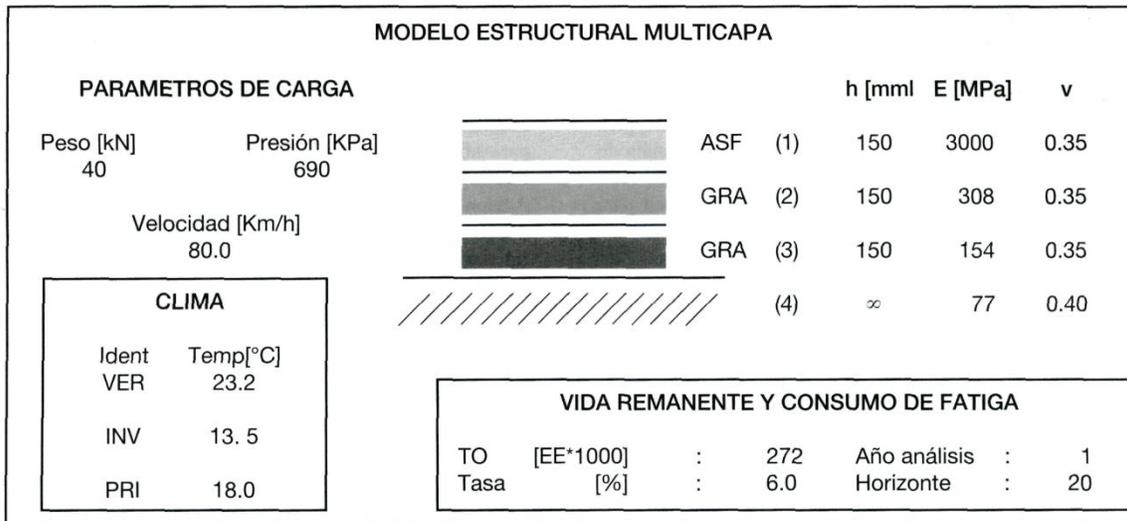
Guillermo Thenoux Z.

M.Sc, PhD

Profesor Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile. e-mail: gthenoux@ing.puc.cl

Rodrigo Gaete P.

Ingeniero Civil, Magister en Ciencias de la Ingeniería. Gerente CIIV, Centro de Ingeniería e Investigación Vial. DICTUC S.A. Pontificia Universidad Católica de Chile. e-mail: rjgaete@ing.puc.cl



Transito inicial (miles de ejes equivalentes)

Figura 3. Entrada de Datos Programa MEMUC.

***** ANALISIS ESTRUCTURAL *****

Tramo : ZC - T10 - CBR 10 De PK 0 De PK : 0
 Peso por rueda (kN) : 40 Presión (kPa) : 690 Velocidad (Km/h) : 80.0

PERIODO : VER
 Temperatura (°C) = 23.2 Deflexión (mm) = .41

CAPA	h (mm)	E (MPa)	v	MATERIAL	TENSIONES (kPa) Y DEF. UNIT.
1	150	4615	.35	ASF	ϵ_r = .1713E-03
2	150	308	.35	GRA	σ_r = .5071E+02 σ_z = -.4951E+02
3	150	154	.35	GRA	σ_r = .2059E+02 σ_z = -.2746E+02
4	∞	77	.40	SUE	ϵ_z = -.2719E-03

PERIODO : INV
 Temperatura (°C) = 13.5 Deflexión (mm) = .36

CAPA	h (mm)	E (MPa)	v	MATERIAL	TENSIONES (kPa) Y DEF. UNIT.
1	150	7687	.35	ASF	ϵ_r = .1256E-03
2	150	308	.35	GRA	σ_r = .3945E+02 σ_z = -.3911E+02
3	150	154	.35	GRA	σ_r = .1641E+02 σ_z = -.2297E+02
4	∞	77	.40	SUE	ϵ_z = -.2238E-03

PERIODO : PRI
 Temperatura (°C) = 18.0 Deflexión (mm) = .38

CAPA	h (mm)	E (MPa)	v	MATERIAL	TENSIONES (kPa) Y DEF. UNIT.
1	150	6067	.35	ASF	ϵ_r = .1457E-03
2	150	308	.35	GRA	σ_r = .4454E+02 σ_z = -.4376E+02
3	150	154	.35	GRA	σ_r = -.1833E+02 σ_z = -.2503E+02
4	∞	77	.40	SUE	ϵ_z = -.2459E-03

Figura 4. Análisis de Tensiones y Deformaciones Críticas.

***** CALCULO VIDA REMANENTE *****

PERIODO	CAPA 1 ASF (EE xE+6)	CAPA 2 GRA $\sigma r / (\sigma z + q)$	CAPA 3 GRA $\sigma r / (\sigma z + q)$	CAPA 4 SUE (EE xE+6)
VER	1.675	.91	.55	112.449
INV	3.009	.87	.50	244.992
PRI	2.260	.89	.53	168.096
Nadm =	2.187			158.532

***** CONSUMO DE FATIGA *****

Año	TRAF. ACUMULADO (EE xE+6)	CONS. FATIGA (ASFALTO)	CONS. FATIGA (SUELO)
1	.272	.12	.00
2	.560	.26	.00
3	.866	.40	.01
4	1.190	.54	.01
5	1.533	.70	.01
6	1.897	.87	.01
* 7	2.283	1.04	.01
* 8	2.692	1.23	.02
* 9	3.126	1.43	.02
* 10	3.585	1.64	.02
* 11	4.072	1.86	.03
* 12	4.589	2.10	.03
* 13	5.136	2.35	.03
* 14	5.716	2.61	.04
* 15	6.331	2.89	.04
* 16	6.983	3.19	.04
* 17	7.674	3.51	.05
* 18	8.406	3.84	.05
* 19	9.183	4.20	.06
* 20	10.006	4.58	.06

Figura 5. Cálculo de Vida Remanente y Consumo de Fatiga.

Tabla 3. Diseño de Estructuras de Pavimento.

CBR %	TRANSITO Millones de EE	ESTRUCTURA	ESPESORES				
			CR	CI	BA	BG	SB
5	1	E-5-1	6	-	-	15	15
	2	E-5-2	6	-	-	15	20
	5	E-5-5	6	-	-	20	25
	10	E-5-10	6	9	-	15	15
	20	E-5-20	7	10	-	15	20
	40	E-5-40	5	6	10	20	20
	60	E-5-60	5	7	10	20	20
	80	E-5-80	5	8	10	20	20
10	1	E-10-1	6	-	-	15	15
	2	E-10-2	6	-	-	15	15
	5	E-10-5	6	-	-	15	20
	10	E-10-10	6	9	-	15	15
	20	E-10-20	7	10	-	15	15
	40	E-10-40	5	6	10	15	15
	60	E-10-60	5	7	10	15	15
	80	E-10-80	5	8	10	15	15
20	1	E-20-1	6	-	-	20	-
	2	E-20-2	6	-	-	25	-
	5	E-20-5	6	-	-	15	15
	10	E-20-10	6	9	-	15	-
	20	E-20-20	7	10	-	15	-
	40	E-20-40	5	6	10	15	-
	60	E-20-60	5	7	10	20	-
	80	E-20-80	5	8	10	20	-
40	1	E-40-1	6	-	-	15	-
	2	E-40-2	6	-	-	20	-
	5	E-40-5	6	-	-	25	-
	10	E-40-10	6	9	-	15	-
	20	E-40-20	7	10	-	15	-
	40	E-40-40	5	6	10	15	-
	60	E-40-60	5	7	10	15	-
	80	E-40-80	5	8	10	15	-

CR: Capa de rodadura
 CI: Capa intermedia
 BA: Base asfáltica
 BG: Base granular
 SB: Subbase granular

Tabla 4. Solicitaciones Admisibles.

CBR %	TRANSITO Millones de EE	ESTRUCTURA	SOLICITACIONES ADMISIBLES				CLASIFI- CACION
			Asfalto		Suelo		
			N (millones)	Año fatiga	N (millones)	Año fatiga	
5	1	E-5-1	0,095	4	1,303	+20	I
	2	E-5-2	0,114	3	0,865	12	I
	5	E-5-5	0,191	2	4,182	18	I
	10	E-5-10	1,266	5	53,712	+20	L
	20	E-5-20	2,334	4	49,076	+20	I
	40	E-5-40	4,844	5	147,356	+20	L
	60	E-5-60	6,087	4	191,544	+20	I
	80	E-5-80	7,652	4	248,138	+20	I
10	1	E-10-1	0,249	8	5,767-	+20	S
	2	E-10-2	0,249	5	5,767	+20	L
	5	E-10-5	0,308	3	4,026	18	I
	10	E-10-10	2,187	7	158,532	+20	S
	20	E-10-20	3,518	6	293,288	+20	L
	40	E-10-40	6,301	6	577,069	+20	L
	60	E-10-60	7,871	5	+1000	+20	L
	80	E-10-80	9,850	5	+1000	+20	L
20	1	E-20-1	0,160	5	0,829	17	L
	2	E-20-2-	0,245	5	2,232	+20	L
	5	E-20-5-	0,667	5	22,573	+20	L
	10	E-20-10	1,831	6	81,324	+20	L
	20	E-20-20	3,034	5	48,897	+20	L
	40	E-20-40	5,260	5	312,591	+20	L
	60	E-20-60	7,455	5	206,133	+20	L
	80	E-20-80	9,381	4	273,028	+20	I
40	1	E-40-1	0,321	9	1,068	20	S
	2	E-40-2	0,431	7	2,902	+20	S
	5	E-40-5	0,584	4	7,846	+20	I
	10	E-40-10	2,899	9	181,705	+20	S
	20	E-40-20	4,533	7	101,564	+20	S
	40	E-40-40	8,380	7	+1000	+20	S
	60	E-40-60	10,137	6	261,873	+20	L
	80	E-40-80	12,663	6	+1000	+20	L

Clasificación: S : Suficiente
L : Levemente insuficiente
I : Insuficiente

Tabla 5. Recomendaciones para Estructuras Insuficientes.

ESTRUCTURA	RECOMENDACION	NUEVOS ESPESORES					RES. FATIGA		NUEVA CLASIFICACION
		CR	CI	BA	BG	SB	Asfalto		
		cm.					N (millones)	Año fatiga	
E-5-1	Mejorar suelo a CBR >10%	6	-	-	15	15	0,249	8	S
E-5-2	Mejorar suelo a CBR >10%	6	-	-	15	20	0,249	5	L
E-5-5	Mejorar suelo a CBR >10% y h min = 10 cm.	5	5	-	15	15	0,618	5	L
E-5-20	Mejorar suelo a CBR > 10%	7	10	-	15	20	3,518	6	L
E-5-60	Mejorar suelo a CBR >10%	5	7	10	15	15	7,871	5	L
E-5-80	Mejorar suelo a CBR >10%	5	8	10	15	15	9,850	5	L
E-10-5	h min = 10 cm.	5	5	-	15	15	0,618	5	L
E-20-80	Utilizar Bases y Subbases (15 + 15)	5	8	10	15	15	15,857	7	S
E-40-5	Utilizar Bases y Subbases (15 + 15)	6	-	-	15	15	1,926	11	S