

## **CALIBRACION DEL MODELO DE GRIETAS ESTRUCTURALES PARA PAVIMENTOS ASFALTICOS EN HDM-4 A LAS CONDICIONES DE CHILE**

### **CALIBRATION OF STRUCTURAL CRACKING MODELS FOR ASPHALT PAVEMENT IN HDM-4 TO THE CHILEAN CONDITIONS**

Por / By Hernán de Solminihaç, Priscila Hidalgo, Mauricio Salgado, Miguel Valdés

#### **Resumen**

Las relaciones de comportamiento desarrolladas por el Banco Mundial, principalmente las pertenecientes a los modelos HDM-III y HDM-4, deben adaptarse, mediante el ajuste de ciertos factores de calibración, para poder utilizarlas en la gestión de pavimentos de un país o región. Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la calibración de los modelos de agrietamiento que contempla HDM-4, y su comparación con los resultados obtenidos de los modelos equivalentes de HDM-III. Para ello utilizamos la metodología de “ventanas”, que consiste en seleccionar una serie de tramos que presenten similares características (tales como tránsito, capacidad estructural y clima) pero diferentes edades, con el fin de registrar la condición de deterioro de cada uno y de esta forma reconstruir la curva de deterioro. A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, proponemos recomendaciones para calibrar los modelos de comportamiento y establecemos factores de calibración para los modelos de agrietamiento estructural de pavimentos asfálticos más adecuados a las características propias de los caminos en Chile. Al comparar los resultados de los modelos calibrados de HDM-III y HDM-4, concluimos que ambos casos entregan valores similares y recomendamos el uso de los modelos de agrietamiento de HDM-4 por sus ventajas de operación.

**Palabras Clave:** Calibración, agrietamiento estructural, HDM-4, HDM-III, deterioro, pavimentos asfálticos.

#### **Abstract**

*The performance relationships developed by the World Bank, mainly those in the HDM-III and HDM-4 models, must be adapted by adjusting certain calibration factors in order to use them in the pavement management system of a country or region. This work presents the results obtained from calibrating the structural cracking models using HDM-4, as well as a comparison with the results obtained from equivalent HDM-III models. This work involved the use of the "windows" methodology, which consists of selecting roads that present similar characteristics (such as traffic, structural capacity and climate) but with different ages, in order to record the distress conditions of each one and in this way to reconstruct the curve of distress. Based on the results of this research, recommendations have been developed for calibrating the performance models, as well as establishing calibration factors for asphalt pavement structural cracking models which are more appropriate for Chilean roads. The results of the comparison of the HDM-III and HDM-4 calibrated models indicate that both yield similar values. Therefore, the HDM-4 cracking models are recommended, due to their operational advantages.*

**Keywords:** Calibration, structural cracking, HDM-4, HDM-III, distress, asphalt pavement.



## 1. INTRODUCCION

El Banco Mundial ha desarrollado sistemas computacionales para el apoyo a los profesionales que realizan gestión de pavimentos. Estos sistemas incorporan modelos de comportamiento que debe estar calibrados a las condiciones específicas del país o región donde serán utilizados. Los modelos de comportamiento de deterioro superficial de pavimentos asfálticos contemplados en el HDM-4 (Highway Development and Management) corresponden a los modelos de agrietamiento estructural, agrietamiento térmico, pérdida de áridos, baches y rompimiento de borde. Dentro de estos modelos, un factor importante en lo referente a impacto económico e impacto en el comportamiento del pavimento es el correspondiente al modelo de agrietamiento estructural (Mrawira y Haas, 1997; Bennett y Paterson, 2000), pues influye directamente sobre el modelo de progresión de la rugosidad del pavimento, el cual es el factor más importante en la evaluación económica de proyectos viales.

Es por ello que la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile, en conjunto con la Pontificia Universidad Católica de Chile, han estado llevando a cabo durante estos últimos quince años diversas investigaciones para determinar la primera adaptación de los modelos de HDM-III (Highway Design and Maintenance) (Paterson, 1987), y más recientemente de HDM-4 (Kerali et al., 1996), a la realidad de los pavimentos asfálticos de Chile, de modo tal de posibilitar una adecuada planificación del mantenimiento y conservación de los caminos integrantes de su red vial. De este modo, este trabajo forma parte del estudio denominado "Seguimiento para la Calibración de Pavimentos Asfálticos" (de Solminihac et al, 2001) realizado por DICTUC S.A, para la Unidad de Gestión Vial de la Dirección Nacional de Vialidad.

Para ajustar los modelos a la realidad de los caminos de un país o región específica, las relaciones de cada tipo de deterioro contemplan factores de calibración, de modo de que variando el valor de dichos factores, los modelos pueden representar lo más fielmente posible el comportamiento real que se presenta en el pavimento, con lo cual es posible hacer una gestión vial más eficiente.

El propósito de este trabajo es proponer recomendaciones para calibrar modelos de comportamiento y establecer los factores de calibración de los modelos de agrietamiento estructural de HDM-4 más adecuados para los pavimentos asfálticos en Chile, según las características propias del o los caminos a evaluar. Además, en este trabajo comparamos los resultados con aquellos obtenidos en HDM-III para los modelos de agrietamiento.

## 2. METODOLOGIA DE CALIBRACION

### 2.1 Generalidades

Para calibrar un determinado modelo de comportamiento de pavimentos es necesario contar con un conjunto de datos de deterioro que permitan reconstruir la curva de su comportamiento real, por lo que es conveniente que estos datos pertenezcan a un período más o menos prolongado de tiempo. La calibración, consiste entonces en encontrar factores ( $k_i$ ) que logren el mejor ajuste entre las predicciones del modelo y los datos medidos en terreno (Videla et al, 1995; Kannemeyer, 1996).

Dentro de las distintas metodologías de calibración utilizadas en investigaciones anteriores, (de Solminihac et al, 1989); (Gaete et al, 1991); (Videla et al, 1996), se encuentran la calibración por tramos testigo y el método de las "ventanas". La técnica que decidimos utilizar en el presente trabajo para efectuar la recolección de datos reales de agrietamiento fue la metodología "ventanas", ya que ofrece la posibilidad de contar con un espacio de inferencia más amplio y la posibilidad de integrar datos recolectados en estudios anteriores con datos nuevos. Además, esta metodología permite realizar mediciones de los deterioros de los tramos en un plazo muy breve y por lo tanto se puede evaluar una mayor cantidad de tramos y categorías. Esto es una de las ventajas del método "ventanas", ya que de haber empleado la metodología de calibración por tramo testigo, hubiese sido necesario medir datos por un largo período en los tramos seleccionados si se quiere lograr una buena confiabilidad en la predicción.

Para efectos de aplicación de esta metodología, el primer paso consistió en definir sectores de camino homogéneos en cuanto a sus variables más representativas (estructura, tránsito, geometría, clima); cada uno de estos tramos se considera entonces como una "ventana" en la curva de comportamiento de un sector, que junto con otras "ventanas" (tramos individuales similares), puedan asimilar el comportamiento de pavimento único (Videla et al, 1997).

Si los tramos de una "ventana" seleccionada tienen distintas edades, se podrían obtener las curvas de comportamiento para los diferentes tipos de deterioro, las cuales para un mismo modelo deberían presentar tendencias relativamente similares a través de los años, logrando así contar con información real que pueda ser comparada con los datos obtenidos mediante modelaciones. Lo anterior permite calibrar los diferentes modelos mediante el uso de factores de ajuste  $k_i$  (Videla et al, 1997). Para otro conjunto de tramos o "ventanas" con características diferentes, los datos deberían presentar tendencias distintas, y ello modificaría los valores de  $k_i$  obtenidos al realizar la calibración (Figura 1).



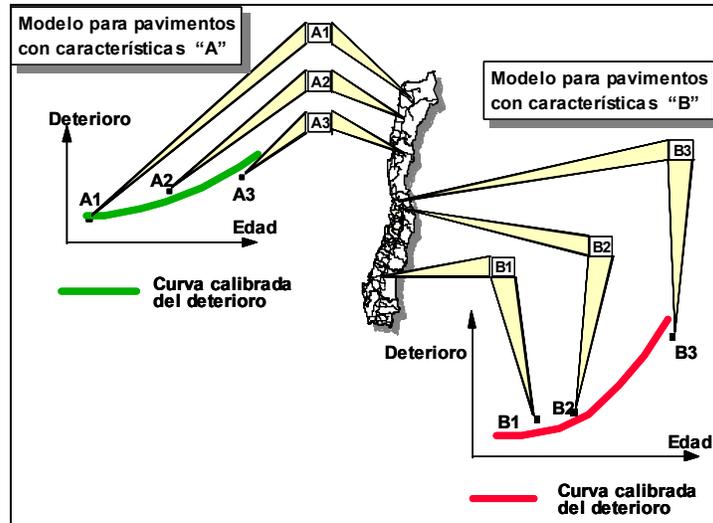


Figura 1. Metodología de las "Ventanas" (Videla et al., 1996)

A cada conjunto de tramos o "ventanas" que presentan uniformidad en sus variables representativas se les denomina "categoría". Cada categoría que se presente en la práctica al aplicar esta metodología contará con sus propios factores de calibración  $k_i$  (Videla et al, 1997).

## 2.2 Definición de las Variables y Diseño del Factorial del Experimento

Del análisis de las ecuaciones de los modelos de comportamiento del agrietamiento, principalmente las indicadas en la Figura 2 (Odoki y Kerali, 2000), podemos establecer que la evolución de los pavimentos en el tiempo depende fundamentalmente de cuatro variables globales: tránsito, edad del pavimento (desde su construcción o última rehabilitación), condiciones climáticas imperantes y capacidad estructural, las cuales definen tanto el inicio como la progresión del deterioro que en ellos se puede presentar, junto con la interacción entre las diferentes manifestaciones de daño y desgaste.



<b>Modelo de Inicio de todas las grietas para otras bases y superficie original</b>			
ICA = Kcia [CDS <sup>2</sup> a <sub>0</sub> exp (a <sub>1</sub> SNP + a <sub>2</sub> YE4/SNP <sup>2</sup> ) + CRT]			
<b>Modelo de Inicio de todas las grietas para base estabilizada y recapado o resello</b>			
ICA = Kcia [CDS <sup>2</sup> [(0.8 KA + 0.2 KW) (1 + 0.1 HSE) + (1 - KA) (1 - KW) a <sub>0</sub> exp (a <sub>1</sub> HSE + a <sub>2</sub> Ln CMOD + a <sub>3</sub> Ln DEF + a <sub>4</sub> YE4 DEF)] + CRT]			
<b>Modelo de Inicio de Grietas Estructurales Anchas</b>			
ICW = Kciw MAX [(a <sub>0</sub> + a <sub>1</sub> ICA) , a <sub>2</sub> ICA]			
<b>Modelo de Progresión de Todas las Grietas Estructurales</b>			
dACA = Kcpa (CRP/CDS) Z <sub>A</sub> [(Z <sub>A</sub> a <sub>0</sub> a <sub>1</sub> δ <sub>A</sub> <sup>a<sub>1</sub></sup> + SCA <sup>a<sub>1</sub></sup> ) <sup>1/a<sub>1</sub></sup> - SCA]			
<b>Modelo de Progresión de Grietas Estructurales Anchas</b>			
dACW = Kcpw (CRP/CDS) Z <sub>W</sub> [(Z <sub>W</sub> a <sub>0</sub> a <sub>1</sub> δ <sub>W</sub> <sup>a<sub>1</sub></sup> + SCW <sup>a<sub>1</sub></sup> ) <sup>1/a<sub>1</sub></sup> - SCW]			
Kcia:	Factor de calibración para el inicio de todas las grietas estructurales	Kciw:	Factor de calibración para el inicio de grietas estructurales anchas
Kcpa:	Factor de calibración para la progresión todas las grietas estructurales	Kcpw:	Factor de calibración para la progresión de grietas estructurales anchas
ICA:	Tiempo de inicio de todas las grietas estructurales, en años	ICW:	Tiempo de inicio de las grietas estructurales anchas, en años
dACA:	Incremento en el área de todas las grietas estructurales durante el año de análisis, en porcentaje del área de calzada	dACW:	Incremento en el área de las grietas estructurales anchas durante el año de análisis, en porcentaje del área de calzada
ACAa:	Área total de todas las grietas estructurales al comienzo del año de análisis, en porcentaje del área por pista.	ACWa:	Área total de grietas anchas al comienzo del año de análisis, en porcentaje del área de calzada
δ <sub>A</sub> :	Fracción del año de análisis en la cual todas las grietas estructurales progresaron	δ <sub>W</sub> :	Fracción del año de análisis en la cual las grietas estructurales anchas progresaron
CDS:	Indicador de defectos de construcción para superficies bituminosas.	CRT:	Retardo de agrietamiento por mantención, en años
YE4:	Número de ejes equivalentes en millones/pista para el año de análisis	SNP:	Número estructural Promedio anual ajustado del pavimento, en milímetros
HSNEW:	Espesor de la superficie mas reciente, en milímetros	PCRW:	Área con grietas anchas antes del último resellado o recapado, en porcentaje del área de calzada
Za:	1 si ACAa < 50; -1 en otro caso	Zw:	1 si ACWa < 50; -1 en otro caso
SCAa:	MIN ( ACAa, 100 - ACAa); MAX (SCAa, 0.5) si ACAa > 0.5	SCWa:	MIN ( ACWa, 100 - ACWa); MAX (SCWa, 0.5) si ACWa > 0.5
ai:	Coefficiente según tipo de pavimento, diferenciándose entre los distintos modelos de agrietamiento	CRP:	Retardo de agrietamiento debido a tratamiento preventivo, en años. Se define como CRP = 1 - 0.12 CRT

**Figura 2. Principales ecuaciones de modelos de agrietamiento de HDM-4**

Para seleccionar un conjunto de caminos que posean características similares, que garanticen cierta confiabilidad al evaluar su comportamiento, el primer paso que realizamos fue la creación de una matriz que, mediante la combinación entre los distintos niveles de sus variables (las cuatro antes mencionadas, junto con una quinta variable encargada de diferenciar las estructuras originales de las recapadas), permitiera definir las distintas categorías de caminos que conformaron el *factorial del experimento* (de Solminihac, 1987). Para cada categoría tratamos de incluir la mayor cantidad de tramos homogéneos con edades lo más diferentes posible, a fin de reconstituir curvas de comportamiento con la mayor representatividad en el tiempo.

Una vez definidas las variables independientes (o factores) del estudio, fijamos los criterios que permitieron determinar en cuántos niveles debía subdividirse cada una de ellas. De este modo, establecimos tres niveles para el tránsito (expresado en ejes equivalentes diarios) y la capacidad estructural (especificada a través de la deflexión en mm): alto, medio y bajo. Por otro lado establecimos tres zonas climáticas (Norte, Centro y Sur) que sirvieron para definir los niveles correspondientes al clima. La edad del pavimento la clasificamos en tres niveles: inicial, medio y final. Finalmente para la variable que define el tipo estructura consideramos dos aspectos: el tipo de estructura (original o recapada) y el tipo de capa de rodado (mezcla asfáltica o tratamiento superficial). La Tabla 1 presenta el factorial definido en este trabajo.

Tabla 1. Variables del factorial (Videla et al, 1996)

VARIABLES A CONSIDERAR	NIVELES	CLASES DE NIVELES
Clima	3	Norte, Centro, Sur
Tránsito	3	Bajo, Medio, Alto
Capacidad Estructural.	3	Baja, Media, Alta
Edad	3	Inicial, Media, Terminal
Tipo estructura	2	Original (Mezcla o Tratamiento Superficial), Recapada



### 2.3 Metodología para la selección de tramos testigos

Una vez definido el factorial del experimento, establecimos un procedimiento de selección de tramos por categoría que debía compatibilizar simultáneamente dos criterios:

- (a) Contar con un número suficiente de tramos por celda para disponer de una cantidad mínima de datos de deterioro a efectos de lograr una adecuada calibración de los modelos de predicción de comportamiento;
- (b) La amplitud de los rangos debe ser en lo posible lo suficientemente pequeño, para asegurar la mayor similitud y homogeneidad de las características para los distintos tipos de pavimento, y con ello asegurar una mayor confiabilidad de la calibración.

Para ello definimos un procedimiento de selección de tramos testigo que se basó en la metodología empleada para la selección de tramos en proyectos anteriores (Videla et al, 1996). Como parte de la metodología empleada para seleccionar los tramos de este estudio, se definieron los niveles para las variables tránsito y capacidad estructural (deflexión), con el criterio de distribuir los caminos de la red en forma equitativa para cada nivel (tres para cada variable). Luego se calcularon los valores medios ponderados por nivel para tránsito y deflexiones.

De un total de 141 tramos analizados en este estudio, 65 de ellos corresponden a tramos nuevos y 76 provienen de investigaciones anteriores. Sólo 97 tramos fueron utilizados para llevar a cabo la calibración de los modelos, ya que se buscó satisfacer los dos criterios enunciados anteriormente. De esta manera, el presente trabajo contó con un total de catorce categorías de tramos, siendo 5 categorías de mezclas asfálticas y 9 correspondientes a dobles tratamientos.

### 2.4 Medición y Procesamiento de la Información de Deterioro.

Considerando que dentro del estudio serían utilizados, además, datos medidos en proyectos anteriores, los cuales fueron obtenidos y aprobados mediante la aplicación de rigurosos procedimientos estadísticos que garantizaban la confiabilidad de la información, requeríamos que la variabilidad y dispersión de los datos recolectados en los tramos testigos nuevos fueran la menor posible, para garantizar que el nivel de confiabilidad de la información fuera similar a la de proyectos anteriores.

Debido a lo anterior, para recolectar la información de deterioro de los nuevos tramos, fue necesario establecer una metodología de medición, que definiera desde la cantidad de muestras que debían ser medidas, hasta la forma como se recogerían en terreno los datos de cada tramo. Con este fin realizamos diversos análisis estadísticos a la base de datos creada con la información de deterioro de caminos entregada por la Dirección Nacional de Vialidad de Chile y complementada con los antecedentes de proyectos anteriores.

El objetivo principal de la metodología de medición fue obtener un número de muestras que permitiera estimar el deterioro promedio con una confiabilidad aceptable y un rendimiento óptimo de medición en terreno. Mediante el procedimiento de medición establecido, cada sección de muestreo estaba compuesta por dos kilómetros y se auscultaron un total 616 metros por sección, lo que constituye una excelente muestra, equivalente al 31%.

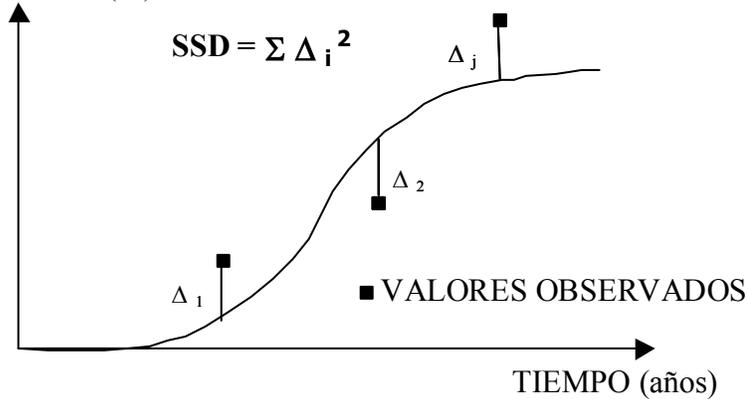
De esta forma procedimos a realizar inspección visual de los 65 tramos nuevos a lo largo de todo Chile y el Laboratorio Nacional de Vialidad realizó la medición de rugosidad (IRI) y medición de deflexión de los 65 tramos. Estas actividades demoraron siete meses.

### 2.5 Calibración Estadística de los Factores de Calibración $k_i$

El procedimiento propuesto para la calibración estadística de los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos en el presente trabajo se basa principalmente en la determinación de factores que permitan lograr un mejor ajuste de las curvas de deterioro simulado a los datos de comportamiento real, mediante la minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados (SSD, Sum of Squared Differences); (Videla et al, 1996). En la Figura 3 se observa una curva típica de comportamiento del modelo de agrietamiento y sobre ella se encuentran localizados los datos observados y la curva obtenida a partir de las predicciones del modelo, el mejor ajuste consiste en minimizar las diferencias de modo que se logre la representación más fiel y real del comportamiento en el tiempo. El minimizar el valor de SSD conlleva una reducción del error medio de estimación que permite encontrar el factor de calibración que asegura el mejor ajuste de la curva de deterioro y por ende la calibración del modelo de comportamiento analizado (Kannemeyer y Visser, 1996).



AREA AGRIETADA  
PREDICHA (%)



$$SSD = \Delta^2 = \sum (Y_{obsi} - Y_{esti})^2$$

Donde:

SSD = Suma de los cuadrados de las diferencias entre datos observados y datos predichos

$Y_{obsi}$  = Valores observados

$Y_{esti}$  = Valores estimados

Figura 3. Minimización de cuadrados de las diferencias entre valores estimados y medidos (Videla et al, 1992)

### 3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1 Análisis de los Factores de Calibración Obtenidos para las Categorías de Estudio

Basados en la metodología de calibración descrita anteriormente, se obtuvieron factores calibrados para los distintos modelos de agrietamiento estructural, aplicando la técnica de “ventanas” para cada una de las categorías del estudio. Los modelos de agrietamiento estructural que contempla HDM-4 son los modelos de todo el agrietamiento estructural y modelos de grietas estructurales anchas.

Se realizó el análisis de tendencias de los factores de calibración obtenidos en función de los valores medios de las variables del factorial (tránsito, capacidad estructural y clima), diferenciando entre mezcla asfáltica y dobles tratamientos. En la Tabla 2 se entregan los valores de los factores de calibración de los modelos de agrietamiento para cada categoría y los valores promedio globales para Chile, diferenciando entre tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.



**Tabla 2. Factores de Calibración de modelos de Agrietamiento de HDM-4 para las distintas categorías del estudio**

Tipo de Estructura	Clima Zona	Nivel de Tránsito	Nivel de Deflexión	Agrietamiento			
				Kcia	Kcpa	Kciw (*)	Kcpw
DOBLE TRATAMIENTO ASFALTICO	NORTE	BAJO	MEDIA	1.86	0.61	1.25	0.75
	SUR	BAJO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d
	CENTRO	BAJO	ALTA	0.71	0.45	1.44	0.27
	SUR	BAJO	ALTA	1.43	1.44	0.83	0.20
	CENTRO	MEDIO	ALTA	1.17	0.71	0.80	0.40
	SUR	MEDIO	ALTA	0.83	0.87	0.75	0.42
	CENTRO	BAJO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d
	CENTRO	MEDIO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d
	SUR	MEDIO	MEDIA	1.29	1.16	0.82	0.58
	<b>FACTOR DE CALIBRACION GLOBAL</b>				<b>1.22</b>	<b>0.87</b>	<b>0.98</b>
MEZCLA ASFÁLTICA ORIGINAL	NORTE	MEDIO	BAJA	<b>1.40</b>	<b>1.88</b>	<b>0.88</b>	<b>0.76</b>
MEZCLA ASFÁLTICA RECAPADO	SUR	ALTO	BAJA	1.00	0.33	0.80	0.22
	NORTE	ALTO	MEDIA	0.60	0.30	1.00	0.55
	NORTE	ALTO	BAJA	0.60	0.30	1.00	0.54
	SUR	ALTO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d
	<b>FACTOR DE CALIBRACION GLOBAL</b>				<b>0.73</b>	<b>0.31</b>	<b>0.93</b>

*kcia*: Factor de inicio de todo el agrietamiento estructural

*kcpa*: Factor de progresión de todo el agrietamiento estructural

*kciw (\*)*: Factor de inicio de grietas estructurales anchas obtenido con planillas electrónicas; debe usarse el factor por defecto igual a 1.0

*kcpw*: Factor de progresión de grietas estructurales anchas

*s/d*: Sin datos para la calibración; debe usarse el factor medio global

### 3.1.1 Modelo de Todo el Agrietamiento estructural

Para dobles tratamientos, los factores de ajuste de inicio del agrietamiento estructural ( $k_{cia}$ ) en su mayoría presentaron valores que superaron la unidad, obteniéndose un promedio de 1.22, a diferencia de los valores del factor de progresión ( $k_{cpa}$ ), el cual presentó valores mayoritariamente inferiores a la unidad, con un promedio de 0.87. Esto implica que en Chile, por lo general las grietas aparecen con posterioridad a lo que predice el modelo original HDM-4 sin calibrar; la progresión, por su parte, es más lenta de lo que predice el modelo.

En el caso de las mezclas asfálticas originales, el factor tanto de inicio como de progresión de todo el agrietamiento estructural correspondió a un valor superior a la unidad (1.4 y 1.88 respectivamente), lo que implicaría que las grietas estructurales se inician con posterioridad a lo que indica el modelo sin calibrar y su progresión es más rápida de lo que predice el modelo. Sin embargo, debido a que sólo se cuenta con una categoría que corresponde a este tipo de superficie, no se puede interpretar como representativo del comportamiento de todos los pavimentos compuestos por mezclas asfálticas de Chile.

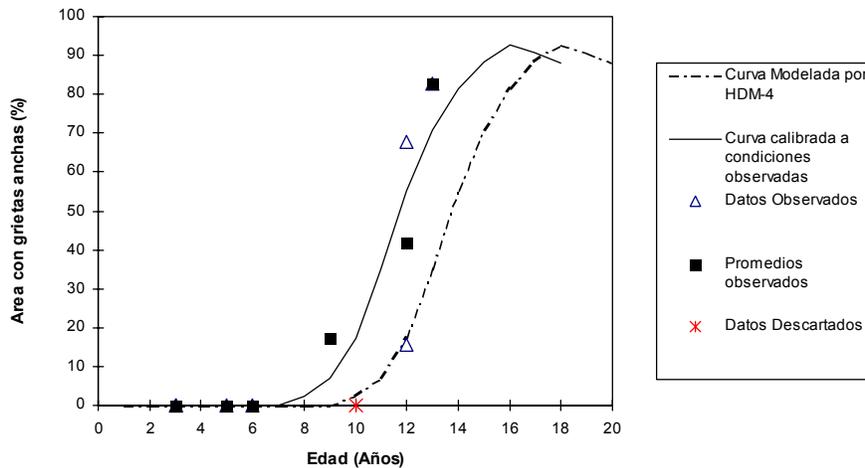
Para mezclas asfálticas correspondientes a recapados, los factores de inicio y progresión de todo el agrietamiento estructural no superaron la unidad (valores medios de  $k_{cia}=0.73$  y  $k_{cpa}=0.31$ ). Esto significa que en Chile los recapados asfálticos comienzan a agrietarse antes de lo predicho por el modelo original de HDM-4 sin calibrar; la progresión, sin embargo, es bastante más lenta que lo propuesto por el modelo original.

### 3.1.2 Modelo de Grietas Estructurales Anchas

En cuanto al modelo de inicio de grietas estructurales anchas propuesto por HDM-4, este no permite un adecuado ajuste a las observaciones, pese a contar con un factor de inicio de grietas anchas. La razón de esto es que el modelo considera que se inician las grietas anchas a partir de un 5% de área afectada con grietas angostas, lo que se traduce en unos 3 a 4 años de intervalo en la aparición entre un tipo y otro de agrietamiento. Sin embargo, en la realidad lo



observado es que las grietas estructurales anchas en Chile comienzan aproximadamente con un año de diferencia una vez iniciado el agrietamiento estructural, lo que implica que el inicio de grietas anchas se produce con un porcentaje mínimo de grietas angostas. Por esta razón no nos fue posible acomodar el inicio de grietas anchas observadas a edades anteriores a las predichas por el programa HDM-4, con lo que este modelo no estaría representando adecuadamente la realidad de los pavimentos de Chile. Debido a esto, para adaptar de mejor manera este modelo a la realidad de Chile, simulamos la fase de inicio y progresión de grietas anchas en forma separada, programando en una planilla electrónica los modelos de agrietamiento. Dichos ajustes permitieron predecir una edad de aparición de grietas estructurales anchas más cercana a la observada y calibrar la progresión a partir del año observado de aparición de este tipo de deterioro, tal como se puede apreciar en la Figura 4, la cual corresponde a una categoría típica de Chile. En esta figura se indica con línea segmentada la curva que predice el modelo HDM-4, y con línea continua se indica la curva adaptada en la presente investigación que mejor se ajusta a las condiciones observadas.



**Figura 4. Curva predicha por el modelo HDM-4 vs. Curva calibrada a condiciones reales observadas**

Los factores propuestos en la Tabla 2 corresponden a los obtenidos al programar las ecuaciones de este tipo de deterioro en planillas electrónicas, pues de esta forma el comportamiento del pavimento se acercaba más a las observaciones en terreno. Los factores  $k_{ciw}$  propuestos corresponden al ajuste de lo predicho por el modelo sin calibrar con lo realmente observado en los pavimentos asfálticos chilenos, obteniéndose valores mayoritariamente que no superan a 1, con un promedio de 0.98 para dobles tratamientos y 0.92 para mezclas asfálticas (originales y recapados), lo que implicaría que las grietas anchas se están iniciando con anterioridad a lo que indica el modelo sin calibrar. Se debe tener la precaución que los factores  $k_{ciw}$  propuestos sólo serían válidos si los modelos de HDM-4 cambiaran el inicio de las grietas anchas al variar este factor, sin embargo el programa HDM-4 en sí no varía el comportamiento de los pavimentos al introducir distintos valores del factor  $k_{ciw}$ , por lo que se recomienda utilizar el factor por defecto igual a 1. Los valores obtenidos para los factores de progresión de grietas anchas ( $k_{cpw}$ ) fueron en su totalidad menor que uno, con un valor promedio de 0.44 para dobles tratamientos y un 0.52 para mezclas asfálticas (original y recapado), significando que la progresión de este tipo de grietas en los pavimentos de Chile es bastante más lenta que lo que predice el modelo original.

En general, los factores de calibración obtenidos para los modelos de agrietamiento no presentan una correlación significativa con las variables utilizadas para el análisis (tránsito, capacidad estructural y clima), salvo el factor de progresión de grietas estructurales en dobles tratamientos cuyo valor aumenta al incrementarse la rigurosidad del clima, y el factor de progresión de grietas anchas en mezclas asfálticas cuyo valor aumenta al disminuir la capacidad estructural del pavimento. Sin embargo, debido a que el número de categorías es relativamente reducido como para afirmar que efectivamente existe influencia significativa de las variables explicativas en estos factores, es razonable asumir un valor promedio para todos los factores de ajuste de agrietamiento, de manera independiente de las variables de tránsito, capacidad estructural y clima. Lo anterior significa que las variables explicativas consideradas estarían adecuadamente incorporadas en las ecuaciones que predicen el deterioro superficial en HDM-4, corroborando la bondad del modelo.

### 3.2 Verificación de la Calidad de la Predicción

Este análisis consistió en comparar, para cada uno de los modelos de agrietamiento estructural considerados en la presente investigación, los valores observados versus los predichos, utilizando para ello los factores de calibración obtenidos. Las comparaciones se hicieron en dos niveles: utilizando el factor de calibración recomendado para cada



categoría, y utilizando el factor medio generalizado. Para ello utilizamos como patrones de comparación los siguientes indicadores estadísticos (Videla et al, 1996):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{est_i} - Y_{obs_i})^2}{\sum (Y_{obs_i} - Y_m)^2} \quad (1)$$

$$EM = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs_i} - Y_{est_i})^2}{N - 1}} \quad (2)$$

Donde:

$R^2$  : coeficiente de correlación

$Y_{est_i}$  : valores estimados

$Y_{obs_i}$  : valores observados

$Y_m$  : valor medio de las observaciones

EM : error medio de la estimación

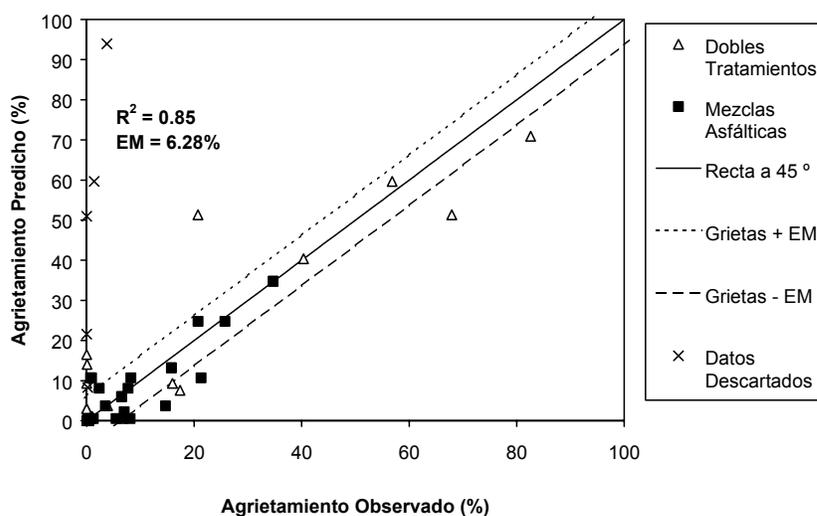
N : número de observaciones

Los resultados obtenidos utilizando los diferentes factores propios para cada categoría muestran valores significativos de correlación para los diferentes modelos ( $R^2$  sobre 0.5). Con respecto a los valores del error medio (EM) en cada tipo de deterioro, se observa que este error de la estimación resulta de una magnitud similar al error asociado a las mediciones. La Figura 5 muestra la comparación entre los valores observados y simulados para los modelos de todo el agrietamiento estructural y grietas estructurales anchas, indicando la línea de igualdad y una franja equidistante de  $\pm$  EM. En ella se ve que la mayoría de los resultados caen dentro de esta franja, con una clara tendencia a acercarse al centro, lo cual significa que la predicción es satisfactoria para la mayoría de las observaciones.

Al realizar la evaluación utilizando los factores medios generalizados, obtuvimos niveles de correlación inferiores al caso anterior, lo cual era de esperarse y por lo demás bastante lógico, ya que estos factores medios no son los que minimizan los errores en la estimación para cada categoría. Sin embargo, en general los errores medios de la estimación (EM) no aumentan considerablemente en relación con el error medio que se puede obtener usando factores diferenciados según la categoría a la que pertenezca el camino. La Figura 6 muestra la comparación entre los valores observados y predichos con los factores medios generalizados para los modelos de todo el agrietamiento estructural y grietas estructurales anchas.



a) Modelo de Todo el Agrietamiento Estructural



b) Modelo de Grietas Estructurales Anchas

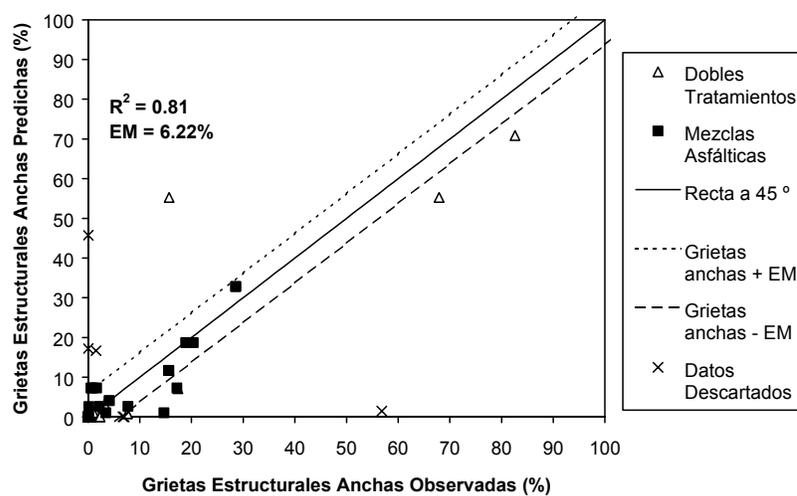
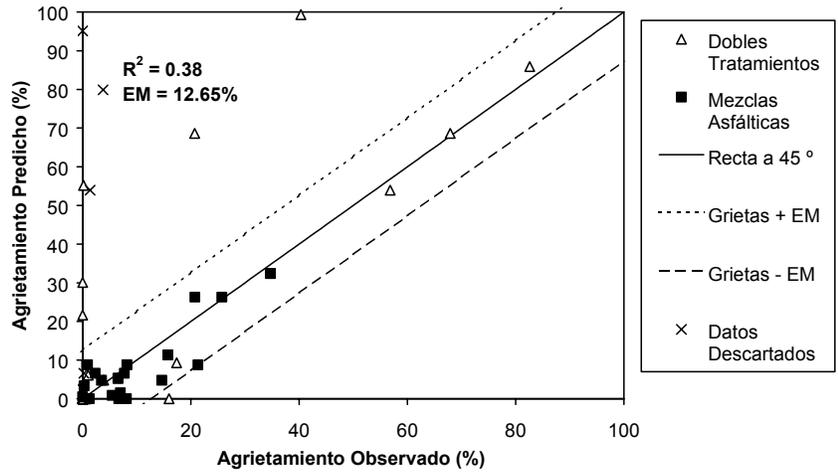


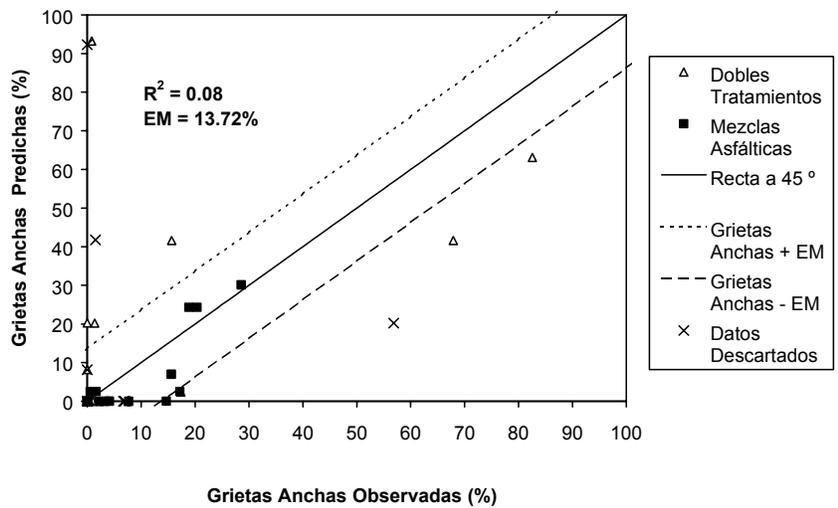
Figura 5. Verificación de Calidad de Predicción de Modelos de Agrietamiento de HDM-4 usando factores propios de cada categoría



**a) Modelo de Todo el Agrietamiento Estructural**



**b) Modelo de Grietas Estructurales Anchas**



**Figura 6. Verificación de Calidad de Predicción de Modelos de Agrietamiento de HDM-4 usando factores medios globales**

**3.3 Comparación de Factores de Calibración Obtenidos para HDM-4 y HDM-III**

La presente investigación contempló, además de la obtención de factores de ajuste de los modelos de agrietamiento estructural de HDM-4, la recalibración de los modelos de agrietamiento de HDM-III. Los resultados promedios obtenidos para el modelo HDM-III se muestran en la Tabla 3.



**Tabla 3. Factores de Calibración Medios Globales de modelos de Agrietamiento de HDM-III**

Tipo de Estructura	Agrietamiento	
	k <sub>ci</sub>	k <sub>cp</sub>
Doble Tratamiento Asfáltico	1.06	0.94
Mezcla Asfáltica (Original y Recapado)	0.61	0.56

Como puede apreciarse, existe una tendencia en los modelos de inicio y progresión de agrietamiento, ya que en el modelo HDM-4 como en HDM-III para dobles tratamientos el valor para el factor de inicio del agrietamiento es mayor que la unidad y para el factor de progresión es inferior a la unidad, lo que estaría corroborando que ambos modelos predicen que los dobles tratamientos chilenos se agrietan con posterioridad a lo que predicen los modelos sin calibrar, y su progresión es más lenta que lo que predice el modelo original. También se observa una tendencia para las mezclas asfálticas, donde el agrietamiento se está iniciando con anterioridad a lo que predicen los modelos sin calibrar ( $k_{ci}$  y  $k_{cia} < 1$ ) y la progresión es menor a la predicha por el modelo ( $k_{cp}$  y  $k_{cpa} < 1$ ). Esto se debe principalmente a que las relaciones que contemplan los modelos de HDM-4 derivan de las de HDM-III, y en general no presentan diferencias sustanciales. Sin embargo, se notó de los resultados obtenidos para el modelo de inicio de agrietamiento de HDM-III, que no existe gran diferencia entre los valores observados de  $k_{ci}$  para mezclas asfálticas originales y recapados, diferencia que en HDM-4 sí se aprecia.

En relación con la calidad de la predicción de los modelos de todo el agrietamiento de HDM-4 y HDM-III, para el caso del uso de factores de calibración de cada categoría, se puede apreciar que los niveles de correlación son bastante parecidos, así como el error medio de la estimación, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 4. Para la evaluación utilizando los factores medios generalizados, observamos un menor error en la estimación y un mayor coeficiente de correlación utilizando los modelos HDM-4, lo que implica que los factores de calibración promedios de este modelo predicen de mejor manera lo observado en la realidad de los pavimentos asfálticos chilenos.

**Tabla 4. Errores medios en la predicción utilizando diferentes factores de calibración para HDM-III y HDM-4**

Modelo	HDM-III		HDM-4		Unidades
	EMfc	EMfg	EMfc	EMfg	
Todo el Agrietamiento	6.25	13.98	6.28	12.65	%
Grietas Anchas	7.10	17.01	6.22	13.72	%

*EMfc: Error medio en la predicción del agrietamiento usando factores para cada categoría*

*EMfg: Error medio en la predicción del agrietamiento usando factores medios globales*

Sin embargo, para el caso de los modelos de grietas estructurales anchas, al comparar los niveles de correlación obtenidos con HDM-4 y HDM-III (en caso de que el modelo HDM-4 considerara el factor de inicio de este tipo de deterioro), se aprecia una menor correlación del modelo HDM-III debido a que no cuenta con factores de calibración propios, a diferencia del modelo HDM-4. Esto constituye una gran ventaja de este último modelo. Sin embargo, la correlación y el error en el modelo HDM-III es bastante aceptable para este caso, por lo que se deduce que los factores de calibración del modelo de todo el agrietamiento estructural de HDM-III están prediciendo en forma correcta también el inicio y progresión de grietas anchas. En el caso de la utilización de factores medios globales, se nota una diferencia mayor entre error medio predicho por el modelo HDM-4 con el HDM-III, siendo el modelo HDM-4 el que representa de mejor forma la realidad del agrietamiento observada en los pavimentos de Chile. Además, esta diferencia era predecible, ya que el modelo de grietas anchas de HDM-III no cuenta con factores de ajuste propios.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo demuestra que la utilización de la metodología de las “ventanas” permite tener una visión más global del deterioro de los pavimentos, pues no se limita al estudio de un pavimento en particular; además permite evaluar gran cantidad de tramos en un corto plazo, ampliando de esta forma el espacio de inferencia de la calibración. Tal es el hecho de que en el presente estudio, en un lapso de un año, se logró medir los distintos tipos de deterioros a 65 tramos a lo largo de todo Chile, y calibrar los modelos de comportamiento de HDM-III y HDM-4.

Se recomienda utilizar los factores de calibración que se indican en la Tabla 2, de modo que si se conocen las características del camino a evaluar, se usen los factores de la categoría a la que aquel camino pertenezca. En caso de que el camino a evaluar no pertenezca a alguna de las categorías analizadas, se sugiere utilizar el valor medio global obtenido para



cada uno de los factores de calibración de agrietamiento, pues igualmente provee resultados satisfactorios en la estimación del deterioro.

Debido a que los resultados de los factores de ajuste de los modelos de agrietamiento de HDM-4 son tan satisfactorios como sus equivalentes de HDM-III, recomendamos migrar en un futuro cercano a utilizar los modelos HDM-4, dadas las enormes ventajas que esta nueva versión de HDM ofrece. Sin embargo, lo anterior sólo puede ser posible si se comprueba un buen desempeño de los restantes modelos de HDM-4, razón por la cual es indispensable continuar con el estudio de los restantes modelos para tener una visión global del comportamiento de esta versión del HDM. Además de lo anterior, recomendamos estudiar con mayor profundidad las relaciones que gobiernan el inicio de las grietas estructurales anchas, pues este modelo no está representando en forma adecuada la realidad chilena, siendo imposible cambiar el inicio de grietas anchas a edades más tempranas de aparición de este deterioro.

Finalmente, recomendamos continuar con el estudio de los modelos HDM-4 para validar los resultados obtenidos en la presente investigación y expandir el espacio de inferencia de los tramos considerados para el estudio, sobre todo en tramos de mezclas asfálticas originales, de modo que permitan adaptar los modelos a una cantidad mayor de categorías de pavimentos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Unidad de Gestión Vial de la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile y a DICTUC de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por el apoyo técnico y económico otorgado a través del proyecto de investigación “Seguimiento para la Calibración de Modelos de Deterioro de Pavimentos Asfálticos”.

## 6. REFERENCIAS

- BENNETT C.R., PATERSON D.O. (2000)**, *A Guide to Calibration and Adaptation of HDM-4*, The Highway Development and Management Series, Volume five, Association Mondiale de la Route AIPCR, 2000.
- DE SOLMINIHAC H. (1987)**, *Metodología estadística para el estudio y evaluación de aspectos técnicos en la construcción*. Revista de Ingeniería de Construcción, N°2, págs. 21-33. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DE SOLMINIHAC H., VIDELA C., ECHEVERRÍA G., GAETE R., CAROCA A. (1989)**, *Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos*, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- DE SOLMINIHAC, H., HIDALGO, P., SALGADO, M. (2001)**, *Seguimiento para la calibración de modelos de deterioro de pavimentos asfálticos*. Ministerio de Obras Públicas de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- GAETE R., ECHEVERRÍA G., VIDELA C., GUTIÉRREZ P. (1991)**, *Sistema de Autocalibración de los Modelos de Deterioro del HDM-III*. VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, 17-22 Noviembre 1991, Santiago de Chile.
- KANNEMEYER L. (1996)**, *Modelling Rutting in Flexible Pavements in HDM-4*, HTC Infrastructure Management Ltd.
- KANNEMEYER L., VISSER A.T. (1996)**, *Calibration of HDM-III Performance Models for Use in Pavement Management of South African National Roads*, Transportation Research Record 1508, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- KERALI, H.; ROBINSON, R.; PATERSON, W. (1996)** *New Highway Development and Management Tools (HDM4)*. Seventy Fifth Anniversary Annual Meeting. Transportation Research Board and National Research Council. January 7-11 1996. Washington D.C.,
- MRAWIRA D., HAAS R. (1997)**, *Toward Adapting HDM-III Model to Local Conditions: Lessons from a Case Study in Tanzania*, Transportation Research Record 1624, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C..
- ODOKI J.B., KERALI H. G. R. (2000)**, *Analytical Framework and Model Descriptions, The Highway Development and Management Series*, Volume four, Association Mondiale de la Route AIPCR.
- PATERSON, W. (1987)**, *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*. World Bank, Transportation Department, Washington D.C.
- VIDELA, C., ECHEVERRÍA G., GAETE, R., CAROCA, A. (1992)**, *Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos. Vol. IV: Sistema de Gestión de Pavimentos GIMP*, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- VIDELA, C., DE SOLMINIHAC, H., GAETE, R., BUSTOS M. (1995)**, *Metodología de Calibración de Modelos de Predicción del Deterioro en Pavimentos asfálticos*. 8° Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto, Tomo II, Trabajo T5 - 13, 14 pp, 12 - 17 Noviembre 1995, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.



**VIDELA, C., DE SOLMINIHAC, H., GAETE, R., BUSTOS, M. (1996),** *Ajuste de Factores de Calibración para Ampliar Modelos de Deterioro de Pavimentos asfálticos.* Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

**VIDELA C., DE SOLMINIHAC H., GAETE, R., BUSTOS, M. (1997),** *Análisis Comparativo de la Calidad de la Predicción del Deterioro en Pavimentos Asfálticos entre Metodologías de Ventanas y Seguimiento en Tramos Testigo,* 9º Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Tomo 3, Tema 7 Gerencia de Pavimentos, pp. 1155 – 1168, 2 a 7 noviembre de 1997, Asunción, Paraguay.

***Hernán de Solminihac***

*Ingeniero Civil, Doctor,*

*Profesor Titular, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile*

Civil Engineer, Ph.D.

Professor, Department of Construction Engineering and Management,  
School of Engineering *Pontificia Universidad Católica de Chile*

[hsolmini@ing.puc.cl](mailto:hsolmini@ing.puc.cl)

***Priscila Hidalgo***

Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia

Universidad Católica de Chile, Ingeniero Investigador, DICTUC S.A.

M.Sc. Pontificia Universidad Católica de Chile,

Researcher Engineer, DICTUC S.A.

[phidalgs@puc.cl](mailto:phidalgs@puc.cl)

***Mauricio Salgado***

Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia

Universidad Católica de Chile, Jefe de Geotecnia, Vías y Transporte, Pontificia Universidad Javeriana de Colombia

MSc, Pontificia Universidad Católica de Chile, Geotechnic, Roads and Transport Chief, Pontificia Universidad Javeriana de Colombia

[mauricio.salgado@javeriana.edu.co](mailto:mauricio.salgado@javeriana.edu.co)

***Miguel Valdés***

Ingeniero Civil Universidad de Chile, Unidad de Gestión Vial, Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile

Civil Engineer Universidad de Chile, Unidad de Gestión Vial, Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile

[miguelvaldes@yahoo.com](mailto:miguelvaldes@yahoo.com)

