

MODELOS INCREMENTALES DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO EN PAVIMENTOS DE HORMIGÓN A PARTIR DE LA DIFERENCIACIÓN DE MODELOS AGREGADOS EXISTENTES

Hernán De Solminihaç T., Marcelo Bustos S., Mariana Vidal M.

Pontificia Universidad Católica de Chile. Casilla 306 Correo 22, Santiago, Chile. Fono 6864245 - Fax 5524054. Correo electrónico: hsolmini@ing.puc.cl

RESUMEN

Para una adecuada aplicación de los sistemas de gestión de pavimentos es muy importante contar con las herramientas de simulación necesarias, entre las cuales ocupan un destacado lugar los modelos de predicción del deterioro. Dichos modelos pueden ser de tipo agregado, que calculan deterioro total acumulado y requieren conocer la historia previa para realizar la predicción, o de tipo incremental, que sólo requieren las condiciones actuales del pavimento para realizar la predicción. Por ello, estos últimos son, en general, más útiles en el caso que se cuente con poca información respecto de la historia del pavimento.

Uno de los sistemas de evaluación de pavimentos más conocido y utilizado es el modelo HDM del Banco Mundial, cuya última versión HDM4 pretende incorporar el análisis de pavimentos de hormigón, utilizando para ello modelos agregados de deterioro; para los pavimentos asfálticos, en cambio, el modelo utiliza modelos incrementales. De lo anterior surge la inquietud para llevar a cabo el presente trabajo, en el cual se proponen modelos incrementales de deterioro para pavimentos de hormigón, obtenidos a partir de la diferenciación de los modelos agregados propuestos para ser incluidos en HDM 4.

1. INTRODUCCION

En una sociedad intensamente motorizada, como la nuestra, la trascendencia que se debe otorgar a la conservación de los pavimentos es fundamental. Con este objetivo se utilizan los sistemas de gestión de pavimentos, a fin de ayudar a la definición de acciones que permitan mantenerlos en condiciones apropiadas de transitabilidad y seguridad, determinar el costo de tales acciones y fijar prioridades de acuerdo a los recursos económicos disponibles. Dentro de los sistemas de gestión de pavimentos, se hace imprescindible contar con modelos de predicción del deterioro, los cuales son una herramienta de suma importancia para realizar adecuadas evaluaciones técnicas y económicas a lo largo de la vida útil de los mismos. Los modelos de predicción del deterioro de pavimentos deben ser confiables, bien fundamentados y validados con bases de datos existentes; deben permitir predecir la evolución del estado del pavimento en el tiempo, los efectos a corto y

largo plazo de la mantención efectuada sobre los caminos, y la serviciabilidad resultante luego de la conservación.

El Banco Mundial ha propulsado la conformación de un sistema de evaluación de pavimentos, el Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM), que ha sido ampliamente utilizado por consultores y agencias administradoras de pavimentos (Watanatada et al., 1987). La versión HDM-III contiene relaciones para predecir el comportamiento de los pavimentos en el tiempo ante las cargas de tránsito, y para cuantificar los efectos de las actividades de mantención; también contiene relaciones para predecir el efecto que tiene la condición del camino en los costos de operación vehicular (Chesher y Harrison, 1987). Este modelo es ampliamente usado para evaluaciones de pavimentos asfálticos en países en desarrollo, y utiliza ecuaciones de predicción del deterioro del tipo incremental (Paterson, 1987). Para contar con una herramienta más actualizada y que permita ampliar los alcances de las evaluaciones, se está desarrollando una nueva versión de este modelo, denominada HDM4, que incluye tanto pavimentos asfálticos como de hormigón (Kerali et al., 1996). Dentro de HDM4, para pavimentos de hormigón las ecuaciones propuestas son de tipo agregado, es decir predicen el deterioro acumulado a partir del inicio de la vida útil del pavimento (Wade et al, 1995) (FICEM, 1996).

Dado que los modelos incrementales presentan algunas ventajas en relación a los modelos agregados, como se especificará más adelante, y a que la modelación de tipo incremental no ha sido muy utilizada, salvo contadas excepciones (Lee y Darter, 1993), para predecir la evolución del comportamiento en pavimentos de hormigón, se pretende formular modelos de tipo incremental para la predicción de diferentes tipos de deterioro en pavimentos de hormigón, a partir del estudio de modelos disponibles, y validarlos empíricamente con información provista por bases de datos, tal que permitan complementar el desarrollo actual de HDM 4. Los resultados obtenidos hasta la fecha en busca de dicho objetivo se presentan en este trabajo.

2. MODELOS DE DETERIORO AGREGADOS E INCREMENTALES

La mayoría de los modelos que actualmente existen para la predicción del deterioro en pavimentos de hormigón son del tipo *agregado*; para predecir un deterioro futuro requieren conocer en gran medida la historia previa del pavimento. En muchos casos esto no es posible, y por una u otra razón sólo se dispone de datos parciales. De lo anterior surge la necesidad de contar con modelos de tipo *incremental*, es decir, modelos que no requieran conocer la historia previa para realizar las predicciones, sino que permitan predecir, en base a un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, el deterioro futuro en un cierto tiempo, necesitando conocer sólo el estado o condición actual del pavimento, las características estructurales y climáticas existentes, y el tránsito que circulará anualmente por dicho pavimento. Por lo mismo es que los modelos incrementales presentan algunas ventajas en relación a los modelos agregados, que se listan a continuación:

- a) Los modelos agregados para realizar alguna predicción requieren conocer la historia previa del pavimento, el tránsito (inicial y acumulado) y la serviciabilidad inicial luego de su construcción, además de la condición del pavimento al momento de hacer la evaluación. Los

modelos incrementales, en cambio, no necesitan estimar del tránsito total que circuló sobre el pavimento ni tampoco la serviciabilidad inicial del pavimento, dado que estos predicen a partir de la condición actual y futura de dichas variables, eliminando los errores asociados a estimación de condiciones pasadas. Además, los modelos agregados requieren calibración para adaptarse a la condición existente en cada pavimento que sea analizado, lo que tampoco es requerido por los modelos incrementales (Fig. 1)

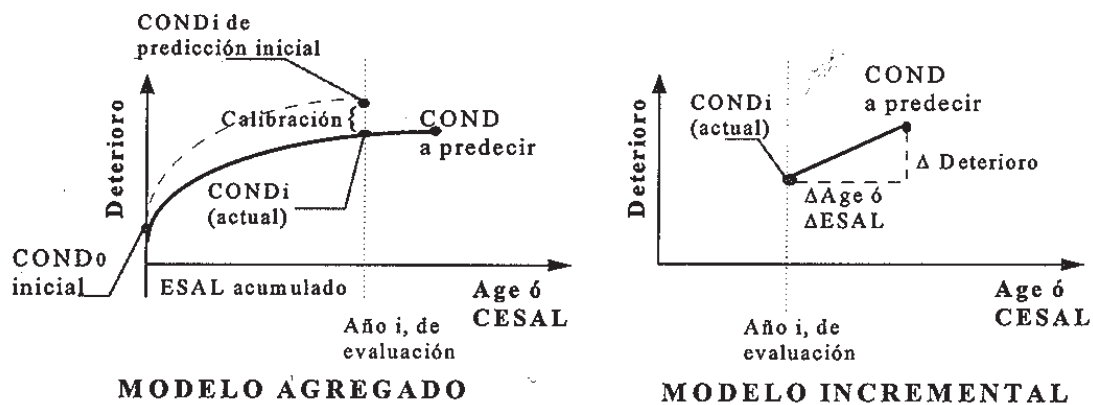


Figura 1 : Diferencias entre Modelos Agregados e Incrementales

- b) La adaptación o calibración de ciertos modelos a condiciones locales puede ser más precisa si el modelo se divide en dos fases (inicio y progresión), ya que puede calibrarse por separado el tiempo de inicio y la progresión en sí del deterioro, tal como ocurre en algunos de los modelos HDM-III para pavimentos asfálticos (agrietamiento y pérdida de áridos).
- c) Por último, la modelación incremental se puede adaptar mucho mejor que los modelos agregados para predecir el deterioro luego de aplicar acciones de conservación.

En suma, puede decirse que las principales ventajas de los modelos incrementales se presentan en la evaluación de pavimentos en servicio y pavimentos a los que se les aplica algún tipo de mantención, en tanto que para la evaluación de pavimentos recién construidos o proyectados, ambos tipos de modelos se equiparan, dependiendo de la solidez conceptual y estadística de cada uno la conveniencia de usar uno u otro.

3. METODOLOGIA DE DESARROLLO DE MODELOS DE DETERIORO INCREMENTALES PARA PAVIMENTOS DE HORMIGON

En la formulación de modelos incrementales se tomará como base la metodología utilizada por W. Paterson para el desarrollo de algunos modelos incrementales de deterioro de pavimentos de asfalto, específicamente el modelo de ahuellamiento incorporado en HDM-III (Paterson, 1987). En dicho proyecto se utilizaron dos modalidades para lograr modelos incrementales de deterioro:

1. La obtención de modelos incrementales por medio de la diferenciación respecto del tiempo de los modelos agregados de primera o segunda fase existentes, empleando derivación parcial cuando fuera necesario. Entendiendo por *primera fase* a aquella etapa del deterioro que se produce entre la puesta en marcha de una vía luego de su construcción y la realización de una reparación de importancia (que genere un mejoramiento en el nivel de servicio de la vía), y considerando como *segunda fase* de deterioro a aquella etapa que va desde la realización de dicha mantención de importancia en adelante.
2. La formulación de modelos incrementales empíricos, mediante la realización de un análisis estadístico de la correlación de diversas variables explicativas con las diferencias de deterioro en un período determinado. A efectos del análisis estadístico requerido para el desarrollo de las ecuaciones de predicción, es necesario primeramente definir con qué base de datos se trabajará, cuáles son los deterioros a modelar, qué características tienen los datos, qué variables se supone que influyen sobre tales o cuales tipos de deterioro, y qué forma funcional se adoptará para las ecuaciones de deterioro. Además, para la modelación de incrementos de deterioro es fundamental contar con información de series de tiempo que reflejen distintos momentos de la evolución del deterioro para un mismo pavimento.

En esta primera etapa de la investigación se ha utilizado sólo la metodología de la diferenciación de modelos agregados existentes de primera fase, aplicada a los pavimentos de hormigón simple (JPCP) con y sin barras de traspaso de cargas y pavimentos de hormigón reforzado con juntas (JRCP).

Los modelos agregados a utilizar en la diferenciación son los propuestos para ser incorporados en HDM4 (FICEM, 1996), extractados del estudio RIPPER 1995 (Wade et al, 1995) y que corresponden a los siguientes deterioros: Escalonamiento de Juntas, Agrietamiento Transversal (sólo para pavimentos JPCP), Deterioro de Juntas Transversales, Deterioro de grietas (sólo para JRCP) y Serviciabilidad, medida con el índice p o como irregularidad superficial (mediante el IRI).

La expresión incremental se obtendrá, casi en su totalidad, por simple derivación respecto del tiempo de las variables dependientes AGE (edad del pavimento) y CESAL (ejes equivalentes de 18-kip acumulados, en millones) de la ecuación agregada. Considerando que:

$$\text{CESAL} = \text{CESAL}_{\text{AÑO } 0} * [(1 + \text{tasa})^{\text{AGE}} - 1] / \text{tasa} \quad (1)$$

con:

$\text{CESAL}_{\text{AÑO } 0}$: ejes equivalentes de 18-kip al inicio del estudio, en millones

tasa : tasa de crecimiento del tránsito, en porcentaje

AGE : edad del pavimento, en años.

En ciertos casos conviene aplicar la propuesta de cambio de variable realizada por W. Paterson, asumiendo que el cálculo de los ejes equivalentes acumulados es una función simplificada de la edad y los ejes equivalentes anuales:

$$\text{CESAL} = \text{YESAL} * \text{AGE} \quad (2)$$

con:

YESAL : ejes equivalentes anuales, para el año de análisis correspondiente, en millones.

Para calcular el deterioro del primer año se utilizará la expresión agregada original, y posteriormente se obtendrán los sucesivos incrementos anuales de deterioro. Tal que el deterioro al final de cada año de análisis se calcula como:

$$\text{DETERIORO}_{\text{AÑO}_n} = \text{DETERIORO}_{\text{AÑO}_{n-1}} + \text{Incremento anual del DETERIORO} \quad (3)$$

4. OBTENCIÓN DE MODELOS INCREMENTALES POR DIFERENCIACIÓN A PARTIR DE MODELOS EXISTENTES

4.1. Modelos de deterioro de primera fase para pavimentos de hormigón simple con juntas (JPCP)

Gran parte de los modelos de primera fase para pavimentos JPCP han sido desarrollados de manera empírica, es decir, tienen su origen en datos de deterioros registrados en terreno y en otras condiciones anexas a ellos, tales como las condiciones climáticas o las características de los materiales, etc. Con esos datos se realiza un análisis estadístico que origina los modelos, a dichos modelos se les puede aplicar un procedimiento de diferenciación como el antes explicado. Entre los modelos de pavimentos JPCP sólo el de agrietamiento tiene un origen distinto, es mecanicista y para la formulación de este como incremental se realiza un desarrollo diferente, que aparece explicado más adelante. La definición de todas las variables de los modelos incrementales se encuentra en la Tabla 1.

a. **Escalonamiento de Juntas en JPCP con barras de traspaso de cargas:** este modelo se utiliza también para predecir el escalonamiento en pavimentos de hormigón reforzado con juntas (JRCP), en los cuales se asume que siempre existen barras de traspaso de cargas. La expresión original (agregada) que permite calcular el escalonamiento en el primer año ($n = 1$) es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{FaultD} = & \text{CESAL}^{0.25} [0.0628 (1 - \text{Cd}) + 0.3673 \times 10^{-8} \text{Bstress}^2 + 0.4116 \times 10^{-5} \text{Avjspace}^2 + \\ & + 0.7466 \times 10^{-9} \text{FI2 Precip}^{0.5} - 0.009503 \text{Base} - 0.01917 \text{Widenlane} + \\ & + 0.0009219 \text{Age}] \end{aligned} \quad (4)$$

Para lograr la expresión derivada se reunirá a aquellas variables que no cambian con el tiempo en dos constantes (K_1 , K_2) y se expresará así, simplificada, el modelo agregado (ec. 7).

$$\begin{aligned} K_1 = & 0.0628 (1 - \text{Cd}) + 0.3673 \times 10^{-8} \text{Bstress}^2 + 0.4116 \times 10^{-5} \text{Avjspace}^2 + \\ & 0.7466 \times 10^{-9} \text{FI2 Precip}^{0.5} - 0.009503 \text{Basetype} - 0.01917 \text{Widenlane} \end{aligned} \quad (5)$$

$$K_2 = 0.0009217 \quad (6)$$

$$\text{FaultD} = \text{CESAL}^{0.25} (\text{K1} + \text{K2 AGE}) \quad (7)$$

Luego de realizar la diferenciación del modelo, utilizando la aproximación sugerida por W. Paterson para el tránsito acumulado (Paterson, 1987) se encuentra la expresión del incremento anual del escalonamiento en la siguiente expresión (ec. 8).

$$\Delta \text{FaultD} = (\text{YESL} * \text{AG})^{0.25} [0.25 \text{ AGE}^{-1} \text{K1} + 1.25 \text{K2}] \quad (8)$$

De modo que el escalonamiento al final del año bajo análisis, que a la vez coincide con el del inicio del año siguiente es el de la ecuación 9.

$$\text{FaultD}_n = \text{FaultD}_{n-1} + \Delta \text{FaultD} \quad \text{si } n > 1 \quad (9)$$

- b. **Escalonamiento de Juntas en JPCP sin barras de traspaso de cargas:** en este caso, la expresión es más sencilla que en el anterior, ya que no aparece un término adicional con la edad como variable dentro del paréntesis. El modelo incremental resultante es el de la ec. 10.

$$\text{FauNDn} \left\{ \begin{array}{l} = \text{CESAL}^{0.25} (0.2347 - 0.1516 \text{Cd} - 0.00025 \text{Thick}^2 / \text{Avjspace}^{0.25} + \\ - 0.0115 \text{Base} + 0.7784 \times 10^{-7} \text{FI}^{1.5} \text{Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{Days90}^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{Widenlane}) \quad \text{si } n = 1 \\ \\ = \text{FauND}_{n-1} + (\text{YESAL} * \text{AGE})^{0.25} [0.25 \text{AGE}^{-1} (0.2347 - 0.1516 \text{Cd} + \\ - 0.00025 \text{Thick}^2 / \text{Avjspace}^{0.25} - 0.0115 \text{Base} + 0.7784 \times 10^{-7} \text{FI}^{1.5} \text{Precip}^{0.25} - \\ 0.002478 \text{Days90}^{0.5} - 0.0415 \text{Widenlane})] \quad \text{si } n > 1 \end{array} \right. \quad (10)$$

- c. **Deterioro de juntas transversales en JPCP:** este modelo no depende del tránsito, ya que se asume que el deterioro viene dado por el daño del sello de juntas y por la intromisión de material incompresible que dificulta la libre expansión y compresión de la losa. El modelo incremental en este caso es:

$$\text{Spall}_n \left\{ \begin{array}{l} = 10^{-6} \text{AGE}^2 \text{Avjspace} [549.9 - 895.7 (\text{Liqseal} + \text{Prefseal}) + 1.11 \times 10^3 \text{Days90}^3 + \\ + 375 \text{Dowelcor} + \text{FI} (29.01 - 27.6 \text{Liqseal} - 28.59 \text{Prefseal} - 27.09 \text{Silseal})] \quad \text{si } n = 1 \\ \\ = \text{Spall}_{n-1} + 2 \times 10^{-6} \text{AGE} \text{Avjspace} [549.9 - 895.7 (\text{Liqseal} + \text{Prefseal}) + \\ + 1.11 \times 10^3 \text{Days90}^3 + 375 \text{Dowelcor} + \text{FI} (29.01 - 27.6 \text{Liqseal} + \\ - 28.59 \text{Prefseal} - 27.09 \text{Silseal})] \quad \text{si } n > 1 \end{array} \right. \quad (11)$$

d. Modelo de Agrietamiento Transversal: en el modelo de agrietamiento transversal Ripper (1995), el cálculo de las grietas es función del consumo de fatiga acumulado en las losas (Fatigue Damage, FD), y para calcular este consumo de fatiga es necesario previamente aplicar conceptos de tipo mecanicista para determinar las tensiones críticas en función de las cargas de tránsito y el alabeo térmico debido a las diferencias de temperatura entre las caras superior e inferior de la losa. Para transformar este modelo en uno incremental se sugiere calcular los incrementos anuales en el consumo de fatiga y derivar la ecuación que correlaciona las grietas con el consumo de fatiga acumulado, aplicando el siguiente procedimiento en etapas.

- Cálculo de tensiones críticas y número de repeticiones admisibles: las tensiones críticas compuestas se obtienen combinando tensiones por carga y por alabeo considerando la posición más desfavorable el borde externo de la losa, centrado entre dos juntas transversales. En función de la tensión compuesta crítica y la resistencia a la flexotracción del hormigón (MR), se puede calcular el número de repeticiones admisibles en el borde (N), como asimismo la cantidad de repeticiones que admisibles sobre la posición típica de las ruedas de los vehículos, es decir sobre la huella (pasadas de cobertura, p/c). Esto se hace para un determinado diferencial de temperatura existente entre las caras superior e inferior de la losa, y se debe calcular de igual forma que lo establecido para RIPPER '95.
- Cálculo del consumo de fatiga anual: el valor de FD se obtiene aplicando la ley de Miner. En este caso, como se supone una cierta distribución de frecuencias de las diferencias de temperatura, corresponde aplicar la siguiente ecuación para toda la distribución:

$$\Delta FD_j = \sum_i k_i \text{YESAL}_j / (p/c_i N_i) \quad (12)$$

donde:

- ΔFD_j : consumo de fatiga correspondiente al año j
- k_i : frecuencia de la diferencia de temperaturas i considerada (en fracción de 1)
- YESAL_j : ejes equivalentes que pasan sobre el pavimento en el año j
- p/c_i : pasadas de cobertura asociadas a la diferencia de temperatura i
- N_i : número de repeticiones de carga admisibles asociadas a la dif. de temperatura i

- Determinación del agrietamiento para el primer año: si se está evaluando un pavimento recién construido o un futuro pavimento, se calcula el porcentaje de losas agrietadas durante el primer año de vida a partir del consumo de fatiga obtenido mediante la ecuación 12. Para ello se aplica la ecuación de regresión establecida por el modelo RIPPER 1995:

$$\% \text{ losas agriet.} = 100 / (1 + 1.41 \text{FD}^{-1.66}) \quad (13)$$

En el caso de evaluar un pavimento antiguo, con agrietamiento evidente, pero en su primera fase (es decir, antes de aplicar rehabilitación que involucre reemplazo y reposición de losas, o la aplicación de un refuerzo), correspondería calcular el consumo de fatiga acumulado correspondiente al nivel de agrietamiento observado, despejando el valor de FD de la misma ecuación 13.

$$FD = [0.70922 \{(100 / \%lagr_{obs}) - 1\}]^{-0.60241} \quad (14)$$

- **Determinación del agrietamiento para el año j:** se calcula el incremento de grietas considerando el consumo de fatiga acumulado al año anterior (se toma $FD = FD_{j-1}$) y el consumo de fatiga del año j (calculado por ecuación 12), utilizando:

$$\Delta \%lagr_j = 0.023406 FD^{-2.66} (0.01 + 0.0141 FD^{-1.66})^{-2} DFD_j \quad (15)$$

$$\text{El agrietamiento total se calcula como: } \%lagr_j = \%lagr_{j-1} + \Delta \%lagr_j \quad (16)$$

$$\text{y luego se debe acumular el consumo de fatiga para el año j: } FD_j = FD_{j-1} + \Delta FD_j \quad (17)$$

- e. **Modelo de IRI para JPCP:** este modelo está en función de la evolución de los deterioros superficiales (grietas transversales y longitudinales, desconche y escalonamiento de juntas transversales), en él por defecto el valor de IRI_0 es 99.59 in/mi (salvo que se especifique un valor diferente) y el resultado del modelo incremental es el de ecuación 18:

$$IRI_n \begin{cases} = 99.59 + 2.6098 \text{FaultT} + 1.8407 \text{Spall} + 2.2802 \times 10^{-6} \text{Tcrack}^3 & \text{si } n = 1 \\ = IRI_{n-1} + 2.6098 \Delta \text{FaultT} + 1.8407 \Delta \text{Spall} + \\ + 6.8406 \times 10^{-6} \text{Tcrack}^2 \Delta \text{Tcrack} & \text{si } n > 1 \end{cases} \quad (18)$$

4.2. Modelos de deterioro de primera fase para pavimentos de hormigón reforzado con juntas (jrmp)

Estos modelos han sido todos desarrollados con base empírica, a partir del análisis estadístico de los datos de deterioro de pavimentos y sus principales variables explicativas, por lo que se puede aplicar el procedimiento de derivación, descrito con anterioridad, directamente.

- a. **Escalonamiento de Juntas en JRCP:** este modelo es el mismo que se utiliza para predecir el escalonamiento en pavimentos de hormigón JPCP con barras de traspaso de carga (ec. 4 a 9).
- b. **Deterioro de juntas transversales en JRCP:** en el modelo se ve que el deterioro depende de la edad del pavimento, de condiciones climáticas, características de los sellos de juntas, de las barras de traspaso y del tipo de base; no así del tránsito. La expresión incremental del modelo es:

$$\text{SpallJR}_n = \begin{cases} = 10^{-5} \text{ AGE}^3 \text{ Jtspace} [1.94 \text{ Dowelcor} + 8.819 \text{ Base} (1 - \text{Prefseal}) + \\ + 0.00701 \text{ FI}] & \text{si } n = 1 \\ = \text{SpallJR}_{n-1} + 3 \text{ AGE}^2 \times 10^{-5} \text{ Jtspace} [1.94 \text{ Dowelcor} + \\ + 8.819 \text{ Base} (1 - \text{Prefseal}) + 0.00701 \text{ FI}] & \text{si } n > 1 \end{cases} \quad (19)$$

c. **Deterioro de grietas para JRCP:** a diferencia del modelo de agrietamiento para pavimentos JPCP que tiene un desarrollo mecanicista, el modelo de deterioro de grietas de pavimentos JRCP tiene su origen en un desarrollo empírico, similar al de los modelos anteriores. El modelo incremental de deterioro de grietas en pavimentos JRCP se obtiene mediante la diferenciación en función del tiempo de las variables, sin hacer el cambio de variables propuesto por W. Paterson y es el que sigue:

$$\text{CrackJR}_n = \begin{cases} = \text{AGE}^{2.5} [6.88 \times 10^{-5} \text{ FI/Thick} + (0.116 - 0.073 \text{ Base}) \text{ CESAL} (1 - e^{-0.032 \text{ M}}) * \\ * e^{(7.55188 - \text{Epcc} - 66.5 \text{ Persteel} + 5 \text{ Persteel} * \text{Epcc})}] & \text{si } n = 1 \\ = \text{CrackJR}_{n-1} + 2.5 \text{ AGE}^{1.5} [6.88 \times 10^{-5} \text{ FI/Thick} + (0.116 - 0.073 \text{ Base}) * \\ * (1 - e^{-0.032 \text{ M}}) e^{(7.55188 - \text{Epcc} - 66.5 \text{ Persteel} + 5 \text{ Persteel} * \text{Epcc})} \text{ CESAL}_{\text{AÑO0}} * \\ * \{(1+t)^{\text{AGE}} - 1\} / t + \text{AGE}^{2.5} (0.116 - 0.073 \text{ Base} (1 - e^{-0.032 \text{ M}}) * \\ * e^{(7.55188 - \text{Epcc} - 66.5 \text{ Persteel} + 5 \text{ Persteel} * \text{Epcc})} \text{ CESAL}_{\text{AÑO0}} \{\ln(1+t)\} / t * (1+t)^{\text{AGE}} \\ \text{si } n > 1 \end{cases} \quad (20)$$

d. **Modelo de Serviciabilidad (PSR) para JRCP:** el modelo predice la pérdida de serviciabilidad en función de la evolución de los deterioros superficiales (escalonamiento de juntas transversales, grietas transversales y desconche), tomando como valor inicial de PSR en el año de construcción a $\text{PSR}_0 = 4.165$ (salvo que se especifique un valor diferente). La expresión del modelo incremental es la que se ve en ec. 20.

$$\text{PSR}_n = \begin{cases} = 4.165 - 0.06694 \text{ Fault}^{0.5} - 0.00003228 \text{ Tcrack}^2 - 0.1447 \text{ Spall}^{0.25}] & \text{si } n = 1 \\ = \text{PSR}_{n-1} - 0.03347 \text{ Fault}^{0.5} \Delta \text{Fault} - 0.00006456 \text{ Tcrack} \Delta \text{Tcrack} + \\ - 0.036175 \text{ Spall}^{0.75} \Delta \text{Spall} & \text{si } n > 1 \end{cases} \quad (21)$$

El incremento del PSR es en función de los incrementos de deterioros, el problema que se presenta en este caso, al igual que en los pavimentos JPCP, es que no se dispone de modelos para predecir el agrietamiento transversal, por lo cual este dato debería ser supuesto por el usuario o medido en terreno.

5. COMPARACION DE RESULTADOS DE MODELOS INCREMENTALES CON RESPECTO A LOS DE MODELOS AGREGADOS ORIGINALES

Por lo general, aplicando la metodología de derivación antes especificada a los modelos empíricos se logran modelos incrementales cuyo ajuste respecto a los modelos agregados es bastante bueno.

En el caso de los modelos de *escalonamiento*, los deterioros que predice el modelo incremental son levemente menores a los calculados por el modelo agregado, tanto en pavimentos JPCP como en JRCP. Las diferencias entre los pronósticos de uno y otro modelo son crecientes a medida que pasa el tiempo y pueden llegar a valores cercanos a los 0.03 in/mi en una evaluación que considere la vida útil de un pavimento de 20 años.

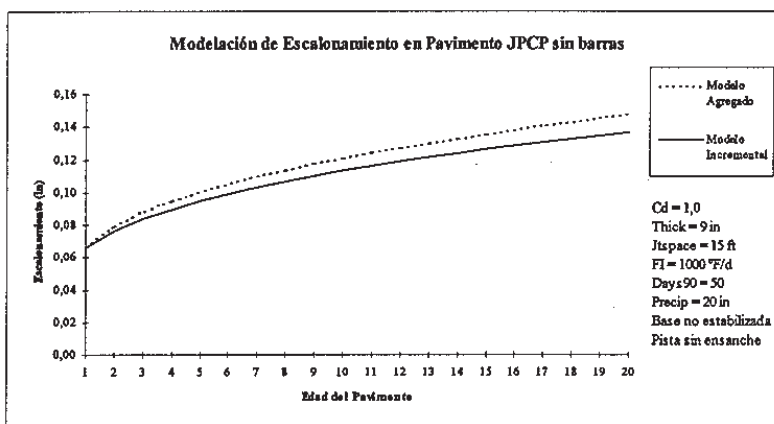


Figura 2 : Gráfico de modelación de escalonamiento en pavimentos JPCP sin barras de traspaso de cargas.

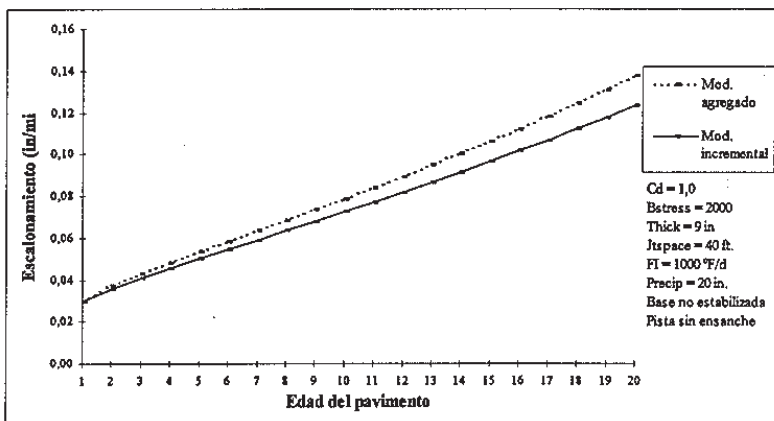


Figura 3 : Gráfico de modelación de escalonamiento en pavimentos JPCP con barras de traspaso de carga y pavimentos JRCP.

Por otra parte con el modelo de *deterioro de juntas* ocurre que la predicción del modelo incremental es levemente mayor que la del modelo agregado original en los pavimentos JPCP y JRCP. Pero en este caso las diferencias entre las proyecciones de deterioro de uno y otro modelo son decrecientes en el tiempo, y no sobrepasan el 2% de diferencia en una evaluación para 20 años de la vida de un pavimento.

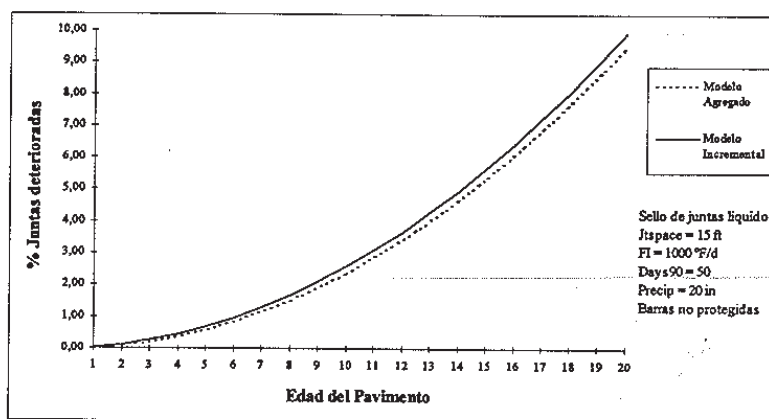


Figura 4 : Gráfico de modelación de deterioro de juntas en pavimentos JPCP.

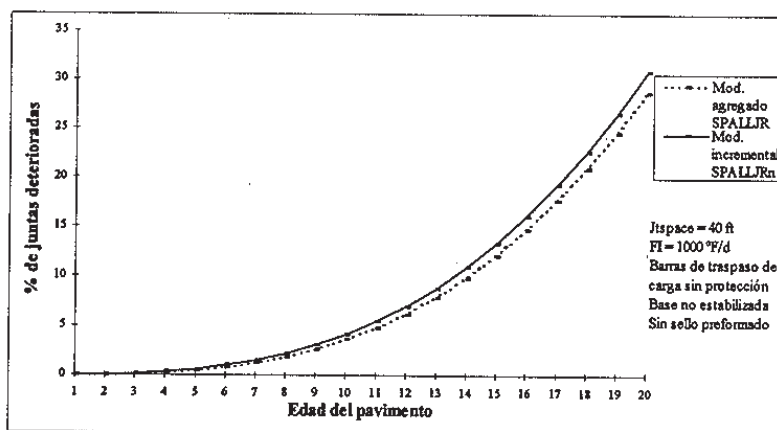


Figura 5 : Gráfico de modelación de deterioro de juntas en pavimentos JRCP.

En relación al modelo incremental de *agrietamiento* en JPCP, que responde a la concepción mecanicista del modelo original, su ajuste en relación a las predicciones formuladas por el modelo original es muy bueno. Las predicciones de los modelos agregado e incremental se cruzan durante la evaluación de un pavimento de 20 años, a medida que avanza el tiempo el deterioro del modelo incremental es mayor que el del agregado, pero las diferencias entre ellos no son significativas (no sobrepasan el 2%) (Fig. 6).

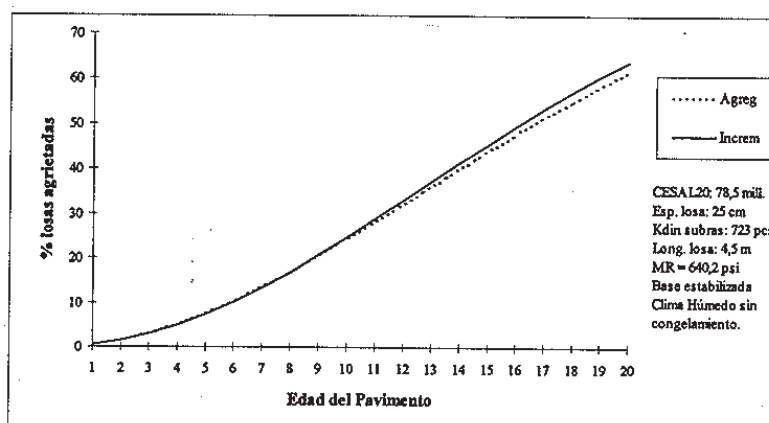


Figura 6 : Gráfico de modelación de agrietamiento en pavimentos JPCP.

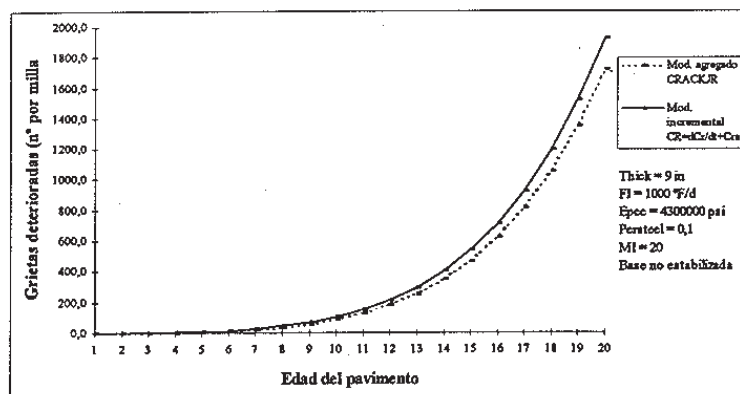


Figura 7 : Gráfico de modelación de deterioro de grietas en pavimentos JRCP.

Finalmente, la forma incremental del modelo de *deterioro de grietas* de pavimentos JRCP predice un deterioro levemente superior al del modelo agregado para el caso en que se derive directamente la expresión de CESAL con respecto al tiempo (sin hacer cambios de variables); las diferencias entre ellos son decrecientes, con valores máximos que alcanzan a unas 400 grietas por milla en pavimentos de 20 años.

Las diferencias entre los resultados de los modelos agregado e incremental se pueden explicar en base a dos razones:

1. El cambio de variables de los ejes equivalentes (ec. 2), para derivarlos simplifícadamente en función del tiempo, le infunde un grado de inexactitud a la predicción incremental pues con ese cambio se está suponiendo que los ejes equivalentes acumulados son el producto de los ejes equivalentes anuales (del año de evaluación) con la edad del pavimento, dejándose de lado el hecho real de que el tránsito tiene, en la gran mayoría de los casos, una tasa de crecimiento anual y por lo mismo su acumulación no es una función lineal de los YESAL y la edad.
2. Un efecto relativo a la significación matemática de la derivada: como se sabe la derivada de una función corresponde al valor de la pendiente de la tangente a la curva representativa de dicha función en el punto de derivación. Para calcular con exactitud la variación de la función en un intervalo determinado (definido por un cierto incremento en la variable independiente) sería necesario conocer la pendiente de la recta secante a la función que pasa por dichos puntos. De acuerdo al teorema del valor medio, se asegura la existencia de un punto, perteneciente al intervalo, tal que la pendiente de la tangente a la curva en ese punto es igual a la pendiente de la cuerda que une los extremos del intervalo, por lo que se puede afirmar que para lograr una mejor aproximación del cálculo de los incrementos anuales de deterioro al modelo agregado, sería conveniente buscar un valor intermedio de tiempo dentro del lapso dado por el incremento anual, de modo que el valor de la pendiente de la tangente en ese punto intermedio se acerque al de la pendiente de la cuerda secante que une los extremos del intervalo, en vez de usar los valores extremos inicial o final (en años enteros) como efectivamente se hizo en la derivación de los modelos antes mencionados (ver ejemplo gráfico en fig. 8). Matemáticamente lo antes señalado corresponde a hallar el valor de $[t_{n+1} - dt]$ para que se cumpla:

$$\frac{\Delta f}{\partial t} = \frac{[f(t_{n+1}) - f(t_n)]}{t_{n+1} - t_n} \cong \frac{\partial f(t)}{\partial t} \quad (22)$$

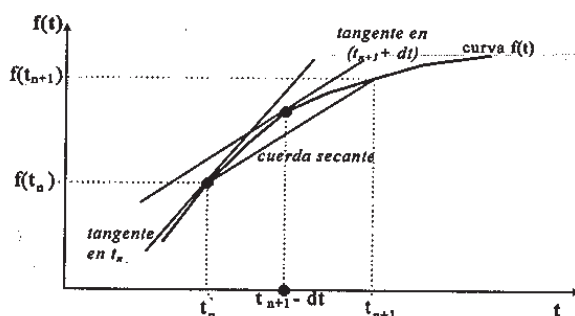


Figura 8 : Detalle gráfico de la significación matemática de la derivada y sus implicaciones en el cálculo del modelo incremental.

6. CONCLUSIONES

- Es importante desarrollar modelos incrementales de predicción del deterioro de pavimentos de hormigón, ya que presentan diversas ventajas en relación a los modelos agregados, especialmente para su aplicación en sistemas de gestión de pavimentos.
- Es posible generar modelos de deterioro incrementales para pavimentos de hormigón a partir de la derivación de modelos agregados, y los resultados son bastante confiables, los modelos incrementales obtenidos poseen, en general, un buen ajuste respecto a sus modelos de origen.
- En el caso de los dos modelos de que poseen la variable CESAL, al probar si convenía más derivar CESAL directamente a partir de su expresión exponencial considerando la tasa anual de crecimiento, o aplicando el cambio de variables sugerido para los modelos HDM III de asfalto: $CESAL = YESAL * AGE$, se obtuvo como resultado que en uno de los modelos convenía hacer el cambio de variables y en el otro no.
- Tampoco se presentó una tendencia consistente en cuanto a si la predicción del deterioro por los modelos incrementales es mayor o menor que la de los modelos agregados. Debe analizarse cada derivación y modelo incremental obtenido por separado, no es posible definir una tendencia única para el comportamiento de todos ellos.
- Si bien los resultados de modelos agregados e incrementales no son exactamente iguales, estos últimos se pueden considerar como altamente confiables y seguros en sus predicciones futuras, pues sus diferencias con los resultados agregados son mínimas y, como se sabe, tampoco los modelos agregados son 100% seguros en sus predicciones, pues se modelaron en base a datos de deterioros reales, que no siempre tienen una buena correlación y baja variabilidad y que pueden no reflejar bien al pavimento en estudio, sobre todo si este se encuentra en condiciones muy diferentes a las de aquel en que se obtuvieron los datos para la modelación empírica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Instituto Chileno del Cemento y Hormigón y a FONDECYT (proyecto N° 1960378), por el apoyo técnico y económico otorgado a la presente investigación.

REFERENCIAS

Chesher, A. y R. Harrison (1987) **Vehicle Operating Costs: Evidence from Developing Countries**. World Bank, Transportation Department, Washington D.C.

FICEM (1996) **Evaluación Técnica y Económica de Pavimentos Basada en HDM**. Grupo de Estudio Latinoamericano, Federación Interamericana del Cemento, Santiago.

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

Lee, Y.-H. y M.I. Darter (1994) **Development of Pavement Prediction Models**. Report N° FHWA-IL-UI-250, Illinois Department of Transportation and Federal Highway Administration, University of Illinois, Champaign, Illinois.

Paterson, D.O. William (1987) **Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management**. Highway Design and Maintenance Standards Series, World Bank Transportation Department, Washington D.C.

Wade, M.J., K.D. Smith, H.T. Yu, M.I. Darter y C.J. Wienrank (1995) **Performance of Concrete Pavements 1 al 3**. Report N° FHWA-RD-94-177, 95-110 y 95-111 U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration, ERES Consultants Inc., Champaign, Illinois.

Watanatada et al. (1987) **The Highway Design and Maintenance Standards Model 1**. World Bank, Transportation Department, Washington D.C.

Tabla 1: Definición de variables de modelos incrementales

Variable	Descripción de la variable	Unidades
AGE	Edad del pavimento desde su construcción	años
Avjspace	Promedio de espaciamiento de juntas transversales	ft
Base	Tipo de base (0, No estabilizada; 1, Estabilizada)	
Bstress	Máxima tensión de flexión del sistema barra/hormigón	psi.
CESAL	ejes equivalentes de 18 kip, acumulados	millones
Cd	Coefficiente de drenaje AASHTO	
CrackJR	Número de grietas de mediana y alta severidad por milla.	nº/milla
Days90	días al año con temperatura ambiente máxima superior a 90 °F	nº
Dowelcor	protección anticorrosión de las barras: 0 si no hay o están protegidas, 1 si lo están	
Epcc	Módulo de elasticidad del hormigón	10 ⁶ psi.
FaultD	Escalonamiento promedio de juntas transversales	in/mi
FauND	escalonamiento en juntas sin barras	pulgadas
FaultTT	escalonamiento acumulado en una milla FaultTT= FaultD * 5280/ Avjspace	in
FI	Indice de Congelamiento	°F-días
IRI	indice de rugosidad	in/mi
Jtspace	espaciamiento promedio de juntas transversales	ft.
Lcrack	agrietamiento longitudinal	ft/mi
Liqseal:	1 si el sello de juntas es líquido, 0 en caso contrario	
MI	indice de humedad Thornthwaite	
PSR	indice de serviciabilidad presente	nº (1 a 5)
Persteel	Porcentaje de acero de refuerzo longitudinal	%
Precip	Precipitación promedio anual	in
Prefseal	1 si el sello de juntas es preformado y 0 en caso contrario	
Spall	porcentaje de juntas deterioradas de media y alta severidad	%
SpallJR	porcentaje de juntas deterioradas de media y alta severidad	%
Silseal	tipo de sello, 1 si el sello es de siliconas, y 0 en caso contrario	
t	tasa de aumento del tránsito	%/100
Tcrack	número total de grietas transversales en una milla	nº
Thick	espesor de la losa de hormigón	in.
YESAL	ejes equivalentes de 18 kip anuales	millones
Widenlane	Sobreancho de calzada (0, Sin sobreancho; 1, Con sobreancho)	