

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO HDM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A LAS CONDICIONES DE CHILE

HERNÁN DE SOLMINIHAC T., Profesor Titular, PhD.

Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, hsolmini@ing.puc.cl

PRISCILA HIDALGO S., Ingeniero Civil, MSc.

Dictuc S.A., phidalgs@ing.puc.cl

MAURICIO SALGADO T., Profesor Asistente, MSc.

Depto.de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, mauricio.salgado@javeriana.edu.co

MIGUEL VALDÉS F., Ingeniero Civil

Unidad de Gestión Vial, Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile
miguel.valdes.flores@moptt.gov.cl

RESUMEN

Este trabajo presenta el resumen de los resultados del análisis que permitió la determinación de los factores de ajuste de los modelos de agrietamiento, pérdida de áridos, baches, ahuellamiento y rugosidad incluidos en HDM-III y HDM-4 para el caso de Chile, y la comparación de los resultados obtenidos entre ambos sistemas calibrados.

La técnica utilizada para desarrollar la calibración fue la metodología de “ventanas”, que permite construir la curva de evolución del comportamiento de un pavimento a partir de datos de deterioro observado a distintas edades, en caminos diferentes con características similares.

Tras el análisis de resultados de cada uno de los modelos estudiados se recomienda el uso de los modelos HDM-4 por sus ventajas operacionales, una vez revisados y corregidos los modelos de grietas anchas, baches, rugosidad y ahuellamiento, en los cuales se detectaron ciertas irregularidades.

1. INTRODUCCIÓN

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. La importancia del proceso de calibración de los modelos de comportamiento es en el impacto

económico, ya que debido a la influencia directa del inicio y progresión de los deterioros del pavimento, se hace necesaria una adecuada adaptación de ellos, de modo que se pueda efectuar una evaluación económica certera de los proyectos viales que se analicen.

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 (The Highway Design and Maintenance Standards Model) [Paterson 1987], y más recientemente de HDM-4 (The Highway Development and Management) [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.

Los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos de HDM-4 y que fueron contemplados en esta investigación [de Solminihac 2001], corresponden a los modelos de agrietamiento estructural, pérdida de áridos, baches, ahuellamiento y rugosidad.

El propósito de este trabajo es proponer recomendaciones para calibrar modelos de comportamiento y establecer los factores de calibración de los modelos 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 se comparan estos resultados con los obtenidos en la nueva calibración de los modelos incluidos en HDM-III.

2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

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 realizadas por los autores [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 se decidió utilizar en el presente trabajo para efectuar la recolección de datos reales de deterioro 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 1996; Videla et al 1997].

Si los tramos de una “ventana” seleccionada tienen distintas edades, se podrían obtener 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 . 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).

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 contaría con sus propios factores de calibración k_i [Videla et al 1996; Videla et al 1997].

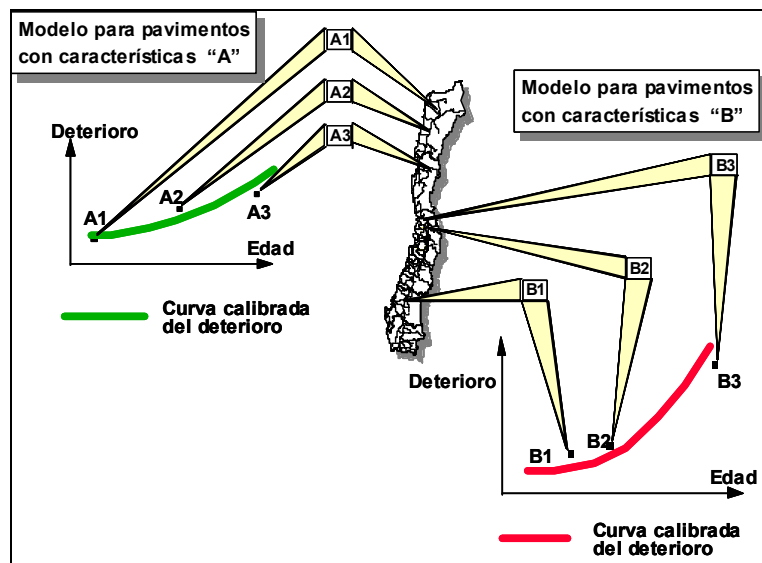


Figura 1. Metodología de las “Ventanas”

2.1 Definición de las Variables y Diseño del Factorial del Experimento

Del análisis de las ecuaciones de los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos [Odoki y Kerali 2000], se puede 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.

Para seleccionar un conjunto de caminos que posean características similares, que garanticen cierta confiabilidad al evaluar su comportamiento, el primer paso que se realizó 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 se trató 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, se fijaron los criterios que permitieron determinar en cuántos niveles debía subdividirse cada una de ellas. De este modo, se establecieron 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 se establecieron tres zonas climáticas (Norte, Centro y Sur) que sirvieron para definir los niveles correspondientes al clima. La edad del pavimento fue clasificada en tres niveles: inicial, medio y final. Finalmente para la variable que define el tipo estructura se consideraron dos aspectos: el tipo de estructura (original o recapada) y el tipo de capa de rodado (mezcla asfáltica o tratamiento superficial).

2.2 Metodología para la selección de tramos testigos

Una vez definido el factorial del experimento, se estableció 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 pequeña, 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 fue definido 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.

2.3 Medición y procesamiento de la información de deterioro

Considerando que dentro del estudio serían utilizados además datos medidos en proyectos anteriores [Videla et al 1996], los cuales fueron obtenidos y aprobados mediante la aplicación de rigurosos procedimientos estadísticos que garantizaban la confiabilidad de la información, se quiso que la variabilidad y dispersión de los datos recolectados en los tramos testigos nuevos fueran lo 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 se realizaron 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 se procedió a realizar inspección visual y medición de ahuellamiento de los 65 tramos nuevos a lo largo de todo Chile y el Laboratorio Nacional de Vialidad del MOP realizó la medición de rugosidad (IRI) y medición de deflexión de los 65 tramos. En realizar estas actividades se tardó siete meses.

2.4 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. Para ello, se siguieron dos procedimientos distintos, dependiendo si el factor a determinar correspondía a la fase de inicio o de progresión del deterioro.

El procedimiento propuesto para la calibración de los factores de inicio de deterioros superficiales, se basó en la obtención del cociente entre el año observado de aparición del deterioro y el año de aparición predicho por el modelo sin calibrar. Para el caso de los factores de progresión, la calibración se realizó mediante la minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados (SSD, Sum of Squared Differences). En la Figura 2 [Videla et al 1992] se observa una curva típica de comportamiento de un modelo de deterioro 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].

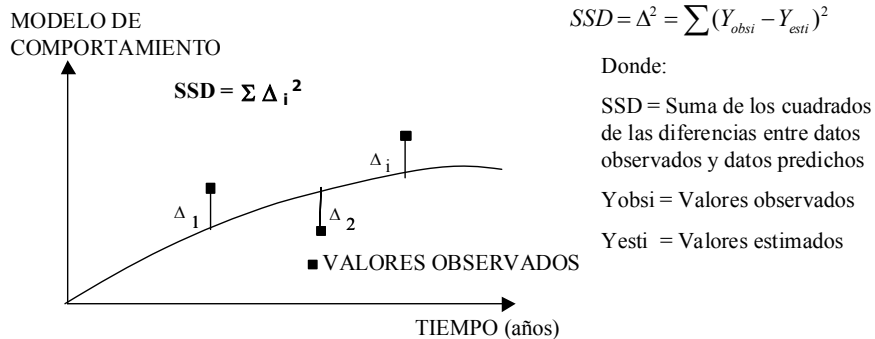


Figura 2. Minimización de cuadrados de las diferencias entre valores estimados y medidos

3. FACTORES DE CALIBRACION PROPUESTOS

Basados en la metodología de calibración descrita anteriormente, se obtuvieron factores calibrados para los distintos modelos de comportamiento de HDM-III y HDM-4 contemplados en este proyecto, aplicando la técnica de “ventanas” para cada una de las categorías del estudio. En las Tablas 1 y 2 se entregan los factores de calibración propuestos para los modelos de comportamiento, en HDM-4 y HDM-III respectivamente.

El nivel de calibración de los modelos de comportamiento está definido por el alcance del estudio, que de acuerdo a las necesidades y exigencias de los usuarios, así como el tiempo y recursos disponibles, determinará el grado de confiabilidad, sensibilidad y detalle de los datos requeridos. Para el caso particular de HDM-4, se definen tres niveles (1=aplicación básica, 2=calibración de relaciones primarias y 3=adaptación) que, según sea el caso, involucran cierto nivel de esfuerzo y recursos para alcanzarlos [Bennett y Paterson 2000]. En este estudio se consideraron que las exigencias y requisitos estaban dentro de un marco determinado por un Nivel 2, es decir un nivel de calibración de relaciones primarias.

4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

De acuerdo a los valores entregados en las Tablas 1 y 2, 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 general, los factores de calibración obtenidos no presentan una correlación significativa con las variables utilizadas para el análisis (tránsito, capacidad estructural y clima). Por lo tanto, es razonable asumir un valor promedio para todos los factores de ajuste de manera independiente de estas variables. Lo anterior significa que las variables explicativas consideradas estarían adecuadamente incorporadas en las ecuaciones que predicen el deterioro en los modelos HDM-III y HDM-4, corroborando la bondad del modelo.

Por otro lado, se realizó una verificación de calidad de la predicción, y finalmente, el cual consistió en comparar, para cada uno de los modelos considerados en la 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 indicadores de coeficiente de correlación (R^2) y error medio de estimación (EM). (Ecuaciones 1 y 2)

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

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

Donde:

R^2 : coeficiente de correlación

Y_{obs_i} : valores observados

EM : error medio de la estimación

Y_{est_i} : valores estimados

Y_m : valor medio de las observaciones

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 de estimación (EM) en cada tipo de deterioro, resulta de una magnitud similar al error asociado a las mediciones. La excepción a lo anterior se produce en el modelo de pérdida de áridos, donde se tiene una mala correlación y un alto error en la estimación.

Tabla 1. Factores de Calibración propuestos para HDM-4

Categoría	Tipo de Estructura	Clima Zona	Nivel de Tránsito	Nivel de Deflexión	Agrietamiento				P. Aridos		Baches		Ahuellamiento regla 1.2 m			Ahuellamiento regla 2 m			Rugosidad		
					Kcia	Kcpa	Kciw	Kcpw	Kvi	Kvp	Kpi	Kpp	Krid	Krst	Krpd	Krid	Krst	Krpd	Kgm	IRlo	Kgp
1A	DOBLE TRATAMIENTO ASFALTICO	NORTE	BAJO	MEDIA	1.86	0.61	1.25	0.75	1.00	0.37	0.00	s/d	0.50	0.50	n/d	0.50	1.00	n/d	0.43	2.70	1.90
2A		SUR	BAJO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d	0.67	0.67	0.00	s/d	1.00	1.00	n/d	1.10	2.00	n/d	1.74	2.00	0.10
3A		CENTRO	BAJO	ALTA	0.71	0.45	1.44	0.27	0.50	0.65	0.33	0.45	0.76	0.50	n/d	1.00	1.00	n/d	1.30	2.50	0.10
4A		SUR	BAJO	ALTA	1.43	1.44	0.83	0.20	0.50	0.58	0.38	0.16	0.76	0.50	n/d	1.00	1.00	n/d	1.74	2.00	0.10
5A		CENTRO	MEDIO	ALTA	1.17	0.71	0.80	0.40	0.50	0.36	0.29	0.70	0.50	1.00	n/d	0.74	1.00	n/d	1.30	2.00	1.65
6A		SUR	MEDIO	ALTA	0.83	0.87	0.75	0.42	0.83	0.75	0.00	0.41	0.50	1.00	n/d	1.00	1.00	n/d	1.74	2.00	0.10
9B		CENTRO	BAJO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d	0.33	1.00	s/d	s/d	0.50	0.50	n/d	0.77	0.50	n/d	1.30	2.30	0.30
11B		CENTRO	MEDIO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d	0.50	0.37	s/d	s/d	0.50	1.00	n/d	0.58	1.00	n/d	1.30	2.70	0.90
12B		SUR	MEDIO	MEDIA	1.29	1.16	0.82	0.58	0.67	0.50	0.00	0.20	0.92	0.50	n/d	1.20	1.00	n/d	1.74	2.00	0.10
FACTOR MEDIO GLOBAL DTA					1.22	0.87	0.98	0.44	0.61	0.58	0.14	0.38	0.66	0.72	n/d	0.88	1.06	n/d	1.40	2.24	0.58
10B	MEZCLA ASFÁLTICA (ORIGINAL Y RECAPADO)	NORTE	MEDIO	BAJA	1.40	1.88	0.88	0.76	n/a	n/a	s/d	s/d	0.50	0.10	0.4	0.50	1.00	0.10	0.43	1.60	0.01
7A		SUR	ALTO	BAJA	1.00	0.33	0.80	0.22	n/a	n/a	0.70	1.95	n/d	0.10	0.1	n/d	0.10	0.10	1.74	0.80	0.10
8A		NORTE	ALTO	MEDIA	0.60	0.30	1.00	0.55	n/a	n/a	s/d	s/d	n/d	1.00	0.1	n/d	1.00	0.10	0.43	1.20	4.20
13B		NORTE	ALTO	BAJA	0.60	0.30	1.00	0.54	n/a	n/a	s/d	s/d	n/d	0.10	0.1	n/d	0.10	0.10	0.43	1.80	0.10
14B		SUR	ALTO	MEDIA	s/d	s/d	s/d	s/d	n/a	n/a	s/d	s/d	n/d	0.10	0.1	n/d	0.10	0.10	1.74	0.80	0.10
FACTOR MEDIO GLOBAL MEZCLA ASFÁLTICA					0.90	0.70	0.92	0.52	n/a	n/a	0.70	1.95	0.50	0.28	0.16	0.50	0.46	0.10	0.95	1.24	0.90

s/d: sin datos para la calibración

n/a: el modelo no considera este deterioro en este tipo de pavimento

n/d: no hay dato disponible para este nivel del factorial, dado que no existe o no hay información suficiente para deducirlo

Tabla 2. Factores de Calibración Propuestos para HDM-III

Categoría	Tipo de Estructura	Clima Zona	Nivel de Tránsito	Nivel de Deflexión	Agrietamiento		P. Aridos	Baches	Ahuellam	Rugosidad	
					Kcia	Kcpa	Kvi	Kpp	Krp	IRlo	Kgp
1A	DOBLE TRATAMIENTO ASFALTICO	NORTE	BAJO	MEDIA	1.30	0.70	0.97	s/d	0.93	2.70	1.00
2A		SUR	BAJO	MEDIA	s/d	s/d	1.08	s/d	1.05	2.00	0.70
3A		CENTRO	BAJO	ALTA	0.50	0.60	0.75	0.28	1.00	2.50	1.00
4A		SUR	BAJO	ALTA	1.11	0.48	1.44	0.71	1.00	2.00	1.00
5A		CENTRO	MEDIO	ALTA	1.40	0.86	1.41	0.28	1.00	2.20	1.62
6A		SUR	MEDIO	ALTA	1.00	0.88	1.17	0.66	1.05	1.90	0.50
9B		CENTRO	BAJO	MEDIA	s/d	s/d	1.06	s/d	0.73	2.50	1.00
11B		CENTRO	MEDIO	MEDIA	s/d	s/d	1.13	s/d	1.00	2.80	2.30
12B		SUR	MEDIO	MEDIA	1.29	1.62	1.31	0.58	1.05	2.50	1.30
FACTOR MEDIO GLOBAL DTA					1.10	0.86	1.15	0.50	0.98	2.34	1.16
10B	MEZCLA ASFÁLTICA (ORIGINAL Y RECAPADO)	NORTE	MEDIO	BAJA	0.71	0.97	n/a	s/d	0.74	1.40	1.00
7A		SUR	ALTO	BAJA	0.80	0.44	n/a	0.41	0.75	1.20	4.00
8A		NORTE	ALTO	MEDIA	0.43	0.43	n/a	s/d	1.05	1.20	5.20
13B		NORTE	ALTO	BAJA	0.50	0.40	n/a	s/d	0.50	1.50	0.20
14B		SUR	ALTO	MEDIA	s/d	s/d	n/a	s/d	0.50	1.40	0.50
FACTOR MEDIO GLOBAL MEZCLA ASFÁLTICA					0.61	0.56	n/a	0.41	0.71	1.34	2.18

s/d: sin datos para la calibración

n/a: el modelo no considera este deterioro en este tipo de pavimento

Lo anterior puede deberse a problemas de uniformidad en la calidad de la construcción de dobles tratamientos asfálticos, debido a que en general no se dispone de controles de calidad apropiados en este tipo de pavimentos; esto provoca que pavimentos de características similares que pertenezcan a una misma categoría muestren comportamientos muy distintos a una misma edad, lo cual se traduce en una modelación de mala correlación y altos errores en la estimación. Otro aspecto a considerar es la definición propiamente tal del modelo, puesto que éste sólo considera aspectos de extensión del deterioro (% de área afectada respecto al área total analizada), sin diferenciar en cuanto a la intensidad del deterioro. En todo caso, esto no resulta tan fundamental, ya que el modelo para la progresión de la rugosidad, que es el más importante en la evaluación económica, no se ve influenciado directamente por este deterioro, afectando la pérdida de áridos en la medida que pueda originar baches.

Otra excepción la constituye el modelo de rugosidad para HDM-4, pues se encontró un elevado error de estimación para el caso específico de los factores de calibración de la zona sur (climas fríos), que podría explicarse debido a que las predicciones de IRI suministradas por el HDM-4 a partir del quinto o sexto año empiezan a ser muy diferentes con respecto a los datos observados o a la tendencia normal de crecimiento de la curva de progresión de la rugosidad que para un caso similar entrega HDM-III.

En este sentido se revisaron las posibles causas de esta irregularidad pero fue imposible lograr una explicación sobre porqué el programa entrega estos resultados, más aun cuando los modelos de comportamiento no presentan problema, hecho que se comprobó con las modelaciones efectuadas en las hojas de cálculo en donde el comportamiento simulado seguía una tendencia similar a la observada o a la predicha por HDM-III.

Al realizar la evaluación utilizando los factores medios generalizados, obtuvimos niveles de correlación inferiores al caso anterior, lo cual era de esperarse, ya que estos factores medios no son lo 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.

4.1 Modelo de Agrietamiento Estructural

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. Debido a esto, para adaptar de mejor manera este modelo a la realidad de Chile, se simuló 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.

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. 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.

Respecto a la comparación entre los resultados obtenidos en HDM-4 y HDM-III, existe una misma 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.

4.2 Modelo de Pérdida de Áridos

Para el modelo de pérdida de áridos, se observa que los factores de inicio de este deterioro para HDM-III y HDM-4 son diferentes en magnitud, debido a que los modelos HDM-4 consideran un factor de calibración para cada etapa del comportamiento de este deterioro (inicio y progresión), permitiendo adaptar de mejor forma este modelo a la realidad observada. Sin embargo, la tendencia de la progresión de la pérdida de áridos es similar para ambos modelos, ya que el factor de inicio de este deterioro en HDM-III es inversamente proporcional a la progresión, es decir, un valor mayor que 1 implica que la pérdida de áridos progresa de manera más lenta de lo que predice el modelo sin calibrar, lo que estaría coincidiendo con los factores de progresión obtenidos para HDM-4, los cuales no son superiores a 1.

4.3 Modelo de Baches

Los baches fueron observados en forma aleatoria y esporádica en las visitas a los tramos. Los resultados de las observaciones realizadas indican que los baches estarían comenzando a edades mucho más tempranas que las que predice el modelo HDM-4. Pese a contar con un factor de inicio, k_{pi} , el modelo no se adapta a variaciones de este factor. Esto implica que no es posible acomodar este modelo a inicios de baches observados en edades anteriores a las predichas por HDM-4. Es por ello que para adaptar de mejor manera el modelo de baches a la realidad de los caminos de Chile, se ajustó en forma separada las fases de inicio y progresión. Dichos ajustes permitieron predecir una edad de aparición de baches más cercana a la observada, y calibrar la progresión a partir del año observado de aparición de este deterioro. Un procedimiento similar se realizó para calibrar el modelo HDM-III.

Se debe tener la precaución que los factores k_{pi} propuestos sólo serían válidos si los modelos de HDM-4 cambiaran el inicio de baches al variar este factor, sin embargo el programa HDM-4 no varía el comportamiento de los pavimentos al introducir distintos valores del factor k_{pi} , por lo que se recomienda utilizar el factor por defecto igual a 1.

Respecto a la comparación entre los resultados obtenidos en HDM-III y HDM-4, los factores de progresión de baches, que en este caso son los únicos factores que se pueden comparar ya que HDM-III no posee factor de inicio de baches, son de valores similares en dobles tratamientos y están indicando un mismo comportamiento de la progresión del deterioro, lo que se traduce en predecir que la progresión de baches es más lenta de lo que indica el modelo sin calibrar. No ocurre lo mismo con el caso calibrado de mezcla asfáltica, donde sí se nota una diferencia en el factor de progresión k_{pp} , pues el factor correspondiente a HDM-III indica que los baches progresan más lentamente que lo que predice el modelo sin calibrar mientras que el factor de HDM-4 indica lo contrario. Esto puede atribuirse a la incorporación del factor de defectos de la base CDB en HDM-4, el cual no está incluido en HDM-III. Sin embargo, sólo se cuenta con una categoría donde se observó este deterioro, por lo que no se puede generalizar para todas las mezclas asfálticas del país. Hay que recordar que los factores de progresión obtenidos tanto en HDM-III como en HDM-4 provienen de calibrar la fase de progresión del deterioro en forma separada a la de inicio, mediante la utilización de planillas electrónicas.

4.4 Modelo de Ahuellamiento

Considerando que los modelos de ahuellamiento de HDM-4 fueron diseñados para ajustarse a los datos obtenidos mediante la utilización de la regla de 2 m., y teniendo en cuenta que la información disponible de ahuellamiento fue lograda a través de otro método de medición (regla de 1.2 m.), se decidió para la calibración comparar los datos de las predicciones contra los valores que representen las mediciones logradas por ambos métodos (Tabla 1).

Por otro lado, la razón por la cual no se incluyen valores para el factor k_{rsw} (factor de desgaste superficial), es debida a que el modelo de ahuellamiento para los casos evaluados no se ve afectado en cuanto a esta componente, por lo cual se recomienda adoptar el valor de 1.0 para este factor de calibración.

Respecto al método de medición empleado se puede decir que el efecto es prácticamente irrelevante para el caso de las mezclas asfálticas, por lo cual se puede pensar en tener factores de calibración únicos independientes del método de medición que se utilice para la recolección de datos de terreno. En cambio para el caso de los dobles tratamientos superficiales, tiene mucha importancia el método de medición que se utilice. Lo anterior resulta lógico si se analiza que la incidencia de usar una u otra regla está dada por el patrón de ahuellamiento que se presente, siendo muy influyente en cuando prima la densificación inicial y prácticamente irrelevante el efecto cuando se presenta flujo plástico.

En general, las curvas de comportamiento de ahuellamiento de los tratamientos superficiales obedecen una tendencia similar, que básicamente presenta un crecimiento rápido durante el primer año producto de la compactación y densificación de las capas, seguido por una

progresión lenta durante la fase estable y un ligero incremento en la tasa de crecimiento en el deterioro, producto de la aparición de grietas a edades avanzadas. Este último aspecto pasa desapercibido en HDM-III, por lo que la curva pasado el primer año mantiene en general un crecimiento estable, no así en el HDM-4 en donde este efecto controlado por la componente de deterioro estructural hace que este quiebre se presente.

4.5 Modelo de Rugosidad

Debido al grado de influencia del valor inicial de rugosidad (IRIo) dentro de los resultados obtenidos en el modelo de comportamiento de la progresión de la rugosidad, en forma previa a la calibración se llevó a cabo un proceso iterativo que permitió determinar el valor óptimo de IRIo, a partir de los datos predichos y observados en forma similar al procedimiento sugerido para la determinación de los factores de calibración óptimos.

Teniendo en cuenta los antecedentes y la experiencia, se consideró como punto de partida para la identificación del valor de rugosidad inicial, para el caso de las mezclas asfálticas (recapados o pavimentos nuevos) que los niveles de IRIo se distribuyen en un rango entre 0.8 m/km. (muy bueno) a 2.2 m/km (construcción defectuosa) con un valor medio alrededor de 1.2 m/km., y para el caso de los dobles tratamientos el valor de IRIo se consideró que el rango estaba comprendido entre 2.0 m/km (muy bueno) a 2.7 m/km (construcción defectuosa) con un valor medio alrededor de 2.3 m/km.

La calibración del modelo de progresión de la rugosidad no puede considerarse absoluta y restringida al empleo de un valor de k_{gp} único, si se considera el alto grado de dependencia que se tiene con respecto al valor de rugosidad inicial IRIo que se adopte. Por este motivo se sugirió un análisis que permitiera lograr además de un valor óptimo de k_{gp} para un determinado valor de IRIo, estimar el valor de k_{gp} más recomendable dependiendo del valor de rugosidad inicial que se tenga en la situación a modelar. Fue así como se logró establecer una función de la forma $k_{gp} = -a \cdot IRIo + b$, siendo a y b dos coeficientes propios de la categoría analizada.

Es importante mencionar que el rango dentro del cual es válido la aplicación de esta función depende del tipo de superficie, debido a que los valores dentro de los cuales oscila el valor de rugosidad inicial para el caso de mezclas asfálticas respecto de los dobles tratamiento superficiales es distinto.

5. 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.

Debido a que los resultados de los factores de ajuste de los modelos de comportamiento de HDM-4 son tan satisfactorios como sus equivalentes de HDM-III, se recomienda migrar en un futuro cercano a utilizar los modelos HDM-4, dada 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 modelos para tener una visión global del comportamiento de esta versión del HDM.

Se recomienda estudiar con mayor profundidad las relaciones que gobiernan el inicio de las grietas estructurales anchas e inicio de baches, pues este modelo no está representando en forma adecuada la realidad chilena, siendo imposible cambiar el estos deterioros a edades más tempranas de aparición.

Para el caso particular de los recapados, los resultados de calibración alcanzados en el modelo de ahuellamiento en HDM-4, aunque permitieron lograr un mejor ajuste con respecto a las predicciones del modelo sin calibrar, la forma de las curvas no representaba fielmente la tendencia normal observada en estos casos. Una probable explicación de esta irregularidad puede ser la forma como el programa combina las diferentes componentes del modelo (densificación inicial, deterioro estructural, deformación plástica, desgaste superficial) para obtener el resultado de ahuellamiento. Esta conclusión se deduce teniendo en cuenta que al modelar externamente el ahuellamiento en hojas de cálculo se observó (aunque resulte contradictorio con la teoría) que al incluir un efecto de densificación inicial en los recapados se lograban mejores ajustes de las predicciones a la realidad. Por lo tanto se recomienda revisar este modelo.

Respecto a las predicciones entregadas por los modelos calibrados de HDM-III y HDM-4 para el caso de la rugosidad, no se observaron mayores diferencias. Sin embargo es posible notar ligeros cambios en los resultados arrojados por ambos programas como consecuencia de las diferencias existentes en otros deterioros (grietas, baches, ahuellamiento) o aspectos relacionados con el software que pueden contribuir a esta diferencia. Salvo por algunas variaciones detectadas en las predicciones del comportamiento efectuadas con HDM-4 para el caso específico de tramos localizados en climas fríos, el programa debidamente ajustado entrega una aceptable representación de la realidad. A este respecto convendría revisar el software, ya que al comprobar en las hojas de cálculo los modelos no son en apariencia el problema, ya que los valores entregados por las simulaciones efectuadas en Excel presentan un adecuado ajuste con respecto a los valores observados.

Se ratificó la gran incidencia que tiene el valor de la rugosidad inicial en el resultado definitivo del proceso de calibración del modelo de rugosidad. Como alternativa se sugiere un conjunto de relaciones lineales que permitan ampliar la cobertura del proceso de calibración desarrollado, ya que se adaptaría el factor de calibración según el valor de IRIo que tenga el camino a modelar.

Se recomienda utilizar los factores de calibración propuestos, 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, pues igualmente provee resultados satisfactorios en la estimación del deterioro. Se recomienda utilizar los factores de calibración sugeridos para el modelo de progresión de la rugosidad para el caso de Chile, incluso a pesar de haber detectado para el caso particular de los climas fríos problemas en la modelación, ya que inclusive en estos casos el error en la estimación se reduce notoriamente con respecto a las predicciones entregadas por el modelo sin calibrar.

Finalmente, se recomienda 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.

6. REFERENCIAS

Bennett C.R., Paterson D.O., *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., 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, 1987.

de Solminihac H.; Videla C.; Echeverría G.; Gaete R.; Caroca A., *Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos*, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, 1989.

de Solminihac H; Hidalgo P.; Salgado M., *Seguimiento para la calibración de modelos de deterioro de pavimentos asfálticos*. Ministerio de Obras Públicas de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001.

Gaete R.; Echeverría G.; Videla C., Gutiérrez P., *Sistema de Autocalibración de los Modelos de Deterioro del HDM-III*. VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Santiago de Chile, 17-22 Noviembre 1991.

Kannemeyer L., *Modelling Rutting in Flexible Pavements in HDM-4*, HTC Infrastructure Management Ltd., 1996.

Kannemeyer L. y Visser A.T., *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., 1996.

Kerali H.; Robinson R.; Paterson W., *New Highway Development and Management Tools (HDM4)*. Seventy Fifth Anniversary Annual Meeting. Transportation Research Board and National Research Council. Washington D.C., January 7-11, 1996.

Odoki J.B. y Kerali H.G. R., Analytical Framework and Model Descriptions, The Highway Development and Management Series, Volume four, Association Mondiale de la Route AIPCR, 2000.

Paterson W., *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*. World Bank, Transportation Department, Washington D.C., 1987.

Videla C; Echeverría G; Gaete R.; Caroca A. *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, 1992.

Videla C.; de Solminihac H.; Gaete R. y Bustos M., *Metodología de Calibración de Modelos de Predicción del Deterioro en Pavimentos asfálticos*. 8º Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 12 - 17 Noviembre 1995, Tomo II, Trabajo T5 - 13, 14 pp., 1995.

Videla C.; de Solminihac H.; Gaete R. y Bustos M. *Ajuste de Factores de Calibración para Ampliar Modelos de Deterioro de Pavimentos asfálticos*. Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, 1996.

Videla C.; de Solminihac H.; Gaete, R. y Bustos, M., *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, Asunción, Paraguay, 2 a 7 noviembre, Tomo 3, Tema 7 Gerencia de Pavimentos, pp. 1155 – 1168, 1997.