

*Probabilistic Assessment
of Cracking in Asphalt
Pavements in Chilean Roads*

Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile



Autores

RODRÍGUEZ MORENO, M. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la construcción. Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago de Chile. CP 7820436 mrrrodrig@uc.cl

Universidad de Medellín, Colombia.
marodriguez@udem.edu.co

THENOUX ZEBALLOS, G. Pontificia Universidad Católica de Chile
gthenoux@ing.puc.cl

GONZÁLEZ VACCAREZZA, A. Universidad del Desarrollo, Chile
aagonzalez@ingenieros.udd.cl

Fecha de recepción 27/12/2012

Fecha de aceptación 1/8/2013

Código interno RDLC 0092

Resumen

Los modelos de comportamiento permiten predecir la condición de deterioro de un pavimento y el desarrollo de programas de mantenimiento. Normalmente cuando se evalúa el desempeño de un pavimento a través del modelo de deterioro, el pronóstico corresponde a un valor determinista. Sin embargo, los proyectos de ingeniería de pavimentos tienen un grado de incertidumbre, lo que implica que el adecuado desempeño de la solución no puede ser totalmente asegurado. El objetivo de esta investigación es el de incorporar la probabilidad en el pronóstico del modelo de agrietamiento estructural, para lo cual se utilizó el modelo de iniciación y progresión del agrietamiento

del programa HDM-4 bajo diferentes escenarios, definidos según la ubicación geográfica, tránsito y capacidad estructural de carreteras chilenas. Para incorporar la probabilidad en el modelo de comportamiento, se desarrolló un simulador que reproduce el deterioro para un ciclo de veinticinco años de vida, en el cual las variables descriptivas del modelo de comportamiento se representan como variables aleatorias gracias a datos recolectados en terreno. La investigación entrega como resultado una serie de funciones de densidad de probabilidad que representan la respuesta probabilística del modelo de deterioro de catorce grupos de rutas chilenas.

Palabras clave: Grietas estructurales, modelos de desempeño, ciclo de vida, pavimentos flexibles, evaluación probabilística.

Abstract

Deterioration models allow predicting pavement condition and the development of maintenance programs. Normally, when evaluating pavement performance through model deterioration, the forecast given is a determinist value. However, pavement engineering projects have a degree of uncertainty. This implies that an adequate performance of the engineering solution cannot be absolutely guaranteed. The aim of this research is to incorporate probability in the output of a structural cracking model. To achieve this objective the model of crack initiation and progression of HDM-4 was used several scenarios defined based on geographic location, type of traffic and

structural capacity of Chilean roads. To incorporate probability in the structural cracking models, a simulation model that reproduced the deterioration due to cracking for a lifecycle of 25 years was developed, based on random variables input. With the set of outputs of the simulation, probability density functions that represent the probabilistic response of the deterioration model were developed. These probability density functions represent the cracking initiation and cracking progression of all structural cracks and wide cracks of 14 groups of Chilean roads. Although the research was carried out using Chilean data, the methodology presented could be applied to other states or countries.

Keywords: *Structural cracking, performance model, lifecycle, probabilistic assessment, asphalt pavements.*

Introducción

Los modelos de comportamiento son base fundamental de la gestión de caminos ya que permiten pronosticar el deterioro del pavimento, establecer la programación de las intervenciones, además de brindar herramientas para la recomendación de la técnica de mantenimiento. Todo con el fin de garantizar que el pavimento mantenga los indicadores de serviciabilidad exigidos por la agencia administradora y para que la infraestructura perdure el tiempo que se estimó en el diseño. También permiten programar la asignación de recursos requeridos para la realización de los diferentes programas de mantenimiento, lo cual se ve reflejado en la programación del flujo de caja de la agencia vial y la valoración del costo final del camino.

Los modelos de comportamiento corresponden a expresiones matemáticas y pueden ser mecanicistas-empíricos si la condición del pavimento se relaciona con el estado de tensiones y deformaciones de las capas utilizando los fundamentos del análisis estructural, o empíricos relacionando el estado del pavimento con variables como tránsito y clima. Ambos tipos de modelos pueden desarrollarse utilizando enfoques Bayesianos (Hong *et al.*, 2006), regresiones Clusterwise (Luo Zairen *et al.*, 2006), modelos estocásticos (Hong *et al.*, 2003), redes neuronales (Shekharan, 2000; Arliansyash *et al.*, 2004) o cadenas de Markov (Yang *et al.*, 2005), entre otros.

Dentro de los modelos de deterioro empíricos más utilizados para el análisis de pavimentos se encuentran los desarrollados por el programa *The Highway Development and Management Tool* HDM IV versión 2.08, que son modelos incrementales que evalúan la condición de deterioro de un pavimento y cuya respuesta es representada por un valor determinista para el año analizado.

Según (Sánchez-Silva *et al.*, 2005), el diseño y mantenimiento óptimo de pavimentos requieren de una exacta predicción de su proceso de deterioro, el cual es altamente influenciado por la incertidumbre en las cargas del tránsito, las condiciones ambientales, las propiedades mecánicas de los materiales, su desempeño estructural y por los procesos constructivos. De esta manera, los problemas de ingeniería están rodeados por condiciones de incertidumbre, por lo que satisfacer un adecuado desempeño de la solución, no puede ser garantizado de forma absoluta. Para garantizar entonces el adecuado comportamiento de un diseño, este debe ser analizado en términos de la probabilidad de éxito por satisfacer el criterio de desempeño (Achintya *et al.*, 2000).

Esta investigación tiene por objetivo incorporar la probabilidad en la respuesta del modelo de agrietamiento estructural. Para lo cual se utilizó el modelo de iniciación y

progresión del agrietamiento del programa HDM-4, mediante el desarrollo de una herramienta de simulación, que permitió evaluar la probabilidad de ocurrencia del agrietamiento para un periodo de tiempo establecido.

Modelos de agrietamiento de pavimentos asfálticos

En la literatura se encuentran diferentes modelos que tratan de predecir la forma en que evoluciona el deterioro por agrietamiento de un pavimento, según (Gao *et al.*, 2012) los distintos tipos de modelos pueden clasificarse en dos enfoques, uno trata de predecir el tiempo que transcurre hasta que el área agrietada alcanza un umbral determinado y el segundo intenta predecir la progresión del agrietamiento en función de una expresión que reúne un conjunto de variables explicativas. Queiroz (1981) y Paterson (1987), desarrollaron cada uno un modelo para la iniciación del agrietamiento y otro para la progresión, en donde el modelo de iniciación seguía el primer enfoque y el modelo de progresión el segundo.

Una variación del primer enfoque son los llamados modelos de sobrevivencia, que incorporan en el análisis el efecto de la edad y la variabilidad inherente en el desempeño de los materiales, los cuales han sido utilizados por Shin *et al.*, (2003) y Nakat *et al.*, (2008).

Varios investigadores han usado el segundo enfoque en conjunto con la base de datos LTPP (Long-Term Pavement Performance Program), como es el caso de Ker *et al.*, (2008) que desarrollaron un modelo lineal generalizado en el que se involucró esfuerzos de tensión crítica bajo la capa superficial de concreto asfáltico como una de las variables explicativas. Rahim *et al.*, (2008) desarrollaron un modelo de regresión para diferentes tipos de clima usando el porcentaje total de área agrietada como la variable de respuesta. Otros investigadores como Wang *et al.* (2005) sostienen que cuando se trabaja con la base de datos del LTPP, es más conveniente utilizar el primer enfoque ya que la información que se suministra allí presenta una gran variabilidad, por lo cual sugieren adoptar modelos de sobrevivencia que usan el tiempo de falla como variable respuesta.

El modelo de deterioro por agrietamiento del MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), inicialmente desarrollado por el Instituto del Asfalto (Ker *et al.*, 2008), es representado en términos del índice de daño (D_i) que es un parámetro mecanicista que representa la relación que hay entre la carga y el daño dentro de una estructura de pavimento. El índice de daño se acumula para cada periodo de análisis basado

en la hipótesis de Miner, el daño acumulado es convertido en agrietamiento usando modelos calibrados que relacionan el daño calculado con el deterioro observado. Dentro de las variables explicativas que utiliza el modelo se encuentra: espesor de la capa, esfuerzo de tensión crítico, rigidez de la mezcla asfáltica, porcentaje de vacíos, contenido efectivo de cemento asfáltico, además de la interacción de factores medioambientales como la humedad y la temperatura. En general el modelo MEPDG requiere de grandes esfuerzos para su validación y calibración con el objeto de mejorar su precisión ya que de la base de datos inicial del LTPP solo una pequeña fracción de esta pudo ser rescatada para ser usada en su calibración (NCHRP, 2004)

Modelo de agrietamiento HDM-4

Tienen su origen a finales de la década de los sesenta y fueron desarrollados inicialmente por el Banco Mundial en conjunto con el *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL), el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) y posteriormente contó con la participación del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Los modelos desarrollados fueron complementados tras un estudio de campo realizado por el Banco Mundial en conjunto con el *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL) en Kenia, India, Brasil y países del Caribe, lo que representó para el Banco Mundial el desarrollo del programa HDM-III, que posteriormente fue actualizándose hasta la versión HDM-4 utilizada actualmente (Kerali, 2000).

Los modelos de deterioro del HDM evalúan la condición funcional y estructural de una carretera. La condición funcional evalúa las características operacionales y el estado de la superficie del pavimento en base a modelos de desgaste, baches, rugosidad y fricción. La condición estructural evalúa el nivel de la integridad física en que se encuentra la sección de un pavimento, a partir de los modelos de agrietamiento y ahuellamiento.

Desde el punto de vista estructural, el ahuellamiento y el agrietamiento son las principales formas en que falla una estructura de pavimento, causadas por la fatiga y el envejecimiento del material. El deterioro por agrietamiento se manifiesta en la capa de rodado, en donde una mayor severidad hará menos segura y confortable la circulación vehicular, se elevarán los costos de operación vehicular, los tiempos de viaje, el consumo de combustible y el deterioro del vehículo.

Esta investigación se concentró en la evaluación del modelo de agrietamiento estructural de pavimentos flexibles, cuyo modelo se divide en dos de acuerdo a la severidad del deterioro (Grietas estructurales totales con grietas de más de 1 mm de ancho y grietas estructurales anchas con grietas mayores de 3 mm de ancho).

Cada sub-modelo presenta dos fases, una de inicio y otra de progresión. El modelo de iniciación indica el tiempo transcurrido desde la puesta en servicio del pavimento hasta el inicio del agrietamiento, el cual inicia cuando el deterioro afecta más del 0.5% del área total de la superficie del pavimento. El modelo de progresión es representado mediante una curva sigmoideal (Figura 1) que se construye en forma incremental (el modelo entrega el cambio D_i en % de agrietamiento para cada año A_i) e inicia cuando lo establece el modelo de iniciación.

El incremento calculado en cada periodo de análisis del modelo de progresión (D_i) depende del área agrietada informada como dato de entrada al inicio del periodo (A_i) y del tiempo desde la iniciación del agrietamiento ($\sum A_i$). El modelo de progresión no es significativamente sensible a los efectos de carga del tránsito o la capacidad estructural del pavimento (Paterson, 1987).

Las ecuaciones que describen el modelo de deterioro se componen de variables de entrada, factores de calibración, coeficientes y parámetros, todos ellos presentes en las Ecuaciones 1 a 4. Las Ecuaciones 1 y 2 corresponden al modelo de iniciación de todas las grietas estructurales (ICA) y al modelo de iniciación de grietas anchas estructurales (ICW) respectivamente. Las Ecuaciones 3 y 4 corresponden al modelo de progresión de todas las grietas estructurales (ACA) y al modelo de progresión de grietas estructurales anchas (ACW).

$$ICA = k_{cia} * \left\{ CDS^2 * a_0 * e^{[a_1 * NE + a_2 * \left(\frac{YE4}{NE^2}\right)]} + CRT \right\} \quad (1)$$

$$ICW = k_{ciw} * \text{MAX} \{ (a_0 + a_1 * ICA), a_2 * ICA \} \quad (2)$$

$$\Delta ACA = k_{cpa} * \left(\frac{CRP}{CDS} \right) * Z_A * \left\{ (Z_A * a_0 * a_1 * \delta t_A + SCA^{a_1})^{\frac{1}{a_1}} - SCA \right\} \quad (3)$$

$$\Delta ACW = k_{cpw} * \left(\frac{CRP}{CDS} \right) * Z_W * \left\{ (Z_W * a_0 * a_1 * \delta t_W + SCW^{a_1})^{\frac{1}{a_1}} - SCW \right\} \quad (4)$$

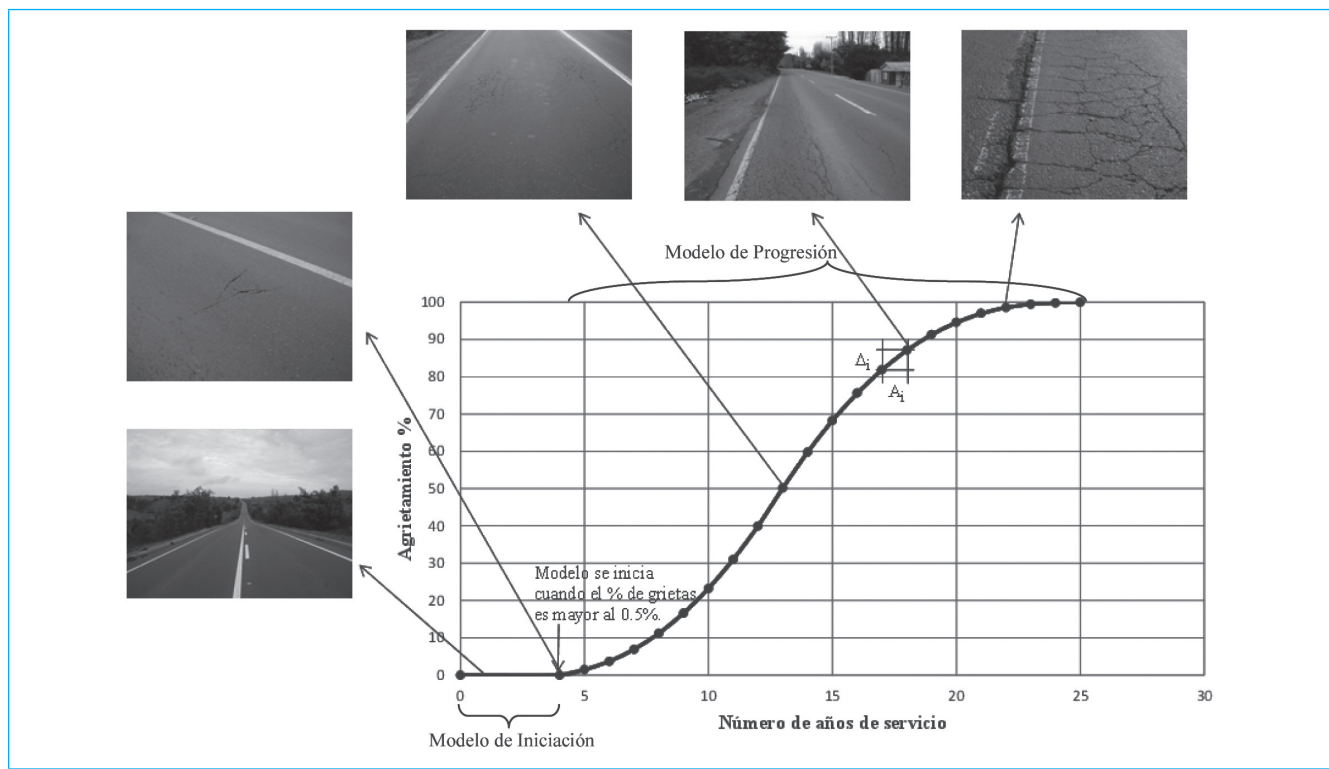
En donde:

NE (Número estructural) – **YE4** (Tránsito): Variables de entrada, provienen de información de terreno y generalmente son informados de manera determinística.

k: Factores de calibración que permiten adaptar los modelos a condiciones locales.

a: Coeficientes definidos para cada modelo de deterioro.

Figura 1 Modelo de agrietamiento de pavimentos asfálticos



CDS: Indicador de defectos de construcción para superficies en asfalto (Parámetro).

CRT: Tiempo de demora en la aparición de grietas debido al mantenimiento (En años - Parámetro).

CRP: Retraso en la progresión de grietas debido al tratamiento preventivo (Parámetro).

δt_A : Fracción del año de análisis en que la progresión de todas las grietas estructurales se aplican.

δt_{AW} : Fracción del año de análisis en que la progresión de grietas estructurales anchas se aplican.

El principal requerimiento para la utilización de los modelos de deterioro es que deben ser calibrados a condiciones locales (Huang, 1993; Jain *et al.*, 2005). Además, la calidad de los datos de entrada definen la veracidad de la información que entrega el modelo y requieren cumplir con condiciones básicas de calidad, que garanticen valores de salidas aproximados a los valores reales del deterioro.

En Chile se han realizado varios estudios para calibrarlos a nivel de red (MOP, 2010; de Solminihac *et al.*, 2003), además se cuenta con una amplia base de datos de propiedad del Ministerio de obras Públicas de Chile (MOP) en donde se lleva un registro anual de todos los parámetros de importancia de la red vial nacional.

Sin importar que el modelo de deterioro esté calibrado o de la calidad de los datos de entrada, su respuesta es determinista, entregando un valor que representa el deterioro para el periodo analizado sin evaluar la probabilidad de que este efectivamente se presente.

Metodología

Para cumplir con el objetivo de la investigación se desarrolló un modelo de simulación basado en el método de Montecarlo, con el cual se pudo evaluar probabilísticamente la respuesta del modelo de comportamiento para diferentes grupos de caminos de un diseño factorial (Tabla 1).

Cada celda del factorial fue ocupada por el mayor número de secciones de pavimento con edades lo más heterogéneas posibles, para representar diferentes edades a lo largo del ciclo de vida y por lo tanto diferente nivel de deterioro. La Figura 1, representa la expresión gráfica del modelo de agrietamiento, donde cada imagen representa un camino distinto con edad y deterioro diferente. Todas las secciones de pavimentos empleadas presentan similares características de geometría, clima,

Tabla 1 Matriz factorial del modelo de simulación

Factores a Considerar	Niveles	Clases de Niveles																								
Tipo de Capa de Rodadura	1	Concreto Asfáltico en Caliente																								
Tipo de Estructura	1	Original																								
Ubicación Geográfica	3	Norte (N), Centro (C), Sur (S)																								
Tránsito	3	Bajo (B), Medio (M), Alto (A)																								
Capacidad Estructural	3	Bajo (B), Medio (M), Alto (A)																								
	Clima	Norte						Centro						Sur												
Mezcla Asfáltica en caliente	Tránsito	Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta								
	Número estructural	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A							
Número total de caminos	68				5	6		4	4		6		7		3	3	5		2			11	2		6	4
Celdas del factorial con suficiente información para desarrollar la investigación					NTMNB	NTMNA		NTANM	NTANA		CTBNM		CTMNB		CTANB	CTANM	CTANA		STBNM			STMNM	STMNA		STANM	STANM

capacidad estructural y tránsito que permitió agruparlos dentro de una misma celda del factorial.

Cada camino se identificó con tres grupos de letras. El primer grupo está compuesto por un carácter que representa la zona geográfica a la cual pertenece el grupo de caminos, norte (N), centro (C) o sur (S). El segundo grupo representa al tipo de tránsito, el cual puede ser bajo (TB), medio (TM) o alto (TA). El tercer grupo representa el valor del número estructural como bajo (NB), medio (NM) o alto (NA). Por ejemplo, NTBNB representa un camino ubicado en el norte, con tránsito bajo y número estructural bajo.

Desarrollo de la simulación

Para elaborar el modelo de simulación se estableció un modelo conceptual bajo el cual se diseñó la simulación (Figura 2). El modelo conceptual permitió definir tres fases, las primeras dos se implementaron de forma paralela, mientras que la tercera reunió los resultados de las dos anteriores.

Fase 1: Arquitectura de la información.

Para el cálculo del número estructural se debió contar con información detallada relacionada con los espesores y tipo de material de cada una de las capas de

los caminos estudiados, además del valor del CBR de la sub-rasante, estos datos fueron suministrados por la base de datos del MOP. Posteriormente se calculó el número estructural en base a las ecuaciones 5 y 6 (Hodges *et al.*, 1975). Los valores de los coeficientes estructurales y de drenaje utilizados fueron los recomendados por Peterson (1987).

$$NE = a_{11} * D_{11} + a_{12} * D_{12} + a_{13} * D_{13} + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3 + R \quad (5)$$

$$R = (3,51 * \log CBR) - [0,85 * (\log CBR)^2] - 1,43 \quad (6)$$

En donde:

NE: Número estructural (pulgadas).

a_{ij}: Coeficiente estructural para la capa asfáltica j.

D_{ij}: Espesor de la capa asfáltica j (pulgadas).

a₂ - a₃: Coeficiente estructural para la capa de base y sub-base granular respectivamente.

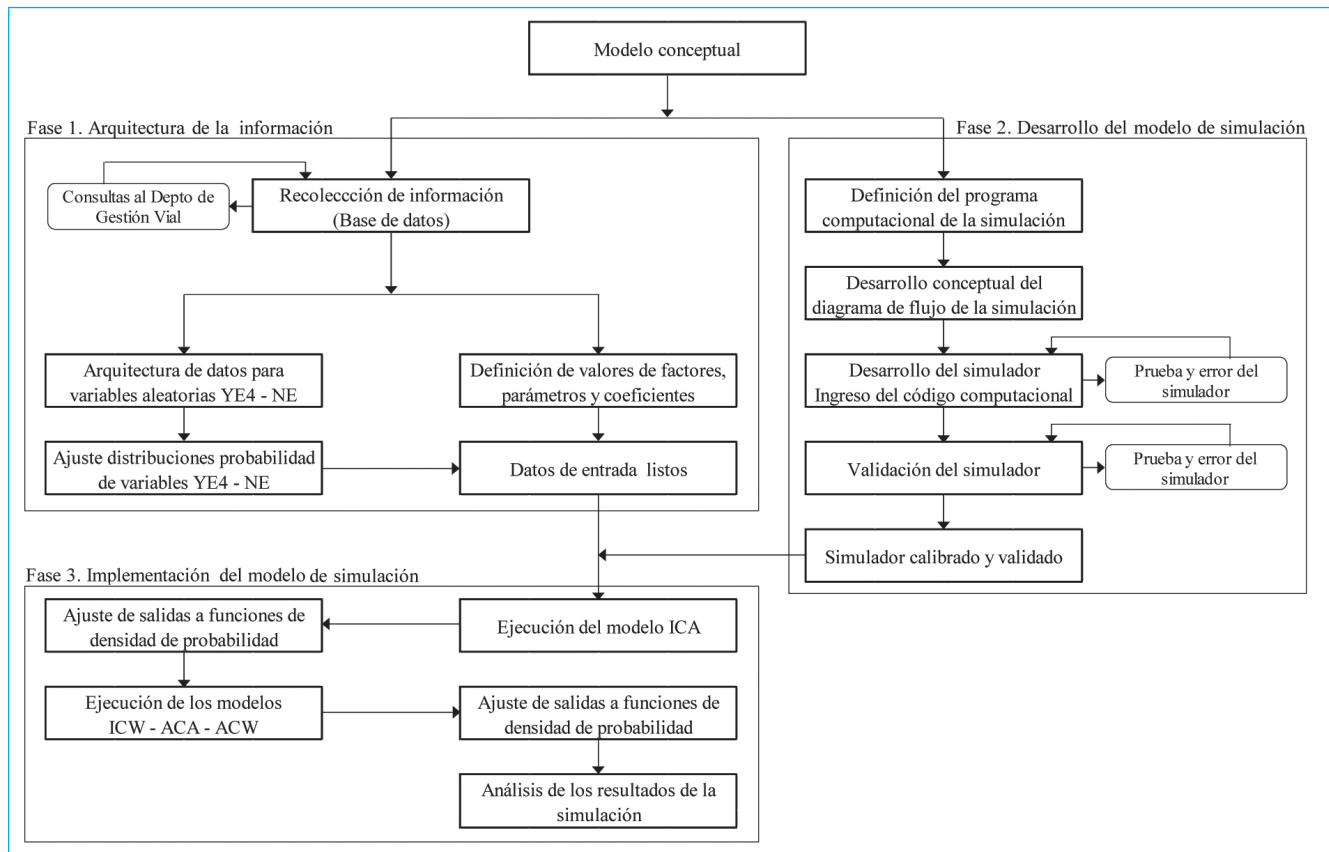
D₂ - D₃: Espesor de la capa de base y sub-base granular respectivamente (pulgadas).

m₂ - m₃: Coeficiente de drenaje de la capa de base y sub-base granular respectivamente.

R Aporte al cálculo del número estructural de la sub-rasante.

CBR: Valor de la capacidad de soporte de la sub-rasante.

Figura 2 Modelo conceptual para el desarrollo del modelo de simulación



Para el cálculo de los ejes equivalentes se realizó la proyección del tránsito a 25 años, con la información del censo vehicular contenida en la base de datos del MOP. Finalmente, se calculó el valor de los ejes equivalentes para cada camino del estudio. Los valores de las tasas de crecimiento vehicular y los factores de eje equivalente fueron valores que se utilizaron en estudios locales previos (MOP, 2010; de Solminihac *et al.*, 2003; Videla *et al.*, 1996) y fueron definidos por el MOP a partir de registros históricos (Videla *et al.*, 1996).

Las funciones de densidad de probabilidad que representaron las variables aleatorias YE4 y NE para cada celda del factorial, se obtuvieron mediante un test estadístico de bondad de ajuste que definió la función de densidad que mejor se ajustaba a los valores de YE4 y NE calculados para todas las secciones que hicieron parte de cada celda del factorial.

Fase 2: Desarrollo del modelo de simulación

En esta fase se seleccionó el programa computacional utilizado para la construcción de la simulación (ARENA

® versión 14), luego se desarrolló conceptualmente el diagrama de flujo con los módulos que integraron el modelo de simulación, para después ingresar el código computacional por medio del lenguaje del programa. La estructura principal del modelo de simulación se basó en el método de Montecarlo y consistió en elegir números aleatorios que fueron asociados a una probabilidad con la cual se estableció en las funciones de densidad de las variables de entrada los valores con los que se ejecutó el simulador. Cada salida del simulador representó una respuesta determinística del fenómeno. Este proceso se repitió un número de ciclos que fue establecido mediante la elección de un nivel de confianza para la respuesta esperada de la simulación. El conjunto de respuestas fue ajustado posteriormente a una función de densidad de probabilidad.

Esta fase finalizó con la calibración y validación del modelo de simulación. El modelo de deterioro utilizado en la simulación es aplicable a caminos construidos en pavimentos de asfalto en caliente y que no hayan sido objeto de actividades de mantenimiento que modifiquen el desarrollo normal del agrietamiento. Además,

se excluye del análisis estructuras de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente con capas granulares estabilizadas. El tiempo de simulación tomado para evaluar la estructura fue de 25 años.

Fase 3: Implementación del modelo de simulación

Con el modelo de simulación desarrollado y definidos los datos de entrada, se inició su ejecución utilizando la información establecida para cada celda del factorial, lo cual se realizó en dos etapas.

Etapa 1: Ejecución del modelo de iniciación de todas las grietas estructurales (ICA). Esta simulación se ejecutó un número de réplicas calculadas mediante la aplicación de la prueba T de Student para la definición del tamaño de una muestra con un 95% de confiabilidad (Montgomery *et al.*, 2002). El conjunto de datos que conformaron la salida de las distintas réplicas, fueron ajustados a funciones de densidad de probabilidad y se convirtió en la variable aleatoria de entrada de la segunda etapa.

Etapa 2: En esta etapa se ejecutaron de forma simultánea los modelos ICW y ACA, las salidas de cada réplica de los dos modelos se utilizaron para correr el modelo ACW. La simulación se realizó un número de veces definidas como se describió anteriormente. El conjunto de datos que conformaron la salida de las distintas réplicas de los modelos ICW, ACA y ACW, fueron ajustados a funciones de distribución de probabilidad y junto con el ajuste de los datos de salida del modelo ICA (Primera etapa), representan la evaluación probabilística del modelo de deterioro por agrietamiento.

Análisis de resultados

Después de revisada la base de datos proporcionada por el MOP, se pudo recabar información suficiente para estudiar 14 de las 27 celdas del diseño factorial inicial, lo que representó una base de datos de

68 caminos, localizados en todo el territorio chileno (Tabla 1).

Modelos de iniciación de grietas

Las respuestas de los modelos de iniciación del agrietamiento para todas las grietas estructurales ICA y grietas anchas estructurales ICW, entregan una función de densidad de probabilidad que establece el inicio probabilístico del agrietamiento en años para cada una de las celdas del factorial, representados por 14 funciones de densidad de probabilidad por tipo de modelo. Las Figuras 4 y 5 presentan una muestra de 6 respuestas (funciones de probabilidad) para estos modelos y para los mismos grupos de caminos según la identificación asignada en Tabla 1. La respuesta de los modelos está expresada en términos de densidad de probabilidad versus tiempo de iniciación en años del deterioro.

Todas las respuestas de los modelos de iniciación de todas las grietas estructurales (ICA) (Figura 4) y de los modelos iniciación de agrietamiento estructurales anchos (ICW) (Figura 5) presentan curtosis y asimetría, indicando que hay concentración de la respuesta de los modelos hacia la izquierda o la derecha. En general la mayoría de los grupos analizados presentan concentración de los datos hacia la izquierda de la media, lo que indica que hay una mayor probabilidad de que la respuesta del modelo sea mayor a este valor, además de aumentar el valor de la varianza.

Cinco grupos de caminos presentaron curtosis positiva, indicando que la distribución es más puntuda en el centro y tiene colas más largas que la normal y por tanto presenta un elevado grado de concentración de datos de salida alrededor de la moda de la variable. Los restantes nueve grupos de caminos presentaron curtosis negativa, indicando que la distribución es más plana que la normal con colas más cortas, por lo tanto presenta un reducido grado de concentración de datos de salida alrededor de la moda de la variable y una mayor variabilidad en la distribución.

Figura 4 Funciones de densidad de probabilidad que representan la respuesta del modelo de iniciación de todas las grietas estructurales ICA, para 6 grupos de caminos

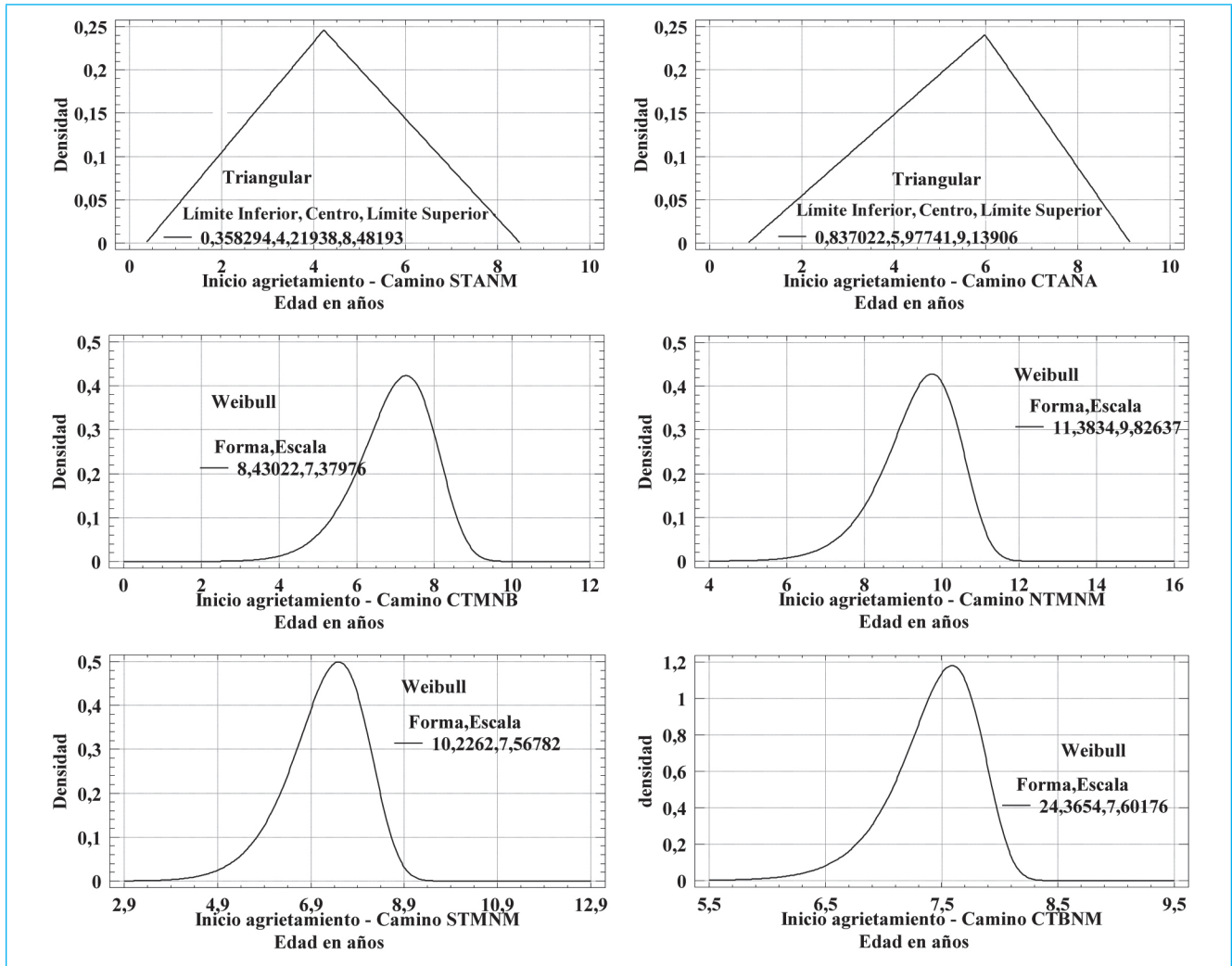
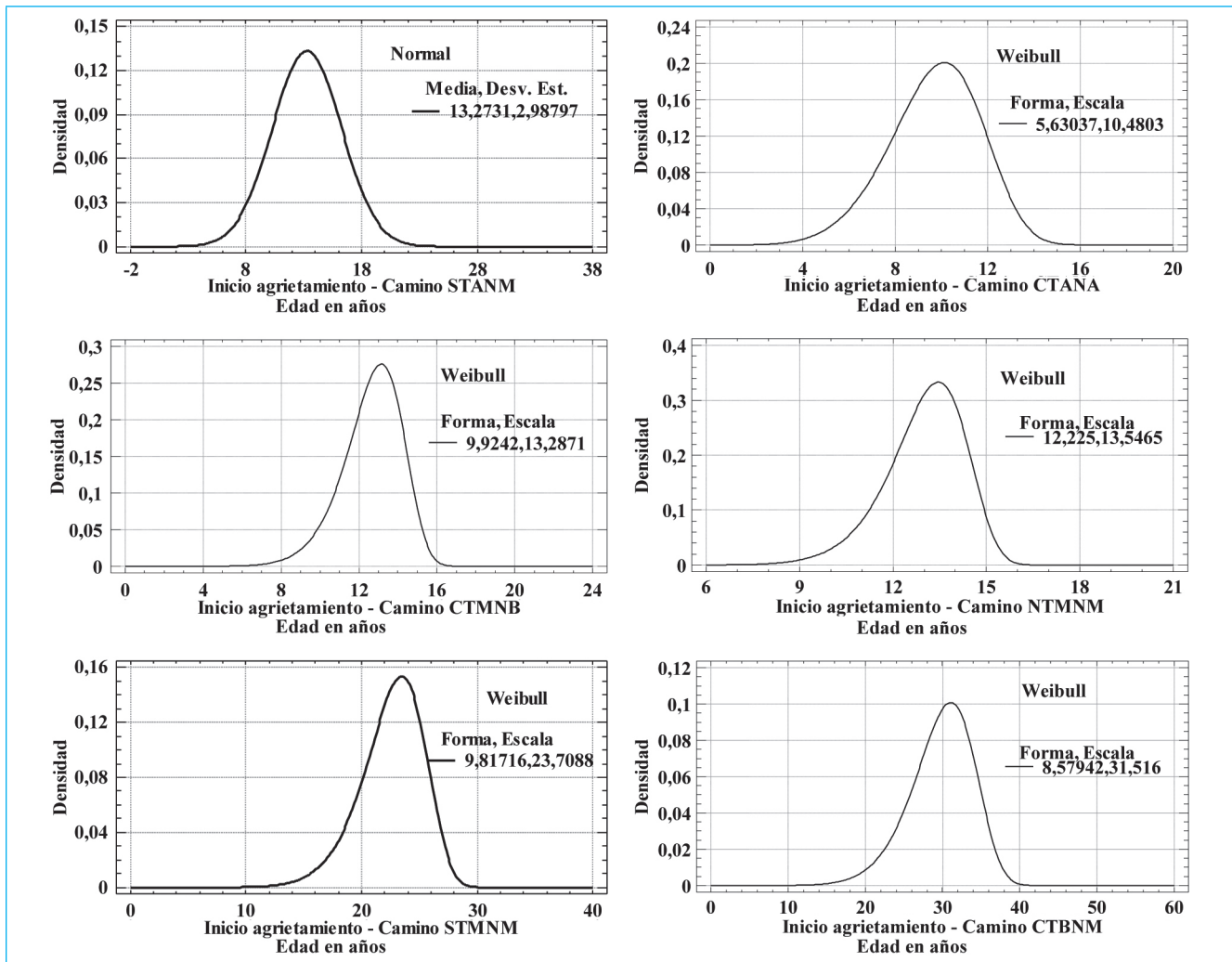


Figura 5 Función de densidad de probabilidad, que representa la respuesta del modelo de iniciación de grietas estructurales anchas ICW, para 6 grupos de caminos



Modelos de progresión de grietas

Las respuestas de los modelos progresión del agrietamiento para todas las grietas estructurales ACA y grietas anchas estructurales ACW, entregan:

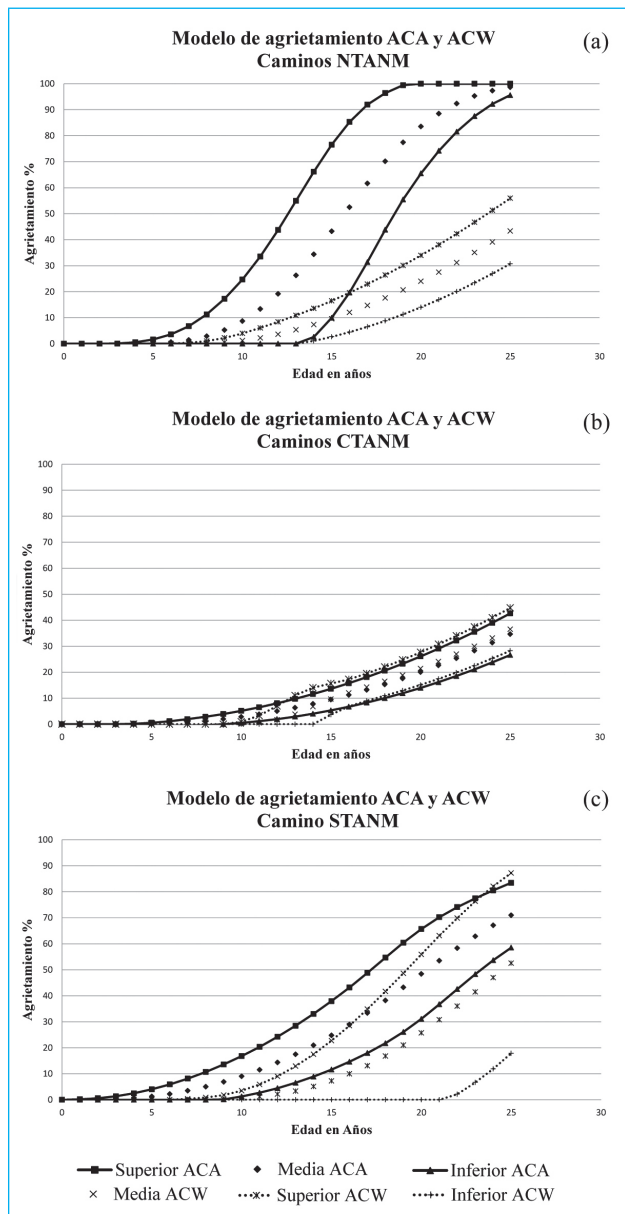
Una función de densidad de probabilidad por cada año del periodo de vida analizado, con las cuales se puede establecer el valor del agrietamiento más probable para cada año de operación de la carretera, para cada tipo de modelo y para cada una de las 14 celdas del factorial.

Una función de densidad de probabilidad de acuerdo al valor de agrietamiento elegido, en la cual se puede

establecer el tiempo (en años) o el tránsito (en ejes equivalentes) más probable para la presencia del valor propuesto de agrietamiento, para cada tipo de modelo y para cada una de las 14 celdas del factorial.

Por simplicidad en la Figura 6 se presenta los modelos de progresión del agrietamiento para un grupo de caminos. En ella se han graficado los valores máximos y mínimos del intervalo establecido con el 95% de confianza para cada año del ciclo de vida analizado. Cada gráfica presenta los modelos ACA y ACW clasificados según la región geográfica para el mismo tipo de tránsito y capacidad estructural.

Figura 6 Valores medios e intervalo de confianza del 95%, de las funciones de densidad de probabilidad, modelo de agrietamiento ACA y ACW.



Discusión en relación a los resultados encontrados

De acuerdo con las tendencias mostradas por los datos de salida de la simulación se puede decir que:

La Figura 6a muestra que para los caminos ubicados en la región norte del país, independientemente de la intensidad de tráfico y la capacidad estructural, los modelos de progresión de todo el agrietamiento es-

tructural (ACA) tienen una pendiente mayor que los modelos de progresión de grietas estructurales anchas (ACW), lo que indica que el primero tiene una tasa de degradación más acelerada que el segundo. En general, se encontró que los caminos de la región norte del país (Figura 6a) retrasan por más tiempo el inicio de grietas estructurales totales y grietas anchas, en comparación con carreteras ubicadas en las regiones del centro y sur del país. Además, el modelo predice mayor presencia de grietas angostas (< 3 mm) que de grietas anchas (> 3 mm). Finalmente se presenta mayores porcentajes de deterioro al final del ciclo de vida, en comparación con las carreteras ubicadas en otras partes del país. El menor porcentaje de grietas angostas puede explicarse por la ausencia de lluvias que aceleran la severidad del deterioro. Su ausencia se explica debido a que el clima en el norte de Chile es uno de los más secos del mundo. El mayor porcentaje de deterioro al final del ciclo de vida puede ser explicado por la exposición a los altos índices de radiación que se encuentra en esa zona, lo que podría acelerar el envejecimiento de asfalto a causa de la oxidación.

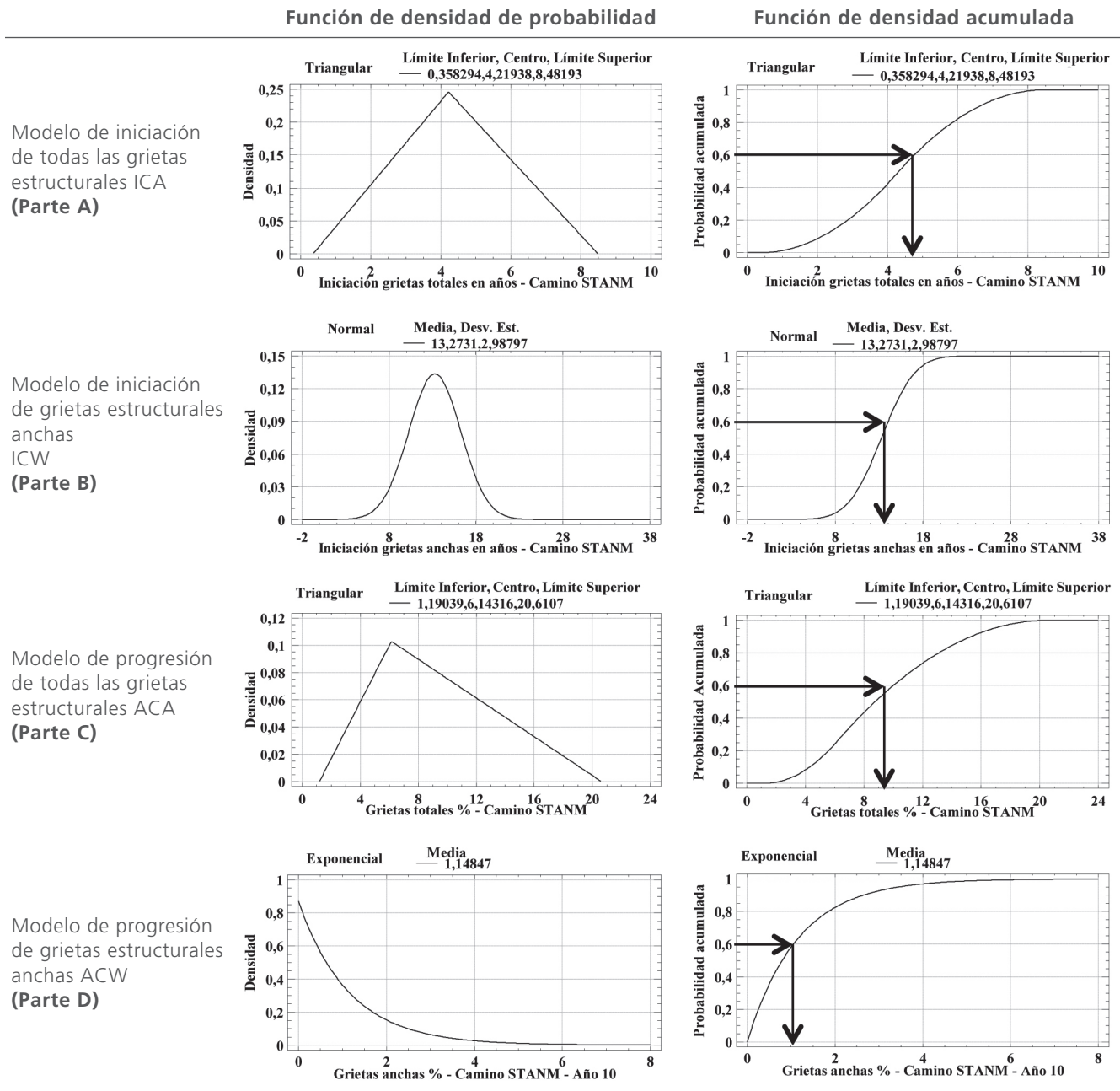
Las carreteras de la región central presentan los más bajos valores de deterioro al final del ciclo de vida en comparación con las carreteras ubicadas en otras regiones, observándose la formación de grietas en porcentajes de alrededor del 50% de la superficie del pavimento (Figuras 6a, 6b, 6c), lo que puede reflejar un sobredimensionamiento del diseño de las estructuras para esta región. Un factor que podría explicar la baja tasa de deterioro es el bajo nivel de lluvias y el hecho de que la mayor parte de la población chilena vive en esta zona, por lo cual mayores controles sobre los procesos de diseño, construcción y mantenimiento son tomados en cuenta por las autoridades que administran la red vial, además de mayores controles sobre el peso legal de los ejes vehiculares.

Las carreteras de la región sur presentan los valores más altos de grietas anchas en comparación con carreteras ubicadas en otras áreas geográficas. Esto podría deberse al tránsito de camiones que transportan madera a fábricas de procesamiento como reflejo de la intensa explotación de bosques en esta parte del país, además es probable que un número sustancial de camiones exceden el límite de peso bruto legal. Finalmente, esta zona posee el más alto nivel de precipitación en el país, lo que aumenta la tasa de deterioro y otorga un corto tiempo a la transición de las grietas angostas a grietas anchas.

Estudio de caso

Para ilustrar el uso de los modelos probabilísticos desarrollados en esta investigación, se describe aquí su aplicación dentro de un estudio de caso.

Figura 7 Gráficos de funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada para los modelos ICA, ICW, ACA y ACW del camino NTANM



Una agencia vial quiere realizar un pronóstico del deterioro del pavimento de una red de carreteras ubicada en el sur de Chile, que cuenta con tránsito alto y número estructural medio, es decir caminos del tipo SHTMS (Figura 4 y 5). La Agencia desea saber con un 60% de probabilidad en qué año el agrietamiento ancho estructural (ICW) iniciaría, con el fin de programar la aplicación de un tratamiento de sello sobre la superficie. Además, la agencia desea conocer el valor del área agrietada en el décimo año de servicio de la red, con el fin de hacer comparaciones con los valores máximos aceptados (15%), así como evaluar las alternativas de mantenimiento y establecer el correspondiente flujo de caja, también con el 60% de probabilidad.

Si se observa en detalle la parte A de la Figura 7, se puede deducir del gráfico de probabilidad acumulada que con 60% de probabilidad, la iniciación de todo el agrietamiento estructural comenzará en 4,76 años desde que se pone en servicio el pavimento de la red. Para el décimo año de servicio un 10% de la superficie del pavimento de la red estará agrietado. Por último, analizando la parte D se establece que en el décimo año de servicio el porcentaje de área con grietas anchas será del 1%, con una probabilidad del 60%. Con los datos anteriores, la Agencia vial podrá programar y definir acciones con mejores criterios y establecer el flujo de efectivo para la inversión con mayor certeza.

Conclusiones

Este artículo desarrolló un modelo probabilístico de agrietamiento de pavimentos flexibles basado en los modelos de comportamiento de HDM-4, utilizando datos de campo provenientes de una base de datos de carreteras chilenas de propiedad del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

La investigación entrega expresiones que predicen el agrietamiento usando funciones de densidad de pro-

babilidad, dependiendo de la gravedad del deterioro y para redes homogéneas de carreteras clasificadas por ubicación geográfica, tipo de tránsito y capacidad estructural.

El modelo desarrollado permite establecer el año de iniciación del agrietamiento, así como el porcentaje de área afectada en cualquier año del ciclo de vida de un pavimento asfáltico a nivel de red, dependiendo de la severidad del daño y para cualquier probabilidad de ocurrencia. Su uso debe ser aplicado a análisis de estrategia en el programa HDM-4.

La investigación también entrega expresiones que permiten estimar el momento a lo largo del ciclo de vida expresado en años o en ejes equivalente en el que se alcanza un valor de deterioro, dependiendo de su severidad y para cualquier probabilidad de ocurrencia.

La metodología presentada en este estudio debe ser incorporada en análisis de riesgos en el diseño estructural de pavimentos y puede ser replicada en cualquier latitud, pero sus resultados específicos solo son aplicables a las condiciones de caminos en Chile, esto como una consecuencia de la utilización de la bases de datos y de los modelos de comportamiento calibrados a la condición local.

Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS, la Universidad de Medellín en Colombia y al Ministerio de Obras Públicas de Chile el apoyo para el desarrollo de la investigación. Al Dr. Tomás Echaveguren por su contribución y comentarios. Al Dr. Hernán de Solminihac por su respaldo y consejo al inicio de esta investigación.

Referencias

- Achintya, H. y Sankaran, M. (2000). *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Arliansyash J., Maruyama T. y Takahashi O. (2004). A Pavement Deterioration Model Using Radial Basis Function Neural Networks. *Journal Materials, Conc. Struct. Pavement*, 753 (62), 165-177.
- de Solminihac, H., Hidalgo, P. y Salgado, M. (2003). Calibration of performance models for surface treatment to Chilean conditions: the HDM-4 case. *Journal of the Transportation Research Board*, 2 (1819) 285-293.
- Gao, L., Aguiar-Moya J. P., y Zhang, Z. (2012). Bayesian Analysis of Heterogeneity in Modeling of Pavement Fatigue Cracking. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26 (1), 37- 43.
- Hodges, J. W., J. Rolt y Jones, T.E. (1975). The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Road Deterioration, TRRL Laboratory Report 673. *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
- Hong, F. y Prozzi, J. (2006). Estimation of Pavement Performance Deterioration Using Bayesian Approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 12 (2), 77-86.
- Hong, H. P. y Wang, S. S. (2003). Stochastic Modeling of Pavement Performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 4 (4), 235-243.
- Huang Y. (1993). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Prentice Hall.
- Jain, S., Aggarwal, S. y Parida, M. (2005). HDM-4 Pavement Deterioration Models for Indian National Highway Network. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (8), 623-631.
- Ker, H. W., Lee, Y. H. y Wu, P. H. (2008). Development of Fatigue Cracking Prediction Models Using Long-Term Pavement Performance Database. *Journal of Transportation Engineering*, 134 (11), 477-482.
- Kerali, H. (2000). Highway Development and Management, Overview of HDM-4. *World Road Association*. Francia.
- MOP (2010) Ministerio de Obras Públicas de Chile. Estudio Básico Seguimiento de Pavimentos Asfálticos. *Ministerio de Obras Públicas*. Santiago, Chile.
- Nakat, Z. S. y Madanat, S. M. (2008). Stochastic Duration Modeling of Pavement Overlay Crack Initiation. *Journal of Infrastructure Systems*, 14 (3), 185-192.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) & ARA Inc (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design: Of New and Rehabilitated Pavement Structures: Final Report. NCHRP. Washington D.C.
- Paterson, W.D. O. (1987). Road Deterioration and Maintenance Effects Models for Planning and Management. *John Hopkins University Press*. Baltimore.
- Queiroz, C. A. V. (1981). *Performance prediction models for pavement management in Brazil*. Ph.D. thesis. University of Texas at Austin, Austin.
- Rahim, A. M., Fiegel, G. y Ghuzlan, K. (2009). Evaluation of fatigue (alligator) cracking in the LTPP SPS-6 experiment. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2 (1) 26-32.
- Sánchez-Silva, M., Arroyo, O., Junca, M., Caro, S. y Caicedo, B. (2005). Reliability Based Design Optimization of Asphalt Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 6 (4), 281-294.
- Shekharan, A. (2000). Solution of Pavement Deterioration Equations by Genetic Algorithms. *Journal of the Transportation Research Board*, (1699), 101-106.
- Shin, H. C., y Madanat, S. (2003). Development of a Stochastic Model of Pavement Distress Initiation. *Journal of Infrastructure Planning and Management*. (744), 61-67.
- Videla, C., de Solminihac, H., Gaete, R. y Bustos, M. (1996). Ajuste de Factores de Calibración para Ampliar Modelos de Deterioro de Pavimentos asfálticos. *Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile*. Santiago, Chile.
- Wang, Y. H., Mahboub, K. C. y Hancher, D. E. (2005). Survival Analysis of Fatigue Cracking for Flexible Pavements Based on Long-Term Pavement Performance Data. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (8), 608-616.
- Yang, J., Gunaratne, M., Lu, J. y Dietrich, B. (2005). Use of Recurrent Markov Chains for Modeling the Crack Performance of Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (11), 861-872.
- Luo, Z. y Chou, E. Y. J. (2006). Pavement condition prediction using Clusterwise regression. *Journal of the Transportation Research Board*, (1974), 70-77.