

DESARROLLO DE MODELOS DE DETERIORO INCREMENTALES DE SEGUNDA FASE PARA PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Por: Hernán de Solminihaç T. - Ricardo Salsilli M. - Juan Pablo Covarrubias T. - Mariana Vidal M.

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 dos tipos: agregado e incremental, los primeros calculan el deterioro total acumulado y requieren conocer la historia previa del pavimento para realizar la predicción del comportamiento futuro, los otros sólo requieren conocer las condiciones actuales del pavimento para realizar tal predicción. Por ello, los modelos incrementales 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 HDM 4 pretende incorporar el análisis de pavimentos de hormigón, utilizando para ello modelos agregados de deterioro; para los pavimentos asfálticos, en cambio, se utilizan modelos incrementales.

En el marco del desarrollo de modelos incrementales de predicción de deterioros para pavimentos de hormigón, se han planteado los primeros Modelos de Deterioro Incrementales de Segunda Fase para Pavimentos de Hormigón, es decir para después de realizadas aquellas actividades de mantención que permiten mejorar el nivel de servicio del pavimento y su respuesta a las diversas solicitaciones durante su vida útil. Estos modelos de segunda fase fueron obtenidos en base a la combinación matemática de modelos de primera fase, diferenciados en función del tiempo.

En este trabajo se presentan las bases de desarrollo de los modelos incrementales de deterioro de segunda fase para pavimentos de hormigón, y se comenta respecto de la validez de los mismos, además se efectúa una evaluación de las ventajas y desventajas que estos modelos tienen con respecto a los ya existentes y se presenta un ejemplo de los modelos de segunda fase planteados.

1. INTRODUCCION

En el marco de la administración de pavimentos y a fin de predecir el deterioro que puedan sufrir los mismos a lo largo de su vida útil se ha dado origen a los Modelos de Deterioro, herramientas mediante las cuales es posible inferir ciertos comportamientos del pavimento en el futuro, durante

su vida útil. Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del análisis; además permiten pronosticar los efectos, a corto y largo plazo, de la mantención efectuada sobre ellos, con el objetivo de realizar estimaciones tanto de las oportunidades en que sea necesario llevar a cabo alguna conservación, como del nivel de deterioro resultante luego de la misma y su progresión en el tiempo [FICEM 96].

El Banco Mundial ha promovido la creación de un sistema de evaluación de pavimentos, el Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM), cuya versión HDM III contiene relaciones para predecir el comportamiento de los mismos en el tiempo ante cargas de tránsito, y para cuantificar los efectos de las actividades de mantención [Paterson 87]. 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 Highway Development and Management Tools (HDM 4), que incluye a pavimentos asfálticos y de hormigón, actualmente para los primeros los modelos son incrementales, pero para los segundos las ecuaciones propuestas, de primera y segunda fase son de tipo agregado, es decir predicen el deterioro acumulado a partir del inicio de la vida útil del pavimento, utilizando datos de la historia del mismo [FICEM 96].

En vista de que los modelos incrementales presentan algunas ventajas en relación a los modelos agregados, principalmente debido a que no requieren de la historia del pavimento para realizar la predicción (fig. 1), y a que la modelación de tipo incremental no ha sido muy utilizada, salvo ciertas excepciones [Lee 93], para predecir la evolución del comportamiento en pavimentos de hormigón, se formularon modelos incrementales para la predicción de diferentes deterioros en pavimentos de hormigón a partir del estudio de modelos disponibles, con el objetivo de complementar el desarrollo actual de HDM 4.

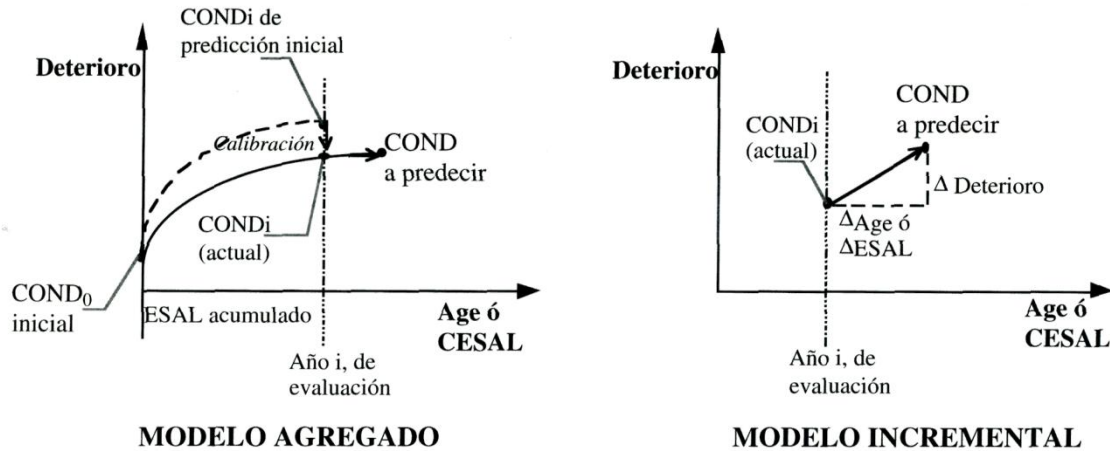


Figura 1. Diferencias entre Modelos Agregados e Incrementales

2. MODELOS DE DETERIORO DE PRIMERA Y SEGUNDA FASE

Los pavimentos, en general, presentan dos fases de deterioro claramente diferenciables, estas son:

1. La primera fase es aquella etapa del deterioro que se produce entre la puesta en funcionamiento de una vía con pavimento nuevo, inmediatamente después de su construcción, y el momento en que se lleva a cabo en ella una reparación de importancia. Para tal efecto es necesario precisar que se considera como reparación de importancia en un pavimento a aquella que genere un mejoramiento en el nivel de servicio de la vía, por lo mismo es que son reparaciones de importancia:

- todas las actividades de restauración, tales como: cepillado, reparaciones de espesor parcial o total,

reemplazo de losas, restablecimiento de la transferencia de carga entre las losas, etc.

- los recapados (de asfalto u hormigón)
- las reconstrucciones.

2. La segunda fase de deterioro es aquella etapa que va desde la realización de una mantención de importancia en adelante. Al llevar a cabo una rehabilitación siempre se elimina o reduce el deterioro existente, o bien, se afecta a la progresión del mismo para el futuro (o ambos) por lo que el comportamiento del pavimento en la etapa posterior a la actividad de mantención es, por lo general, diferente al de la primera fase, ya sea porque el deterioro se reinicia nuevamente desde un valor igual o cercano al valor inicial de un pavimento nuevo o porque la progresión con que avanza el mismo es menor (o mayor) que antes de la mantención.

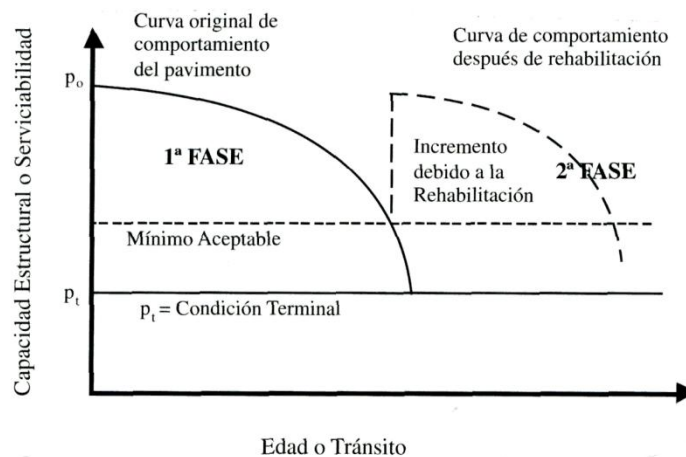


Figura 2. Esquema de deterioros de pavimentos de 1ª y 2ª Fase.

3. METODOLOGIA DE DESARROLLO DE MODELOS INCREMENTALES DE 2ª FASE

A fin de conseguir los modelos incrementales de segunda fase en pavimentos de hormigón se realizó un completo estudio de las metodologías alternativas existentes, desarrollándose finalmente un proceso que cuenta con las siguientes etapas.

3.1 Antecedentes previos

Antes de la generación de modelos de deterioro de segunda fase para pavimentos de hormigón se realizó una amplia revisión de los modelos existentes (de 2ª fase), con ella fue posible comprobar, en primer lugar, que hay muy pocos modelos de segunda fase para pavimentos de hormigón y en segundo lugar que ninguno de los modelos encontrados es de tipo incremental. Entre los modelos hallados se cuentan:

- a) Modelos agregados empíricos de deterioro de segunda fase de pavimentos de hormigón desarrollados en el marco del estudio «Determination of Rehabilitation Methods for Rigid Pavements» encargado por la Federal Highway Administration y desarrollado por la Universidad de Illinois, estos proporcionaron nuevos antecedentes para una mejor comprensión de la evolución de las rehabilitaciones de pavimentos [Snyder 89]. Los modelos originados en este estudio son los de:

- escalonamiento
- deterioro de juntas transversales
- reflexión de grietas
- ahuellamiento

Aplicables a las actividades de restauración que se mencionan a continuación:

- cepillado
- restablecimiento de la transferencia de carga
- reparación de espesor completo de la losa
- recapados de hormigón adherido
- recapados de hormigón no adherido
- recapados de asfalto sobre pavimentos de hormigón (previamente quebrados y asentados)

Lamentablemente gran parte de los modelos antes mencionados no otorgan buenos resultados, principalmente debido a que presentan deficiencias relativas a su confiabilidad, ya sea porque fueron formulados en base a datos de muy pocas secciones, o bien porque su correlación estadística (R^2) es demasiado baja. Por lo que es posible afirmar que estos modelos no son una fuente apropiada de predicción de deterioros futuros, sobre todo en aplicaciones de estudios a pavimentos con variadas condiciones estructurales, de clima, etc.

- b) Modelos de segunda fase para pavimentos de hormigón propuestos para HDM 4, que están

conformados por una serie de combinaciones lógicas de los mismos modelos agregados que se utilizan para las predicciones de primera fase. Las combinaciones lógicas están basadas en los conocimientos que se tienen del comportamiento de los pavimentos de hormigón en la práctica durante la etapa posterior a la realización de una mantención. Dichos modelos abarcan numerosas actividades de restauración y recapados, para las cuales ha sido posible formular modelos de escalonamiento de juntas, deterioro de juntas, agrietamiento y deterioro de grietas [FICEM 96].

Además se intentó encontrar modelos incrementales de deterioro de pavimentos, lográndose obtener sólo los desarrollados en el marco del proyecto Highway Design and Maintenance Standards (HDM) en su versión HDM III para Pavimentos Asfálticos [Paterson 87].

3.2 Metodologías de desarrollo de modelos incrementales en general

La metodología utilizada para dar origen a los modelos de deterioro incrementales de segunda fase para pavimentos de hormigón se basa principalmente en las actividades seguidas para formular los modelos incrementales de pavimentos asfálticos en HDM III [Paterson 87] y corresponde básicamente a dos variedades, cada una con características particulares:

3.2.1 Modelos incrementales empíricos

Los modelos incrementales empíricos se logran mediante la realización de un análisis estadístico de los datos con que se cuenta, en particular efectuando el estudio de correlación de las variables que inciden en el deterioro en estudio con las variaciones del deterioro en un período determinado.

En una primera instancia se recopiló toda la información existente en las bases de datos con que se contaba, a fin de intentar la posibilidad de formular modelos empíricos de segunda fase a partir del análisis estadístico de dichos datos. Luego de la revisión de la información disponible se llegó a la conclusión de que existen numerosas bases con datos de deterioros, especialmente completas son las correspondientes a los estudios Long Term Pavement Performance (LTPP) [Rowshan 93] [SHRP 92] y RIPPER 95 [Wade 95], lamentablemente en ellas sólo abundan datos de deterioro de primera fase, los de segunda fase son escasos en LTPP e inexistentes en la base de RIPPER 95. A modo de ejemplo se puede señalar que la base LTPP cuenta con datos de sólo 4 secciones para el deterioro posterior a la reparación de espesor parcial y de 3 secciones para el deterioro luego de la reparación de espesor completo.

Dado lo anterior se concluyó que es prácticamente imposible generar modelos a partir de los datos de deterioros de segunda fase con que se cuenta, porque no hay suficientes

datos para lograrlo, entonces fue necesario intentar la aplicación de una metodología alternativa para dar forma a los modelos.

3.2.2 Modelos incrementales derivados

Los modelos incrementales derivados, se obtienen por medio de la diferenciación en función del tiempo de modelos agregados existentes, tal como se hiciera en HDM III, para el caso del modelo de ahuellamiento (RDM). Cabe señalar que en el modelo de ahuellamiento se debió utilizar una forma indirecta de obtención del modelo incremental debido a dificultades relativas a la variación de los datos en el tiempo, específicamente porque en los intervalos de tiempo en que se tomaron los datos de ahuellamiento, estos tenían una escasa variación y se les asociaba una gran magnitud de error de medida, de modo que el análisis por períodos incrementales de tiempo no era satisfactorio; entonces fue necesario realizar estimaciones en base a los valores absolutos de deterioro, los que generaron un modelo agregado de ahuellamiento el que fue transformado en incremental mediante derivación.

3.3. Metodología específica de desarrollo de modelos incrementales de segunda fase para HDM 4

Para obtener los modelos derivados de HDM 4 se emplea un procedimiento similar al utilizado en el ahuellamiento de HDM III [Paterson 87], mediante la derivación de modelos agregados existentes, recurriendo para tal efecto a dos variedades de técnicas alternativas para derivar. En adelante se detalla la metodología a seguir.

3.3.1 Consideraciones previas

En una primera instancia se debió realizar la selección de las condiciones iniciales a tener en cuenta para la obtención de los modelos derivados, en particular los tipos de pavimento a emplear para la modelación, los deterioros y mantenciones a modelar, así como también los modelos agregados a utilizar como base, las características de la selección se reseñan a continuación.

1. *Tipos de Pavimento a utilizar:* se formularon modelos de deterioro incrementales de segunda fase sólo para los pavimentos más comunes en el mundo, es decir, se modeló para pavimentos de hormigón simple (JPCP) con y sin barras de traspaso de cargas y para pavimentos de hormigón reforzado (JRCP).
2. *Deterioros a modelar:* se modelaron todos aquellos deterioros que fueron considerados en los modelos agregados de HDM 4 [FICEM 96], que representan a los tipos de deterioros básicos que se presentan en los pavimentos de hormigón, los que son claramente medibles y

representables matemáticamente. Estos son:

- escalonamiento de juntas
- agrietamiento transversal (sólo para pavimentos JPCP)
- deterioro de juntas transversales
- deterioro de grietas (sólo para pavimentos JRCP)

Además se modeló el indicador de serviciabilidad dado por el índice de rugosidad internacional (IRI).

3. *Actividades de mantenimiento para modelación de segunda fase:* las actividades de mantenimiento contempladas en el desarrollo de ecuaciones de segunda fase son, en general, las mismas que se utilizan en HDM 4 [FICEM 96], éstas corresponden a actividades de mantenimiento y a recapados. Entre las actividades de mantenimiento se cuentan:

- reparación de espesor completo
- reparación de espesor parcial
- reemplazo de losas
- cepillado
- colocación de bermas hormigonadas
- colocación de drenes longitudinales
- sellado de juntas

Y entre los recapados se cuentan:

- recapados de hormigón adherido
- recapados de hormigón no adherido

4. *Modelos agregados de segunda fase a utilizar como base:*

se realizó la selección de los modelos agregados de segunda fase a utilizar como base para la diferenciación, la mayoría de ellos son los que aparecen en la actual versión del programa computacional de predicción de deterioros HDM 4 [FICEM 96], que corresponden a combinaciones empíricas de los modelos de primera fase. Tales modelos de primera fase están basados en los modelos propuestos en el estudio RIPPER 95 desarrollado para Federal Highway Administration [Wade 95]. Estos modelos se pueden subdividir en tres grandes variedades:

- *modelos agregados empíricos*, que se han formulado en base a los datos de deterioro y que son función de las condiciones estructurales del pavimento, del medio ambiente que rodea a los pavimentos, de la edad de los mismos y de los ejes equivalentes acumulados en ellos.
- *modelo agregado mecanicista con validación empírica*, este corresponde específicamente al de agrietamiento en JPCP, donde el cálculo de grietas es función de la fatiga acumulada, que requiere de la determinación de tensiones críticas en función de cargas de tránsito y alabeo térmico de las losas.
- *modelo de evolución de indicador de serviciabilidad*, es decir modelo de deterioro de serviciabilidad que es expresado en función de otros deterioros, en particular corresponde al modelo de índice de rugosidad (IRI).

Cada variedad de modelo utiliza un método distinto para ser derivado con el fin de lograr un modelo incremental, los métodos de derivación se describen a continuación.

3.3.2 Métodos de derivación de modelos

a. Derivación de modelos empíricos en función del tiempo, sin cambios de variables

A los modelos agregados empíricos de deterioro se les puede derivar directamente en función del tiempo, tal como en HDM III [Paterson 87]; teniendo en cuenta que en ellos las variables dependientes del tiempo son dos: la edad del pavimento (AGE), contada desde su puesta en marcha o desde la fecha en que se ha realizado una *mantención de importancia* y el *tránsito acumulado* (CESAL) en millones de ejes equivalentes (de 18 kip).

La variable CESAL se expresa como función de los ejes equivalentes al inicio de la vida de servicio del pavimento, de la tasa anual de crecimiento del tránsito y de la edad del pavimento (ec. 1) y se la puede derivar en función del tiempo quedando como en la ecuación 2.

$$\text{CESAL} = \begin{cases} \text{CESAL}_0 * [(1 + \text{tasa})^{\text{AGE}} - 1] / \text{tasa} & \text{si tasa} \neq 0 \\ \text{CESAL}_0 * \text{AGE} & \text{si tasa} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

que una vez derivada queda:

$$\text{CESAL}' = \begin{cases} \text{CESAL}_0 * \ln(1 + \text{tasa}) / \text{tasa} * (1 + \text{tasa})^{\text{AGE}} & \text{si tasa} \neq 0 \\ \text{CESAL}_0 & \text{si tasa} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

- CESAL : ejes equivalentes acumulados en el tiempo (millones de ESAL)
 CESAL₀ : ejes equivalentes de 18 kip al inicio de la vida de servicio del pavimento (millones de ESAL)
 CESAL₀ = TMDA₀ * FEC * 365 (3)
 TMDA₀ : tránsito medio diario anual que hay al inicio de la vida de servicio del pavimento (millones de vehículos / día)
 FEC : factor de equivalencia de carga por tipo de vehículo, vale 1 por defecto
 tasa : tasa de crecimiento del tránsito (%)
 AGE : edad del pavimento (años)

Además se debe tener en cuenta una consideración relacionada con la significancia 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 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 [Freyhoffer 89].

A partir de lo anterior se puede afirmar que para lograr una mejor aproximación del cálculo de los incrementos anuales de deterioro al modelo agregado, es conveniente buscar un valor intermedio de tiempo dentro del intervalo dado por el incremento anual, en vez de usar los valores extremos inicial o final (en años enteros), de modo que se acerque el valor de la pendiente de la tangente, a ese punto intermedio, al de la pendiente de la cuerda secante que une los extremos del intervalo [Bustos 98], ver ejemplo gráfico en figura 3. Matemáticamente eso es hallar el valor de $[t_{n+1} - dt]$ para que se cumpla lo expresado en ec. 4.

$$\Delta f = [f(t_{n+1}) - f(t_n)] \cong (t_{n+1} - t_n) * \frac{\partial f(t)}{\partial t} \Big|_{t = t_{n+1} - dt} \quad (4)$$

Dado que el cálculo de la posición exacta de ese punto $[t_{n+1} - dt]$ es bastante dificultosa, se tomó un valor intermedio de dt, equivalente a medio año, y por lo tanto al calcular el incremento de los deterioros en lugar de utilizar la edad del pavimento (AGE) se cambia por el valor de restar medio año a la edad en cada año de evaluación (A, ecuación 5), así es posible lograr un modelo incremental con un ajuste mucho más cercano a la predicción original del modelo agregado [Bustos 98].

$$A = \text{AGE} - 0.5 \quad (5)$$

b. Derivación de modelos empíricos en función del tiempo, con cambio de variables para CESAL

Una segunda forma de plantear los modelos incrementales es derivando el modelo agregado en función del tiempo, pero utilizando un cambio de variables análogo al utilizado en HDM III para derivar los ejes equivalentes acumulados (CESAL) [Watanatada 87]. Con ese cambio de variables se simplifica la expresión de los ejes equivalentes acumulados que pasa de la forma de ec. 1 a la de ec. 6., así al derivarlos se los independiza de conocer la tasa de crecimiento del tránsito durante la historia anterior del pavimento y los ejes equivalentes que hay al inicio de la vida del mismo.

$$\text{CESAL} = \text{YESAL} * \text{AGE} \quad (6)$$

Donde:

- CESAL : ejes equivalentes acumulados en el tiempo (millones de ESAL)
 YESAL : ejes equivalentes acumulados en el año en estudio (millones de ESAL)
 AGE : edad del pavimento (años)

Para este caso se utiliza también el cambio de variables AGE por A (ec. 5), por las mismas razones explicadas en el punto anterior.

c. Derivación de modelo mecanicista de agrietamiento

Como ya se indicara, el modelo de agrietamiento para pavimentos JPCP obtenido de RIPPER 95 es sustancialmente distinto al resto de los modelos empíricos,

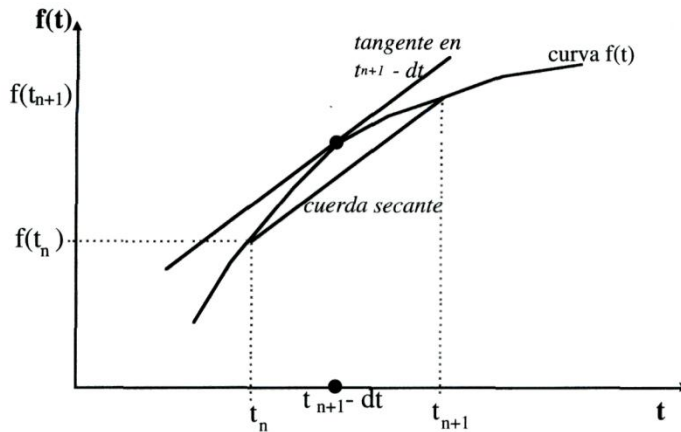


Figura 3. Detalle gráfico de la significación matemática de la derivada y sus implicaciones en el cálculo del modelo incremental

pues dicho modelo es eminentemente mecanicista y validado empíricamente, en este caso el cálculo de las grietas es función del consumo de fatiga acumulado en las losas (FD). Para obtener ese consumo de fatiga es necesario aplicar previamente conceptos de tipo mecanicista que permiten determinar las tensiones críticas en el pavimento en función de las cargas de tránsito que actúan sobre él y el alabeo térmico que sufre por las diferencias de temperatura entre las caras superior e inferior de la losa.

La obtención de la cantidad de losas agrietadas esperadas se realiza como función del daño por fatiga acumulado en ellas, así en lugar de calcular el consumo de fatiga acumulado total, se calculan los incrementos anuales de tales consumos con la ec. 7.

$$FD_i = \sum_j k_j \cdot YESAL_i / (pc_j \cdot N_i) \quad (7)$$

- FD_i : consumo de fatiga correspondiente a año i
- j : frecuencia considerada de diferenciales de temperaturas j
- $YESAL_i$: ejes equivalentes acumulados en el año i (millones de ESAL)
- pc_j : pasadas de cobertura asociadas a la diferencia de temperatura j
- N_i : n° admisible de repeticiones de carga para un diferencial de temperatura i

Y se calculan los incrementos en la cantidad de losas agrietadas, mediante la utilización de una expresión derivada en el tiempo de la ecuación de losas agrietadas en función del consumo de fatiga.

d. Derivación de modelo de serviciabilidad

Como ya se señaló antes, el modelo de serviciabilidad en pavimentos de hormigón que determina el índice de rugosidad internacional del pavimento (IRI), presenta una característica singular: es función de la evolución de los deterioros superficiales, en particular de

grietas transversales y longitudinales, de escalonamientos y de deterioros de juntas transversales. Este modelo agregado se deriva en función del tiempo sin dificultad, ya que es función lineal de los deterioros, por lo mismo es que una vez derivado queda en función de los deterioros y de los incrementos anuales que se producen en dichos deterioros, como se observa en la expresión genérica de la derivada de un deterioro en el tiempo (ec. 8).

$$d(\text{Det}) / dt = \text{Det}' \cdot \Delta \text{Det} \quad (8)$$

3.3.3 Formulación de modelos de segunda fase para HDM 4

Los modelos se pueden agrupar en dos variedades para efectos de modelación de la segunda fase del deterioro, cada variedad utiliza una modalidad de formulación distinta:

a. Modelos de deterioro de segunda fase, después de una mantenimiento (rehabilitación o recapado)

Se formulan únicamente a partir de la experiencia práctica y el conocimiento existente respecto del comportamiento de los pavimentos de hormigón luego de las actividades de mantenimiento. En base a esa experiencia se plantean relaciones matemáticas de lógica que combinan a los modelos incrementales de primera fase y que reflejan matemáticamente lo observado en la práctica, en este caso no se plantean nuevos modelos empíricos en base a datos de deterioros posteriores a una mantenimiento, pero las relaciones de lógica permiten representar adecuadamente la influencia de cada mantenimiento en el deterioro futuro, ya sea por medio de una variación en la progresión del mismo o bien por una brusca disminución en el deterioro al momento de llevar a cabo la mantenimiento.

Es importante señalar que para calcular los deterioros del primer año se debe diferenciar entre

aquellos modelos que tienen un incremento notable en el deterioro del primer año, como el escalonamiento y el deterioro de grietas o agrietamiento, y aquellos cuyo deterioro inicial es casi imperceptible, como el deterioro de juntas; pues en el primer caso se debe utilizar la expresión agregada original para calcular el deterioro del primer año, y posteriormente obtener los sucesivos incrementos anuales de deterioro, tal como en HDM III, en cambio en el segundo caso se puede utilizar el modelo incremental desde el primer año, calculando primero los incrementos en cada año y luego el deterioro al final del año de análisis utilizando la ec. 9.

$$\text{DETERIORO}_{n+1} = \text{DETERIORO}_n + \Delta \text{DETERIORO} \quad (9)$$

b. Modelo de evolución de la serviciabilidad para segunda fase

En la segunda fase de deterioro no se formulan nuevos modelos de serviciabilidad, sólo se utilizan los mismos modelos incrementales existentes para primera fase, los que reflejan el cambio en la serviciabilidad luego de la mantención gracias a la variación que dicha mantención provoca en los deterioros del pavimento (que son la base del modelo de serviciabilidad).

3.3.4 El uso de una u otra metodología en derivación de los modelos empíricos para formular los modelos de segunda fase de deterioro

Como ya se mencionara antes, los modelos empíricos

de primera fase se pueden derivar de dos formas distintas, aplicando o no un cambio de variables a CESAL, por lo mismo es que es posible plantear dos formas de modelos incrementales de segunda fase, ambos igualmente válidos pero con diferencias en cuanto a la información que requieren para ser aplicados y a los resultados que entregan.

Si es posible contar con los datos de ejes equivalentes sobre la vía al inicio de su vida útil y la tasa de aumento del tránsito en dicha vía, o los ejes equivalentes acumulados que han pasado por ella hasta el momento de la evaluación es factible utilizar la ecuación de segunda fase en que se han derivado directamente los CESAL en función del tiempo (sin cambio de variables), esta es una ecuación incremental que no conserva íntegramente las ventajas de ser incremental, porque no prescinde de todos los antecedentes históricos del pavimento (ya que requiere el tránsito histórico), pero es igualmente ventajosa porque sólo si se cuenta con más de un dato de la historia de deterioro del pavimento para efectuar la predicción se debe calibrar el modelo antes de realizar las predicciones futuras, si se cuenta con un único dato de deterioro no es necesaria tal calibración. Este modelo incremental sin cambio de variables para CESAL predice deterioros que se ajustan notablemente bien a los deterioros predichos bajo iguales condiciones por el modelo agregado. Por otra parte, si se utiliza el modelo empírico derivado con cambio de variables para CESAL se logra un modelo incremental de segunda fase completamente puro, en el sentido que para el cálculo de los incrementos de deterioro de un año a otro no se requiere de ningún tipo de antecedente histórico, sólo de conocer las características estructurales del pavimento, de su base y de su subbase y de las condiciones

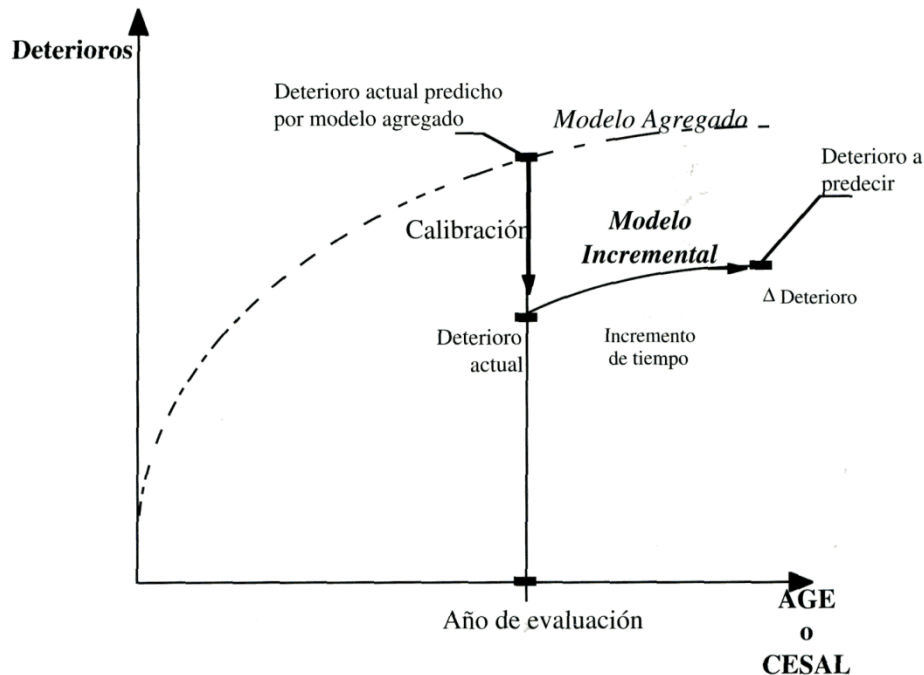


Figura 4. Esquema de modelo incremental con CESAL derivado directamente en función del tiempo

del medio ambiente que lo rodea, además del nivel de deterioro del pavimento al inicio del año de análisis y los ejes equivalentes que pasan por él durante ese año (fig. 5).

Para realizar proyecciones del comportamiento futuro con este último modelo sólo se debe utilizar un supuesto: es necesario suponer la tasa de aumento del tránsito en los años siguientes al de evaluación para calcular los ejes equivalentes que pasarán por el pavimento en cada año, o bien suponer directamente los ejes equivalentes (ESAL) que pasarán por el pavimento en cada año evaluado, tal como se realizara en HDM III para modelo de ahuellamiento [Paterson 87].

En este caso, a diferencia del anterior, los deterioros predichos no se ajustan por completo a los resultados de modelos agregados evaluados en base a las mismas condiciones. Por lo general las predicciones de los modelos incrementales son levemente superiores o inferiores a las de los modelos agregados (esto último varía según el tipo de modelo en cuestión), de ahí que es posible afirmar que se podrá perder exactitud, levemente, al utilizar los modelos incrementales con cambio de variables para CESAL con respecto a aquellos formulados con CESAL derivado directamente en función del tiempo.

De todos modos, los modelos derivados que utilizan el cambio de variables para CESAL son altamente confiables y recomendables para ser utilizados en la predicción incremental de los deterioros, además de tener como principal

ventaja el hecho de ser puramente incrementales. En todo -
 - Deterioro de juntas luego de sellado de juntas
 - Agrietamiento luego de reemplazo de losas
 - Agrietamiento luego de colocación de bermas de hormigón

Modelos para pavimentos JPCP con y sin barras de traspaso de cargas luego de recapados:

- Escalonamiento luego de recapado de hormigón adherido
- Deterioro de juntas luego de recapado de hormigón adherido
- Agrietamiento luego de recapado de hormigón adherido

Modelos para pavimentos JRCP luego de restauraciones:

- Escalonamiento luego de reparación de espesor completo
- Escalonamiento luego de cepillado al diamante
- Escalonamiento luego de colocación de bermas de hormigón amarradas
- Escalonamiento luego de colocación de drenes laterales
- Deterioro de juntas luego de reparación de espesor completo
- Deterioro de juntas luego de sellado de juntas
- Deterioro de grietas luego de reparación de espesor completo

Modelos para pavimentos JRCP luego de recapados:

- Escalonamiento luego de recapado de hormigón adherido
- Deterioro de juntas luego de recapado de hormigón adherido

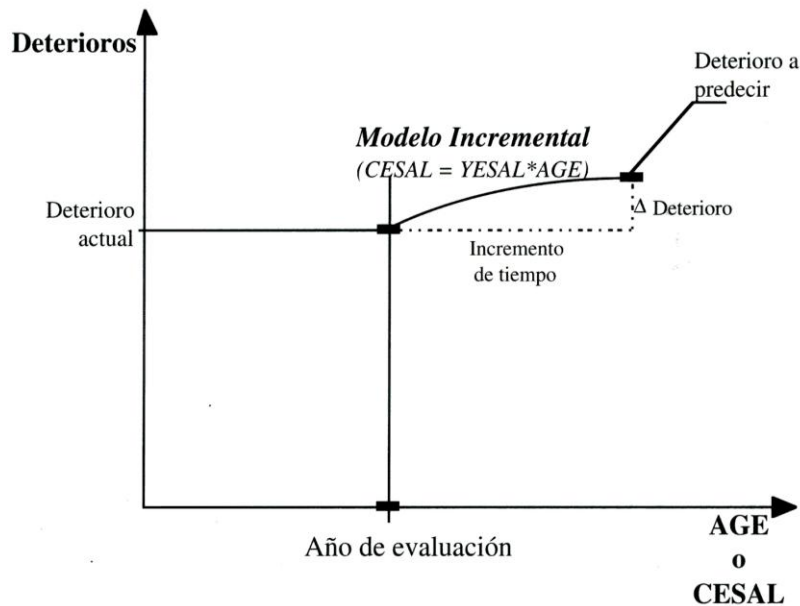


Figura 5. Esquema de modelo incremental con CESAL derivado utilizando cambio de variables ($CESAL = YESAL * AGE$)

- Deterioro de juntas luego de reparación de espesor parcial
- Deterioro de juntas luego de sellado de juntas
- Agrietamiento luego de reemplazo de losas
- Agrietamiento luego de colocación de bermas de hormigón

Modelos para pavimentos JPCP con y sin barras de traspaso de cargas luego de recapados:

- Escalonamiento luego de recapado de hormigón adherido
- Deterioro de juntas luego de recapado de hormigón adherido
- Agrietamiento luego de recapado de hormigón adherido

Modelos para pavimentos JRCP luego de restauraciones:

- Escalonamiento luego de reparación de espesor completo
- Escalonamiento luego de cepillado al diamante
- Escalonamiento luego de colocación de bermas de hormigón amarradas
- Escalonamiento luego de colocación de drenes laterales
- Deterioro de juntas luego de reparación de espesor completo
- Deterioro de juntas luego de sellado de juntas
- Deterioro de grietas luego de reparación de espesor completo

Modelos para pavimentos JRCP luego de recapados:

- Escalonamiento luego de recapado de hormigón adherido
- Deterioro de juntas luego de recapado de hormigón adherido
- Deterioro de grietas luego de recapado de hormigón adherido

Modelos indicadores de serviciabilidad para pavimentos JPCP con y sin barras de traspaso de cargas:

- Modelos de índice de rugosidad (IRI)

4.1 Ejemplo de modelo desarrollado

Finalmente se muestra un ejemplo de los resultados de desarrollo de modelos de segunda fase realizados siguiendo la metodología antes detallada, el modelo que se desarrolla es uno perteneciente a un pavimento JPCP sin barras de traspaso de carga luego de un cepillado, y para él se muestra:

- el planteamiento de los modelos de segunda fase con CESAL derivado directamente o con cambio de variables,
- una comparación de los resultados de aplicar los modelos agregado e incremental (en sus dos formas), a ciertas condiciones específicas de tránsito, medio ambiente y estructura

Los demás modelos incrementales formulados para la segunda fase de deterioro aparecen en detalle en la tesis "Modelos de Deterioro Incrementales de Segunda Fase para Pavimentos de Hormigón" de Mariana Vidal M. [Vidal 98] y en el Informe de resultados del segundo año de trabajo del proyecto FONDECYT N° 1960378 "Desarrollo de ecuaciones de Deterioro para Pavimentos de Hormigón utilizando Bases de Datos Mundiales", actualmente en preparación.

4.1.1 Modelos de escalonamiento luego de un cepillado al diamante

El escalonamiento después de la realización de un

cepillado al diamante presenta dos etapas de deterioro que se reflejan en el modelo de 2ª fase correspondiente, estas son [Vidal 98]:

- inicio del deterioro: inmediatamente después de realizar un cepillado al diamante se reduce el escalonamiento de juntas a cero, debido a la naturaleza misma del la restauración aplicada, que consiste en pulir la superficie del pavimento, eliminando la mayor cantidad posible de deterioros superficiales.
- progresión del deterioro: el escalonamiento después de la restauración adquiere una nueva progresión producto de la aplicación del modelo de primera fase, al que se le cambian ciertos parámetros para reflejar la acción del cepillado en el comportamiento del pavimento. Los cambios corresponden básicamente a una nueva contabilización de la edad y de los ejes equivalentes a partir del momento de la restauración, además de la reducción del espesor de la losa producto del cepillado (sólo desde el segundo cepillado en adelante).

Para poder evaluar el comportamiento de los pavimentos sin barras de traspaso de cargas frente al cepillado utilizando los modelos incrementales es necesario conocer el espesor del cepillado ($Thick_{DGR}$) y el número de veces que este se ha realizado (N_{DGR}) a lo largo de la vida útil del pavimento, así como también las características estructurales de los pavimentos, las condiciones medio ambientales que lo rodean, la edad y los ejes equivalentes que pasan por el pavimento en el año de evaluación y, obviamente, las condiciones de deterioro del pavimento al momento de la evaluación.

El modelo incremental de escalonamiento posterior a un cepillado en pavimentos sin barras de traspaso de carga se puede expresar de dos formas distintas utilizando los modelos incrementales de primera fase, según si se ha derivado con o sin cambio de variables para CESAL, ambas son igualmente válidas y la utilización de una u otra está restringida principalmente a los datos de que se disponga. En primera instancia se da a conocer el modelo incremental de segunda fase para cepillado que requiere conocer los ejes equivalentes que pasan durante el primer año de servicio ($YESAL_1$) por el pavimento (o los ejes equivalentes acumulados durante su vida útil, CESAL) y la tasa de crecimiento del tránsito (t) a lo largo de la vida del mismo (ec. 10).

$$FaultND_n = \begin{cases} FauND (AGE_n, YESAL_n) & \text{si } n < CEP \\ 0 & \text{si } n = CEP \\ FauND_{CEP} (AGE_n, YESAL_n) & \text{si } n > CEP \end{cases} \quad (10)$$

Para evaluar la ec. 10 se hace uso de los siguientes modelos incrementales de primera fase:

- FauND_n: modelo de escalonamiento incremental de primera fase en pavimentos JPCP sin barras de traspaso de carga, que refleja deterioros previos al cepillado, corresponde al modelo de la ec. 11.

$$\text{FauND}_n = \begin{cases} \text{YESAL}_1^{0.25} (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} - 0.0115 \text{ Base} + \\ - 0.00025 \text{ Thick}^2 / \text{Jspace}^{0.25} + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} + \\ - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} - 0.0415 \text{ Widenlane}) \quad \text{si } n = 1 \\ \\ \text{FauND}_{n-1} + 0.25 (\text{YESAL}_1 [(1+t)^{A_n} - 1] / t)^{0.75} * \\ \text{YESAL}_1 [\ln(1+t) (1+t)^{A_n} / t] (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} + \\ - 0.00025 \text{ Thick}^2 / \text{Jspace}^{0.25} - 0.0115 \text{ Base} + \\ + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{ Widenlane}) \quad \text{si } n > 1 \end{cases} \quad (11)$$

- FauND_{CEPn}: modelo incremental de primera fase, que refleja deterioro posterior al cepillado, se evalúa utilizando los mismos datos de antes de la restauración, salvo el espesor del pavimento, que se reduce de acuerdo al espesor del cepillado. Además en este modelo se cuenta la edad del pavimento y el tránsito nuevamente, considerando como año cero al año en que se efectúa el cepillado.

$$\text{FauND}_{\text{CEP}n} = \begin{cases} \text{YESAL}_{\text{CEP}+1}^{0.25} (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} - 0.0115 \text{ Base} + \\ - 0.00025 (\text{Thick} - N_{\text{DGR}} * \text{Thick}_{\text{DGR}})^2 / \text{Jspace}^{0.25} + \\ + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{ Widenlane}) \quad \text{si } n = \text{CEP}+1 \\ \\ \text{FauND}_{\text{CEP}n-1} + 0.25 (\text{YESAL}_{\text{CEP}+1} [(1+t)^{(A_n - \text{AGE}_{\text{CEP}})} - 1] / t)^{0.75} * \\ \text{YESAL}_{\text{CEP}+1} [\ln(1+t) (1+t)^{(A_n - \text{AGE}_{\text{CEP}})} / t] (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} + \\ - 0.00025 (\text{Thick} - N_{\text{DGR}} * \text{Thick}_{\text{DGR}})^2 / \text{Jspace}^{0.25} - 0.0115 \text{ Base} + \\ + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{ Widenlane}) \quad \text{si } n > \text{CEP}+1 \end{cases} \quad (12)$$

El modelo incremental de escalonamiento después del cepillado, en caso que no se conozcan antecedentes de la historia del pavimento y sólo se conozcan los ejes equivalentes que transitan en el año de evaluación (YESAL_n), el deterioro en ese mismo año, el espesor y la edad del cepillado es el de la ecuación 13.

$$\text{FaultND}_n = \begin{cases} \text{FND}(\text{AGE}_n, \text{YESAL}_n) & \text{si } n < \text{CEP} \\ 0 & \text{si } n = \text{CEP} \\ \text{FND}_{\text{CEP}}(\text{AGE}_n, \text{YESAL}_n) & \text{si } n > \text{CEP} \end{cases} \quad (13)$$

El modelo anterior es resultado de la combinación de dos modelos incrementales de primera fase:

- FND_n: modelo de escalonamiento incremental de primera fase, que refleja deterioros previos a la restauración, correspondiente a la ec. 14. Es el derivado a partir del modelo agregado, utilizando un cambio de variables para los ejes equivalentes acumulados (CESAL)

$$\text{FND}_n = \begin{cases} \text{YESAL}_1^{0.25} (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} - 0.0115 \text{ Base} + \\ - 0.00025 \text{ Thick}^2 / \text{Jspace}^{0.25} + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} + \\ - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} - 0.0415 \text{ Widenlane}) \quad \text{si } n = 1 \\ \\ \text{FND}_{n-1} + (\text{YESAL}_n * A_n)^{0.25} [0.25 * A_n^{-1} (0.2347 + \\ - 0.1516 \text{ Cd} - 0.0115 \text{ Base} - 0.00025 \text{ Thick}^2 / \text{Jspace}^{0.25} + \\ + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{ Widenlane})] \quad \text{si } n > 1 \end{cases} \quad (14)$$

- FND_{CEPn}: es el mismo modelo de escalonamiento incremental de primera fase, de ec. 15, pero con un cambio en el valor del espesor del pavimento, que se reduce en el espesor de aplicación del cepillado y con la contabilización de la edad y los ejes equivalentes del pavimento nuevamente a partir del año del cepillado, para proyectar los deterioros posteriores al cepillado.

$$\text{FND}_{\text{CEP}n} = \begin{cases} \text{YESAL}_{\text{CEP}+1}^{0.25} (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} - 0.0115 \text{ Base} + \\ - 0.00025 (\text{Thick} - N_{\text{DGR}} * \text{Thick}_{\text{DGR}})^2 / \text{Jspace}^{0.25} + \\ + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{ Widenlane}) \quad \text{si } n = \text{CEP}+1 \\ \\ \text{FND}_{\text{CEP}n-1} + [\text{YESAL}_n * (A_n - \text{AGE}_{\text{CEP}})]^{0.25} * \\ [0.25 * (A_n - \text{AGE}_{\text{CEP}})^{-1} (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} - 0.0115 \text{ Base} + \\ - 0.00025 (\text{Thick} - N_{\text{DGR}} * \text{Thick}_{\text{DGR}})^2 / \text{Jspace}^{0.25} + \\ + 0.7784 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days}90^{0.5} + \\ - 0.0415 \text{ Widenlane})] \quad \text{si } n > \text{CEP}+1 \end{cases} \quad (15)$$

En los modelos anteriores las variables que intervienen son:

- FaultND_n: escalonamiento del pavimento JPCP sin barras para el año n
- n: n° correlativo, equivalente a la edad del pavimento contado desde su puesta en marcha.
- CEP: n° equivalente a la edad del pavimento en la fecha en que se realiza el cepillado
- FauND_{CEP}: escalonamiento del pavimento JPCP sin barras después del cepillado, en modelo con CESAL derivado sin cambio de variables
- FND_{CEP}: escalonamiento del pavimento JPCP sin barras después del cepillado, en modelo derivado con cambio de variables para CESAL
- N_{DGR}: número de veces en que se ha realizado un

	cepillado en el pavimento
Thick _{DGR}	: espesor del cepillado (in)
AGE	: edad del pavimento (años)
A _n	: cambio de variables para edad del pavimento en año n (años) (ec. 5)
CESAL	: ejes equivalentes acumulados en el pavimento (millones de ESAL)
YESAL _n	: ejes equivalentes que transitan por el pavimento en año n (millones de ESAL)
t	: tasa anual de aumento de tránsito en el pavimento (%)
Cd	: coeficiente de drenaje AASHTO
Base	: tipo de base del pavimento: 0, si es base no estabilizada 1, si es base estabilizada
Thick	: espesor de la losa (in)
Jtspace	: espaciamiento de juntas promedio del pavimento (ft)
FI	: índice de congelamiento (°F-días)
Precip	: precipitación promedio anual (in)
Days90	: d'as con temperatura > de 90°F (unidades)
Widenlane	: sobreaño de calzada: 0 si no existe, 1 si se construye junto al pavimento, 0.5 si se instala después de construido el mismo

Cabe destacar que en ambos modelos de escalonamiento de pavimentos JPCP sin barras de traspaso de cargas (ec. 10 y 13), en caso de realizar una modelación que contemple desde el primer año de vida del pavimento, se debe utilizar la expresión agregada para calcular el deterioro de ese primer año de funcionamiento del pavimento y, posteriormente (a partir del segundo año), se debe seguir calculando la progresión del deterioro mediante la acumulación de los incrementos anuales.

4.1.2 Comparación de resultados de modelos de escalonamiento luego de un cepillado al diamante

En el presente ejemplo se observa que los modelos de escalonamiento para pavimentos de hormigón sin barras después de un cepillado se ajustan notablemente en sus predicciones a las del modelo agregado. El modelo de predicción derivado sin cambio de variables para CESAL calza por completo con los resultados del modelo agregado, no así el modelo derivado con cambio de variables para CESAL que predice deterioros levemente menores a los calculados por el modelo agregado, con diferencias crecientes entre los pronósticos de uno y otro a medida que pasa el tiempo y que pueden llegar a valores cercanos a los 0.025 in/mi en una evaluación que considere la vida útil de un pavimento de 30 años.

El comportamiento observado en el ejemplo es muy similar al que se da en todos los modelos incrementales de

segunda fase desarrollados en el presente estudio, con la salvedad que en ciertos modelos el deterioro del modelo incremental derivado con cambio de variables para CESAL es levemente inferior que el agregado y en otros es algo superior.

La diferencia entre los resultados de los modelos agregado e incremental (derivado con cambio de variables para CESAL) se puede explicar porque el cambio de variables de los ejes equivalentes (ec. 2), para derivarlos simplificadaamente 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 [de Solminihac 97c].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El principal logro obtenido de la investigación en que se basa este paper es el desarrollo de los primeros Modelos de Deterioro Incrementales de Segunda Fase para Pavimentos de Hormigón simple con juntas y reforzado con juntas, lo cual representa una importante innovación en el marco de los modelos de deterioro que sirven a la Gestión de Pavimentos. Se presentan una serie de modelos alternativos, que entregan una posibilidad nueva y diferente a la que existe de enfrentar la predicción de deterioros en pavimentos de hormigón, estos son los *modelos de deterioro incrementales* que cuentan con importantes ventajas, sobre todo para el caso de evaluación de pavimentos en servicio, pues tal como ya se ha indicado en numerosas oportunidades, no requieren de antecedentes históricos para realizar la predicción.

Además, otras conclusiones que se pueden obtener del desarrollo de modelos incrementales de segunda fase son:

- La base teórica del desarrollo de modelos incrementales mediante diferenciación de modelos agregados existentes se encuentra en los modelos desarrollados para el HDM-III [Paterson 87], formulados como incrementales ya fuera en forma directa o derivados a partir de modelos agregados ya existentes, estos son ampliamente utilizados en el mundo y con bastante éxito.
- Es posible generar modelos de deterioro incrementales de segunda fase para pavimentos de hormigón a partir de la combinación de modelos incrementales de primera fase, derivados de los agregados que reflejan los deterioros observados en la práctica, con resultados bastante confiables. Los modelos incrementales obtenidos poseen, en general, un buen ajuste respecto a sus modelos de origen.
- Los modelos incrementales formulados se encuentran en su mayoría en unidades del sistema inglés y no del

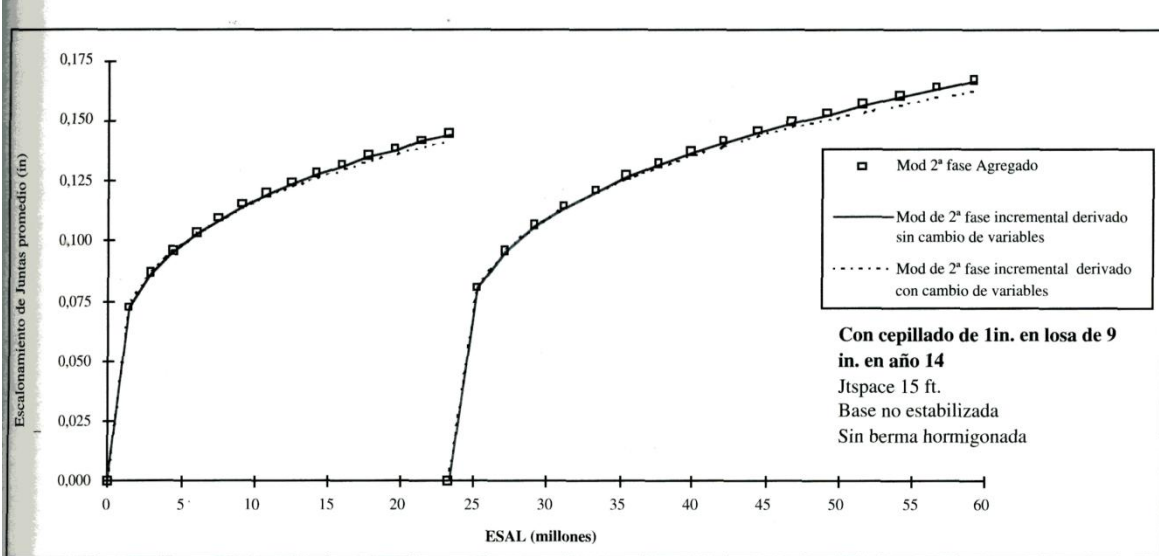


Figura 6. Modelo incremental de escalonamiento luego de un cepillado para pavimento de hormigón JPCP sin barras de traspaso de carga

sistema internacional como debería ser. Podría haberse efectuado un cambio de variables en cada ecuación para pasar de sistema inglés a internacional, pero se evitó tal posibilidad para no agregar una fuente de error extra a modelos empíricos que forman la base de los modelos incrementales propuestos.

- Si bien los resultados de modelos agregados e incrementales derivados con cambio de variables para CESAL no son exactamente iguales a los modelos derivados sin cambio de variables, ambos se pueden considerar como altamente confiables y seguros en sus predicciones futuras, pues sus diferencias con los resultados agregados son mínimas.
- En los casos en que es posible generar dos tipos de modelos, debido a la derivación con o sin cambio de variables para CESAL, la predicción de los primeros es menos ajustada que la de los segundos al modelo agregado, pero igualmente confiable, salvo para el caso de deterioro de juntas en pavimentos JPCP, en los cuales no es recomendable usar el modelo con cambio de variables, salvo que los datos con que se cuente para ello sean muy confiables.
- La selección de uno u otro tipo de modelo incremental de segunda fase (derivado con o sin cambio de variables para CESAL) para la proyección de escalonamientos o deterioros de juntas de pavimentos de hormigón depende principalmente de los datos con que se cuente al momento

del estudio, si se conocen algunos datos de tránsito históricos, tales como tasa de crecimiento del tránsito y ejes equivalentes del primer año se recomienda utilizar los modelos derivados sin cambio de variables para CESAL, que entregan resultados muy ajustados a los de los modelos agregados. Si no se conoce ningún antecedente histórico se recomienda utilizar los modelos derivados sin cambio de variables para CESAL, que entregan resultados igualmente confiables.

Por otra parte, se recomienda utilizar los modelos de deterioro de segunda fase propuestos en la tesis que inspira al presente trabajo [Vidal 98] como un complemento de los modelos de deterioro existentes hasta la fecha, para aplicarlos cada vez que las circunstancias lo requieran. Además se recomienda continuar con el estudio de estos modelos incrementales (y de otros de primera fase que actualmente están en desarrollo en una investigación paralela [Bustos 98]), a fin de considerar la factibilidad de integrarlos como aporte a una nueva versión del programa HDM 4 [FICEM 96].

Cabe también recomendar la utilización de los modelos incrementales en todos aquellos casos en que no haya certeza de los datos históricos del pavimento, a fin de predecir el deterioro desde el momento de la evaluación en adelante.

Finalmente, con el objetivo continuar con el desarrollo de modelos de deterioro de segunda fase para pavimentos de hormigón es altamente recomendable que se lleve a cabo seguimientos al comportamiento de pavimentos de hormigón en servicio (principalmente restaurados o recapados) y recolecciones de datos de los mismos, con el

objetivo de dar forma a bases de datos que permitan validar adecuadamente los modelos planteados y también de formular otros modelos empíricos de deterioro de segunda fase.

En suma, los modelos presentados en este paper y en la tesis que lo inspira [Vidal 98] son el primer paso que se da para contar con modelos incrementales de deterioro de segunda fase en pavimentos de hormigón y a partir de ellos se abre un amplio campo de posibilidades para continuar avanzando en el tema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a FONDECYT (proyecto N° 1960378) y al Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, por el apoyo técnico y económico a la presente investigación. Además, desean agradecer a los Srs. Marcelo Bustos y Andres Caroca.

REFERENCIAS

- [Bustos 98] BUSTOS, M. (1998) **Desarrollo de Ecuaciones de Deterioro para Pavimentos de Hormigón, utilizando Bases de Datos Mundiales**, tesis en preparación para optar al grado de Doctor, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- [de Solminihac 97a] DE SOLMINIHAC, H., SALSILLI, R., COVARRUBIAS, J.P., CAROCA, A., BUSTOS M. y VIDAL, M. A. (1997) **Desarrollo de ecuaciones de deterioro para pavimentos de hormigón utilizando bases de datos mundiales**, resultados primer año de trabajo proyecto FONDECYT N°1960378. Pontificia Universidad Católica-Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, Santiago.
- [de Solminihac 97b] DE SOLMINIHAC, H., CAROCA, A., SALSILLI, R., COVARRUBIAS, J.P. (1997) **A proposal of second phase performance models for jointed plain concrete pavements**, documento de trabajo proyecto FONDECYT N°1960378, Pontificia Universidad Católica, Universidad de Chile e Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, Santiago, Chile.
- [de Solminihac 97c] DE SOLMINIHAC, BUSTOS M. y VIDAL, M. A. (1997) Modelos incrementales de predicción del deterioro en pavimentos de hormigón a partir de la diferenciación de modelos agregados existentes. **Actas VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte** 10 - 14 Noviembre, Pontificia Universidad Católica y Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte, Santiago, Chile.
- [FICEM 96] Grupo de Estudio Latinoamericano, Instituto Chileno del Cemento y Hormigón (1996) **Evaluación Técnica y Económica de Pavimentos Basada en HDM (Informe Final)**. Federación Interamericana de Productores del Cemento, Santiago, Chile.
- [Freyhoffer 89] FREYHOFFER, H. y MATURANA, V. (1989) **Cálculo I**. Pontificia Universidad Católica, Facultad de Matemáticas, Santiago, Chile.
- [Lee 93] LEE, Y.-H. Y DARTER, M.I. (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 87] PATERSON, WILLIAM D.O. (1987) **Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management**. Highway Design and Maintenance Standards Series, World Bank. John Hopkins University Press, Baltimore and London.
- [Snyder 89] SNYDER, M. B., REITER, M. J., HALL, K. T. y DARTER, M. J. (1989) **Rehabilitation of Concrete Pavements, Volume I- II** Reportes N° FHWA-RD-88-071 y 072, Federal Highway Administration, Washington, D.C. USA.
- [Vidal 98] VIDAL M., M. A. (1998) **Modelos de Deterioro Incrementales de Segunda Fase para Pavimentos de Hormigón**, tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- [Wade 95] WADE, M.J., SMITH, K.D., YU, H.T., DARTER M.I. y WIENRANK C.J. (1995) **Performance of Concrete Pavements, Vol. I a IV**, Reportes N° FHWA-RD-94-177, 95-110 y 95-111 ERES Consultants Inc., Illinois, USA.
- [Watanatada 87] WATANATADA et al. (1987) **The Highway Design and Maintenance Standards Model, Vol I**. World Bank, Transportation Department, Washington D.C.

Hernán de Solminihac T., Profesor Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ricardo Salsilli M., Profesor IDIEM Universidad de Chile.

Juan Pablo Covarrubias T., Gerente General Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón.

Mariana Vidal M., Ayudante de Investigación Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad Católica de Chile.