

Probabilistic assessment of asphalt pavement design

Determinación probabilística del tiempo de servicio de estructuras de pavimentos

M. Rodríguez ^{1*}, G. Thenoux ^{**}, Á. González ^{***}

* Universidad de Medellín, Medellín. COLOMBIA

** Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. CHILE

*** Universidad del Desarrollo, Santiago. CHILE

Fecha de Recepción: 08/03/2016

Fecha de Aceptación: 21/06/2016

PAG 83-90

Abstract

In Chile, as in many South American countries, AASHTO-93 is the current official method for the design of asphalt pavements. The method gives an estimated number of 80 kN standard axle loads (W_{18}) that the pavement can withstand for a certain serviceability. A safety factor is then applied to W_{18} to take into account the confidence level and the estimated variance of the inputs used in the method, whereby the magnitude of the structure's life cycle is estimated. Normally, data used in the AASHTO-93 method are assumed to be deterministic, disregarding their random nature. This paper presents a probabilistic assessment of the AASHTO-93 pavement design method under Chilean conditions, which provides a set of probability density functions (PDFs) that allow a probabilistic estimation of the pavement life cycle in terms of the value W_{18} . To achieve the goal, we developed a simulation model based on a sample of 13 groups of roads located throughout Chile.

Keywords: Pavement design, asphalt pavements, probabilistic assessment

Resumen

En Chile, como en muchos países de Suramérica, AASHTO 93 es el método oficial para el diseño de pavimentos asfálticos. El método entrega un número estimado de ejes equivalentes estándar de 80 kN que el pavimento puede soportar hasta alcanzar un cierto valor de serviciabilidad. Un factor de seguridad es luego aplicado al número estimado de ejes equivalente tomando en cuenta el nivel de confianza y la varianza estimada de los datos de entrada utilizados en el método, con lo cuál se estima la magnitud del ciclo de vida de la estructura. Normalmente, los datos utilizados en el método AASHTO 93 son asumidos como valores deterministas, sin tomar en cuenta su naturaleza aleatoria. Este trabajo presenta una evaluación probabilística del método de diseño AASHTO 93 de pavimentos bajo condiciones chilenas, el cuál proporciona un conjunto de funciones de densidad de probabilidad, que permiten realizar la estimación probabilística del ciclo de vida del pavimento en términos del valor del número de ejes equivalente. Para alcanzar el objetivo se desarrollo un modelo de simulación a partir de una muestra de 13 grupos de carreteras ubicados a largo de Chile.

Palabras clave: Diseño de pavimentos, pavimentos en asfalto, evaluación probabilística

1. Introducción

Los métodos de diseño de pavimentos se dividen en tres tipos según su enfoque; pueden ser mecanicistas, cuando se basan en la mecánica de materiales; empíricos, cuando se fundamentan en el desarrollo de pruebas y ensayos de campo, o empírico mecanicista, cuando adquieren el concepto teórico desde la mecánica de materiales y lo complementan con las experiencias de ensayos de campo (FHWA, 2006).

Todos los métodos de diseño deben incorporar la confiabilidad como una manera de proteger el diseño frente a la incertidumbre en la definición de las cargas del tránsito, condiciones ambientales, evolución del deterioro, propiedades mecánicas y desempeño estructural de los materiales (AASHTO, 1993); así como de la calidad en los procesos constructivos (Sánchez-Silva et al., 2005).

La confiabilidad que protege el diseño de la incertidumbre de estos aspectos, es definida durante la etapa de diseño del pavimento, entendiéndose por confiabilidad a "la probabilidad de que una sección de pavimento diseñado

usando dicho proceso se desempeñe satisfactoriamente bajo condiciones ambientales y de tráfico durante el periodo de vida" (AASHTO, 1993).

Actualmente en Chile se utiliza el método de diseño AASHTO-93 (MOP, 2012). Este método asume la confiabilidad del diseño a partir del establecimiento de un nivel de confianza (R) que define el nivel de varianza que se adopta en el diseño (Z_R) y de un valor que abarca la varianza estimada de cada uno de los factores utilizados en la predicción del modelo (S_0) (Huang, 1993).

Los datos de entrada y salida del modelo, son establecidos de forma determinista, pero debe recordarse que los proyectos de ingeniería de pavimentos poseen un grado de incertidumbre en el diseño, la construcción y la operación. Lo que implica que un adecuado desempeño de la solución no puede ser garantizado de forma absoluta, sino en términos de la probabilidad de éxito por satisfacer el criterio de desempeño (Achintya y Sankaran, 2000), en este caso el número de ejes estándar equivalentes de 80 kN que definen el tiempo de servicio del pavimento.

Esta investigación tiene por objetivo incorporar la probabilidad en la estimación del ciclo de vida de una estructura de pavimento. Para lo cuál desarrollo una herramienta de simulación, que permitió evaluar la probabilidad que tienen las carreteras chilenas clasificadas según su ubicación geográfica, capacidad estructural y

¹ Autor de Correspondencia:

Profesor Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia
E-mail: marodriguez@udem.edu.co



tránsito, de alcanzar el tiempo de servicio expresado en términos del número de ejes simples equivalentes de 80 kN.

2. Métodos de diseño estructural

Los métodos de diseño estructural de pavimentos permiten dimensionar el espesor de las capas que conforman el pavimento y que soportan la acción de las cargas vehiculares y las condiciones climáticas durante el ciclo de vida, garantizando el cumplimiento de los umbrales de serviciabilidad previamente establecidos. Los métodos de diseño se dividen en tres tipos dependiendo de su enfoque:

- Los métodos mecanicistas, evalúan la respuesta del pavimento a través de esfuerzos de compresión, tensión y deformaciones (Tighe et al., 2007), relacionando el comportamiento estructural con el desempeño ante cargas vehiculares y la influencia del medio ambiente (FHWA 2006).
- Los métodos empíricos se basan en los resultados experimentales y son representados a través de relaciones matemáticas desarrolladas a partir de la información recolectada en campo (Carvalho y Schwartz, 2006). El método AASHTO es probablemente el método de diseño empírico de mayor difusión y el más ampliamente utilizado no solo en Estados Unidos si no también a nivel mundial (Abaza y Abu-Eisheh, 2003).
- Los métodos empírico-mecanicista establecen una relación entre la respuesta del pavimento en base a la mecánica de materiales, cuando son sometidos a cargas de tránsito y condiciones climáticas, con el desempeño del pavimento a través de modelos de deterioro empírico (Carvalho et al., 2006), en donde el método MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) es uno de los más representativos.

Independiente del método de diseño que se elija para dimensionar la estructura, se debe tener en cuenta la variabilidad de los datos de entrada y de salida del modelo, además de la aleatoriedad presente en los procesos constructivos y las condiciones climáticas a las cuales estará sometida la estructura de pavimento.

2.1 Método de diseño AASHTO-93

El método de diseño AASHTO-93 esta basado en

algoritmos desarrollados en la prueba AASHTO, finalizada en mayo de 1692 y que fue modificada en las guías de diseño publicadas en julio de 1986 (Baus et al., 1989) y de 1993. La fórmula diseño, está representada por la Fórmula 1.

$$\text{Log}(W_{18}) = Z_R * S_o + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{P_i - P_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 * \log(M_R) - 8,07 \quad (1)$$

En donde:

- W_{18} : Predicción de número de aplicaciones de ejes estándar equivalentes de 80 kN de carga (ESAL).
- Z_R : Desviación estándar normal asociada con la confiabilidad del diseño, R.
- S_o : Error estándar combinado.
- P_i : Índice de serviciabilidad inicial.
- P_f : Índice de serviciabilidad final.
- SN : Número estructural (en pul).
- M_R : Módulo resiliente efectivo del suelo de sub-rasante (en Mpa).

Todos los factores que intervienen en la Fórmula 1 presentan algún grado de incertidumbre. Pero además existen otras situaciones que están por fuera del dominio de la técnica de diseño y que también presentan variabilidad como son: el proceso constructivo, la condición climática de la zona del proyecto y la aplicación de carga sobre la estructura. Todas ellas afectando el adecuado desempeño del pavimento a lo largo del ciclo de vida.

La forma como se toma en cuenta en el método de diseño AASHTO-93 la variabilidad de sus factores, esta basada en el método de probabilidad (Lemer y Moavenzadeh, 1971). Este método valora la confiabilidad del diseño a partir del establecimiento de un nivel de confianza (R) que define el nivel de varianza que se adopta en el diseño (Z_R) y de un valor que abarca la varianza estimada para cada uno de los factores utilizados en el modelo de predicción (S_o) (Huang, 1993).

Para el caso de Chile, los valores de R, Z_R y S_o , son recomendados por la guía de diseño (MOP, 2012), pero en general son definidos en base a la experiencia y al buen juicio del diseñador, lo que puede llevar a riesgos de sobre o sub-dimensionamiento de la estructura, dependiendo de los valores que sean adoptados por el diseñador (Figura 1a).

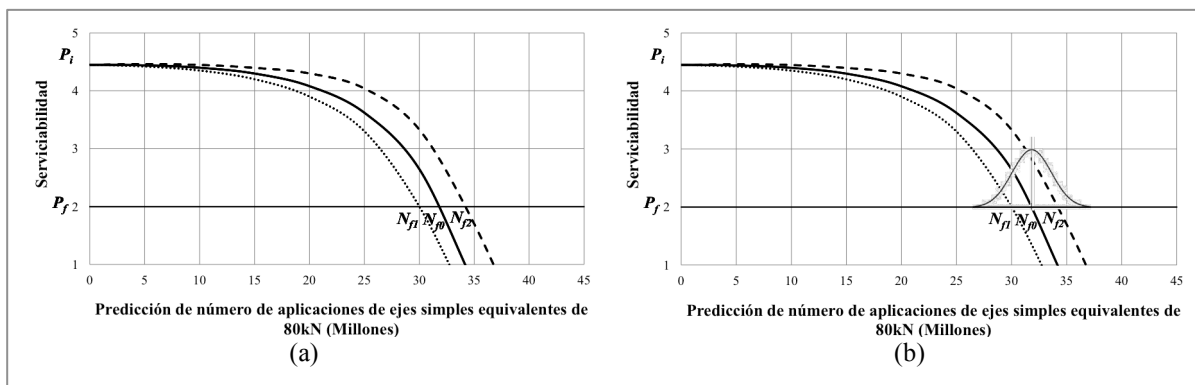


Figura 1. Serviciabilidad de pavimentos asfálticos vs duración del ciclo de vida (P_i = serviciabilidad inicial, P_f = serviciabilidad final, N_{i1} = W_{18} para un diseñador conservativo, N_{i2} = W_{18} para un diseñador menos conservativo, N_{i0} = número real de W_{18})

Los datos de entrada utilizados en la fórmula de diseño son definidos de acuerdo a un análisis desarrollado sobre la información recolectada en campo, en el que se tramifica el corredor para acotar el diseño. De esta manera los datos de entrada y por lo tanto los de salida de la fórmula de diseño se establecen de forma determinista, y solo se aplica un factor de seguridad en base a los parámetros R , Z_R y S_o , para salvaguardar el diseño de las fuentes de variabilidad.

La confiabilidad en el método AASHTO-93 es definida como “la probabilidad de que una sección de pavimento diseñada usando dicho método se desempeñe satisfactoriamente bajo las condiciones del tránsito y del medio ambiente durante el periodo de diseño” (AASHTO, 1993), de acuerdo a lo anterior, el establecimiento del tiempo de servicio o ciclo de vida, es más apropiado analizarse bajo hipótesis probabilísticas, como lo representa la Figura 1b, lo que es posible de realizar si se consideran los datos de entrada como variables aleatorias, pudiéndose obtener como resultado una variable de salida igualmente aleatoria, que representa el ciclo de vida del pavimento, expresándolo en términos de número de ejes equivalentes de 80 kN.

3. Metodología

Para cumplir con el objetivo de la investigación se desarrolló un modelo de simulación (Figura 2), basado en el método de Montecarlo con el cuál se pudo evaluar en forma reiterada la respuesta del método de diseño AASHTO-93 para distintos grupos de caminos, cuando sus variables de entrada fueron representadas como funciones de densidad de probabilidad.

Para definir los datos de entrada del método de diseño, se utilizó información proveniente de datos de terreno de carreteras ubicadas en el territorio nacional de Chile, las cuales contaban más 10 años de servicio.

3.1 Diseño factorial utilizado en la simulación

El diseño factorial de la simulación, consideró tres factores: ubicación geográfica, tránsito y capacidad estructural del pavimento definida por el número estructural. Cada factor fue se dividió a su vez en tres niveles, lo que genero un factorial con 27 celdas (Figura 3).

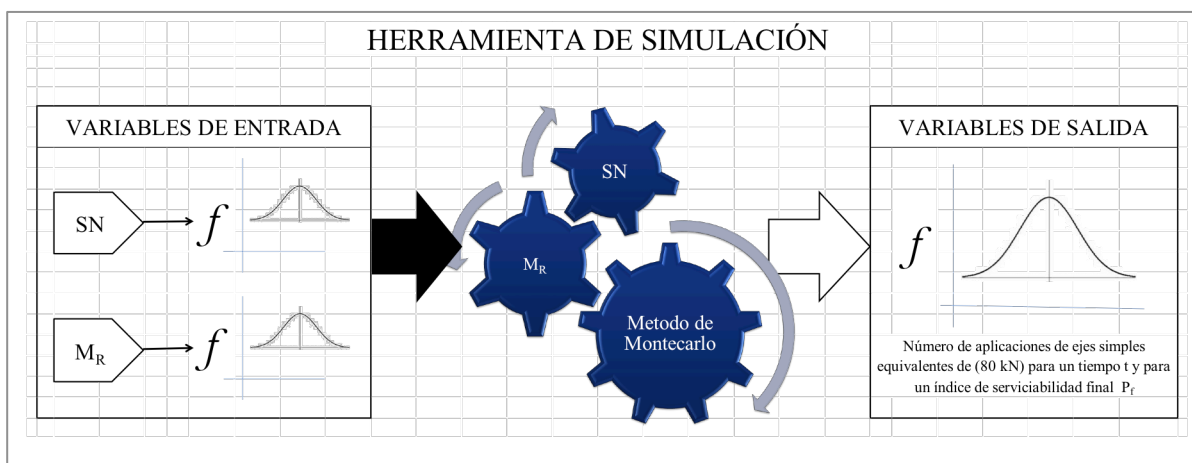


Figura 2. Ejecución del modelo de simulación

ANÁLISIS FACTORIAL DE LA INVESTIGACION																												
Factores a considerar	Niveles	Clase de nivel																										
Ubicación Geográfica	3	Norte (N), Centro (C), Sur (S)																										
Tránsito	3	Bajo, Medio, Alto																										
Tipo de Estructura	1	Concreto Asfáltico																										
Capacidad Estructural	3	Baja, Media, Alta																										
Mezcla Asfáltica en Caliente	Ubicación Geográfica	Norte						Centro						Sur														
	Tránsito	Baja	Media	Alta	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	B	M	A	B	M	A			
Número de celda del factorial		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Figura 3. Matriz factorial del modelo de simulación

Se buscó que cada celda fuera ocupada por el mayor número de estructuras de pavimento asfáltico, para la cuál se tomo en cuenta que las carreteras tuvieran características similares de geometría, clima, capacidad estructural y tránsito que permitieran agruparlas dentro de una misma celda del factorial.

Cada camino se dividió en unidades de muestreo de 20 m de longitud. Las unidades de muestreo que fueron consideradas en la investigación se eligieron aleatoriamente y su número final se definió de tal manera que se restringiera la presencia de sesgo en la información.

Cada celda se identificó con tres grupos de letras. El primer grupo está compuesto por un carácter que representa la zona geográfica a la cuál pertenece el camino, norte (N), centro (C) o sur (S). El segundo grupo representa al tipo de

tránsito, el cuál 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, NTBNTB representa los caminos ubicados en el norte, con tránsito bajo y número estructural bajo.

3.2 Desarrollo de la simulación

Para elaborar el modelo de simulación se debió establecer como primera medida el modelo conceptual bajo el cuál se diseñó la simulación (Figura 4). El modelo conceptual se dividió en tres fases, las fases 1 y 2 fueron desarrolladas paralelamente, mientras que la fase final 3 reunió los resultados de las dos fases anteriores.

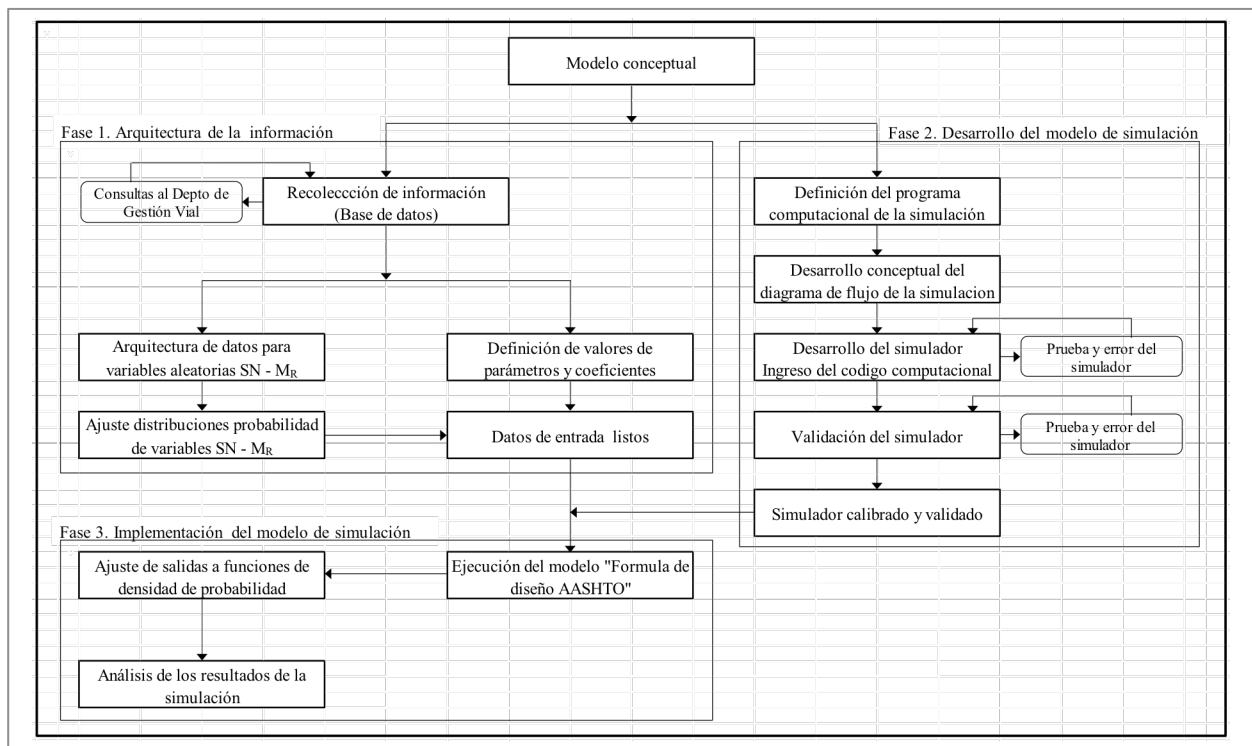


Figura 4. Modelo conceptual para el desarrollo del modelo de simulación

3.2.1 Fase 1: Arquitectura de la información (Datos de entrada)

Las variables aleatorias de entrada fueron el Número Estructural SN (pul) y el Modulo Resiliente de la subrasante M_R (Mpa).

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 las secciones de

caminos estudiados, además del valor del CBR de la subrasante, estos datos fueron obtenidos desde la base de datos del Ministerio de Obras Publicas de Chile (MOP). Posteriormente se calculó el número estructural en base a la Fórmula 2 (Huang, 1993) y la Fórmula 3 (Hodges et al., 1975). Los valores de los coeficientes estructurales y de drenaje utilizados fueron los recomendados por el MOP (2012).

$$SN = a_{11} * D_{11} + a_{12} * D_{12} + a_{13} * D_{13} + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3 + R \quad (2)$$

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

En donde:

- **SN:** Número estructural (Pul).
- **a_j:** Coeficiente estructural para la capa asfáltica j.
- **D_{ij}:** Espesor de la capa asfáltica j (Pul).
- **a₂:** Coeficiente estructural para la capa de base granular.
- **D₂:** Espesor de la capa de base granular (Pul).
- **m₂:** Coeficiente de drenaje de la capa de base granular.
- **a₃:** Coeficiente estructural para la capa de sub-base granular.
- **D₃:** Espesor de la capa de sub-base granular (Pul).
- **m₃:** Coeficiente de drenaje de la capa de sub-base granular.
- **R** Aporte al cálculo del número estructural de la sub-rasante.
- **CBR:** Valor de la capacidad de soporte de la sub-rasante.

La función de densidad de probabilidad que representó la variable aleatoria SN para cada celda del factorial, se obtuvo al encontrar la función de densidad de probabilidad que mejor se ajustó a los valores de número estructural calculados para todas las secciones que hicieron parte de cada celda del factorial, mediante el uso de un software estadístico.

El Modulo Resiliente de la subrasante se calculó en base al valor del CBR de cada estructura de pavimento que hizo parte de cada celda del factorial, información que provino de la base de datos del MOP. Para su cálculo se utilizaron las Fórmulas 4 y 5 (MOP, 2012).

$$M_R = 17,6 * (CBR)^{0,64} \quad \text{Para } CBR < 12\% \quad (4)$$

$$M_R = 22,1 * (CBR)^{0,55} \quad \text{Para } 12 < CBR < 80\% \quad (5)$$

En donde:

- **M_R:** Modulo Resiliente de la subrasante (Mpa).
- **CBR:** Capacidad de soporte de la subrasante (California bearing Ratio).

La función de densidad de probabilidad que representó la variable aleatoria M_R para cada celda del factorial, se obtuvo al encontrar la función de densidad de probabilidad que mejor se ajustó a los valores de M_R calculados para todas las secciones que hicieron parte de cada celda del factorial, mediante el uso de un software estadístico.

3.2.2 Fase 2: Desarrollo del modelo de simulación

En esta fase se seleccionó el programa computacional utilizado para la construcción de la simulación, luego se desarrolló conceptualmente el diagrama de flujo con los módulos que integraron el modelo de simulación, para después ingresar el código computacional a cada módulo por medio del lenguaje del programa.

La estructura principal del modelo de simulación se baso en el método de Montecarlo, que permite evaluar el riesgo o la confiabilidad de sistemas complejos en ingeniería utilizando números aleatorios asociados a funciones de densidad de probabilidad, y que permite determinar la

probabilidad conjunta cuando se incorporan más de dos variables aleatorias en un problema como sucede en este caso (Stewart, 2004).

El método Montecarlo consiste en elegir números aleatorios que son asociados a una probabilidad. Con esta probabilidad se establece en las funciones de densidad de las variables de entrada los valores de la variable con los que se ejecuta el simulador. La salida del simulador representa una respuesta determinística del fenómeno. Este proceso se repite un número ciclos que es establecido mediante la elección de un nivel de confianza para la respuesta que quiere del simulador. El conjunto de salidas es ajustado posteriormente a una función de densidad de probabilidad que mejor representa las respuestas del modelo a través de un test estadístico. Esta fase finalizó con la calibración y validación del modelo de simulación.

3.2.3 Fase 3: Implementación del modelo de simulación

Con el modelo de simulación desarrollado y definidos los datos de entrada (Variables aleatorias SN y M_R), se inició la ejecución del simulador utilizando los datos de entrada establecidos para cada celda del factorial.

Para establecer el valor del número de ejes equivalentes de 80 kN que podría resistir la estructura según la formula de diseño, en esta etapa de la simulación no se tomaron en cuenta los valores para los factores R, Z_R y S_o, es decir, se utilizó la expresión básica de la formula AASHTO.

La simulación se ejecutó un cierto 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. El conjunto de datos que conforman la salida de las distintas réplicas, fueron ajustados a funciones de densidad de probabilidad y se convirtió en la variable aleatoria que representa la evaluación probabilística del pronóstico de la duración del ciclo de vida de un pavimento expresado en términos de ejes estándar equivalentes de 80 kN según la formula de diseño AASHTO-93.

4. Análisis de resultados

Después de revisada la base de datos proporcionada por el MOP, sólo se pudo obtener información suficiente para estudiar 13 de las 27 celdas del factorial inicial, lo que represento una base de datos de 66 caminos, localizados en todo el territorio chileno (Figura 5).

4.1 Respuesta del modelo de simulación

La respuesta del modelo entrega una función de densidad de probabilidad que establece el pronóstico de ejes estándar equivalentes de 80 kN que representa el tiempo de servicio, para cada grupo de caminos que hicieron parte de la matriz factorial, lo que representa 13 funciones de densidad de probabilidad (Figura 6).

La Figura 7 presentan una muestra de 6 de las 13 respuestas (funciones de probabilidad) para la formula de diseño de la AASHTO para los diferentes grupos de caminos estudiados.

ANÁLISIS FACTORIAL DE LA INVESTIGACION																																
Factores a considerar		Niveles			Clase de nivel																											
Ubicación Geográfica		3			Norte (N), Centro (C), Sur (S)																											
Tránsito		3			Bajo, Medio, Alto																											
Tipo de Estructura		1			Concreto Asfáltico																											
Capacidad Estructural		3			Baja, Media, Alta																											
Mezcla Asfáltica en Caliente		Ubicación Geográfica			Norte						Centro						Sur															
		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	B	M	A							
Número de celda del factorial				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
								NTMNM	NTMNA			NTANM	NTANA			CTBNM	CTMNB			CTANB	CTANM	CTANA					STMNM	STMNA			STANM	STANA

Figura 5. Matriz factorial del modelo de simulación efectivamente utilizada en la investigación

Celda Matriz Factorial	Función de densidad de probabilidad para Número de Ejes Simples Equivalentes de 80 kN			
	Tipo Distribucion	Parametros		
CTANB	Lognormal	Media = 69,7699	Test estadístico	0,0364401
		Desviación estandar = 94,8976	P-Value	0,14089
NTANM	Gamma	Forma = 4,86458	Test estadístico	0,0167036
		Escala = 0,0148237	P-Value	0,943211
CTANM	Birbaum Saunders	Forma = 0,778663	Test estadístico	0,0355872
		Escala = 763,602	P-Value	0,159299
STANM	Birbaum Saunders	Forma = 0,812225	Test estadístico	0,0649037
		Escala = 56,3605	P-Value	0,00044235
NTANA	Uniforme	límite inferior = 197,399	Test estadístico	0,0686546
		límite superior = 354,651	P-Value	0,00016258
CTANA	Birbaum Saunders	Forma = 0,619581	Test estadístico	0,0163219
		Escala = 834,228	P-Value	0,95895
STANA	Birbaum Saunders	Forma = 1,15576	Test estadístico	0,0479565
		Escala = 178,289	P-Value	0,0202035
CTMNB	Weibull	Forma = 0,929701	Test estadístico	0,0288578
		Escala = 247,143	P-Value	0,38009
NTMNM	Weibull	Forma = 5,52287	Test estadístico	0,0299494
		Escala = 273,967	P-Value	0,333976
STMNM	Birbaum Saunders	Forma = 0,845837	Test estadístico	0,0471903
		Escala = 96,5518	P-Value	0,0233712
NTMNA	Weibull	Forma = 0,634069	Test estadístico	0,015737
		Escala = 4210,74	P-Value	0,965585
STMNA	Birbaum Saunders	Forma = 0,245865	Test estadístico	0,0350018
		Escala = 520,727	P-Value	0,173023
CTBNM	Birbaum Saunders	Forma = 0,364578	Test estadístico	0,0188991
		Escala = 111,545	P-Value	0,867783

Figura 6. Respuesta probabilística del método de diseño AASHTO

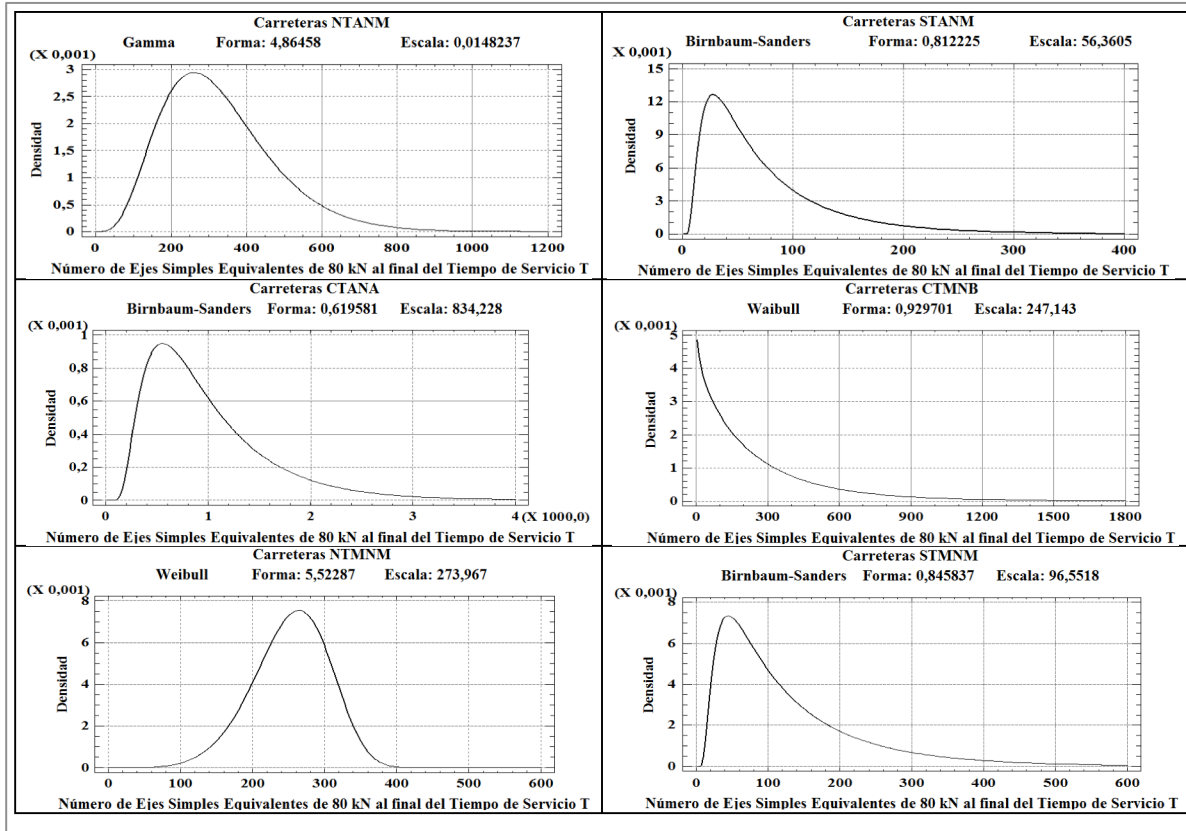


Figura 7. Funciones de densidad de probabilidad de la formula de diseño AASHTO

Finalmente la Figura 8, presenta el valor determinista promedio del número de ejes simples equivalentes de 80kN para cada celda del factorial, para su cálculo se realizó la proyección del tránsito a 25 años, con la ayuda de la información del censo vehicular contenida en la base de datos del MOP. Finalmente, se cálculo 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 (De Solminihac et al., 2003; MOP, 2010) y definidos por el MOP a partir de registros históricos (Videla et al., 1996).

Celda matriz factorial	CTANB	NTANM	CTANM	STANM	NTANA	CTANA	STANA	CTMNB	NTMNM	STMNM	NTMNA	STMNA
Número de aplicaciones de ejes simples equivalentes (80 kN) para un tiempo t	30,4	19,1	16,6	18,9	12,3	23,4	20,2	6,1	7,0	5,4	10,3	6,7

Figura 8. Funciones de densidad de probabilidad de la formula de diseño AASHTO

4.2 Discusión

En general las gráficas de densidad, presentan curtosis y asimetría, de cuyo análisis se puede decir:

Todas las respuestas del modelo son asimétricas, doce presentan asimetría positiva y una asimetría negativa, indicando que hay concentración de la respuesta del modelo hacia la izquierda o la derecha respectivamente. En general la mayoría de los grupos de caminos analizados presentan concentración de los datos hacia la izquierda de la moda, lo que indica que hay una mayor probabilidad de que la respuesta del modelo sea menor a este valor.

Once grupos de caminos presentaron curtosis positiva, indicando que la distribución es más puntuda en la moda 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. Solo un grupo de caminos presentó curtosis negativa, indicando que la función es más plana que la distribución 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.

La respuesta probabilística de método de diseño AASHTO para siete grupos del factorial son representados por funciones de probabilidad del tipo Birnbaum-Sanders, tres por Weibull y las tres restantes por Lognormal, Gamma y uniforme (Figura 6). Todas las distribuciones de probabilidad, con excepción de la uniforme, corresponden a funciones distribución de vida (life distribution), que son un modelo de probabilidad asociado a una variable de vida (Marshall y Olkin, 2007), que se caracterizan por ser asimétricas, sesgadas positivamente, que evalúan y predicen adecuadamente la vida de servicio.

La distribución Birnbaum-Saunders es conocida como una distribución de vida por fatiga, ya que describe el proceso de fatiga de materiales a través de etapas de inicio de la fisura imperceptible, seguida por su crecimiento y propagación a causa del estrés cíclico y la tensión, para finalizar en una ruptura o falla del material debido a la fatiga (Barros, Paula, Leiva, 2009), lo que refleja adecuadamente el deterioro sufrido

a lo largo del periodo de vida de una estructura de pavimento asfáltica.

Finalmente si se realiza una comparación entre los resultados probabilísticos encontrados en esta investigación y valores deterministas del número de ejes equivalentes que definen la longitud del ciclo de vida de las estructuras, se puede establecer que salvo el grupo de caminos CHTLS que tiene una probabilidad de fallar de 62% antes de llegar al número de ejes equivalentes que definen el ciclo de vida, la mayoría de las estructuras cumplirán ampliamente según el pronóstico, indicando que la mayoría de la estructuras se encuentran sobredimensionadas.

5. Conclusiones

- Este artículo desarrolló un modelo probabilístico del método de diseño AASHTO-93, usando una base de datos Chilena. La investigación presenta expresiones que predicen la duración del ciclo de vida de un pavimentos usando funciones de densidad de probabilidad para carreteras clasificadas mediante localización geográfica, tipo de tránsito y capacidad estructural.
- La metodología desarrollada en este estudio puede ser replicada en cualquier latitud, pero los resultados específicos solo son aplicables a las condiciones de carreteras chilenas, como consecuencia de la base de datos utilizada en la investigación.
- Los resultados de esta investigación poden ser usados para incorporar análisis de riesgo en el diseño de las capas de pavimentos.

Las funciones que describen el pronóstico del ciclo de vida de las estructura de pavimento en términos del número de ejes equivalentes de 80 kN, en su mayoría corresponden a distribuciones de vida, donde las funciones del tipo Birnbaum-Sanders se presentan con mayor frecuencia describiendo adecuadamente la falla por fatiga causada por fenómenos físicos.

6. Referencias

- Achintya H. y Sankaran M. (2000)**, Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design. New York: John Wiley & Sons, Inc. Cap. 5, 6, 7, 8.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)**, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. United States: (s.n.). Parte I: Cap. 1, 4. Parte II: Cap. 1, 2, 3.
- Abaza K. y Abu-Eisheh S. (2003)**, An Optimum Design Approach for Flexible Pavement. The International Journal of Pavement Engineering, 4 (1), 1-11.
- Barros M., Paula G.A. y Leiva V. (2009)**, An R implementation for generalized Birnbaum-Saunders distributions. Computational Statistics and Data Analysis, 53 (5), 1511-1528.
- Baus R. y Fogg J. (1989)**, AASHTO Flexible Pavement Design Equation Study. Journal of Transportation Engineering, 115 (5), 559-564.
- Carvalho R. y Schwartz C. (2006)**, Comparisons of Flexible Pavement Design AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical. Journal of Transportation Research Record, (1947), 167 – 174.
- 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, (1819), 285-293.
- Federal Highway Administration FHWA (2006)**, Geotechnical Aspects of Pavements. Publication No. FHWA NHI-05-037. Washington: Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. Cap. 1, 3, 5, 6.
- Hodges J. W., J. Rolt y T.E. Jones (1975)**, The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Road Deterioration, TRRL Laboratory Report 673. Crowthorne, Inglaterra: Transport Research Laboratory. Cap. 1, 2, 3, 4, 5.
- Huang Y. (1993)**, Pavement Analysis and Design. (2a ed.). New Jersey: Prentice Hall. Capítulos 10 y 11
- Lerner A. C. y Moavenzadeh F. (1971)**, Reliability of highway pavements. Highway Research Record, (362), 1-8.
- Marshall A. y Olkin I. (2007)**, Life Distributions. Structure of Nonparametric, Semiparametric, and Parametric Families. Nueva York: Springer. Cap. 1, 2.
- Ministerio de Obras Publica – MOP (2012)**, Manual de Carreteras. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas – Dirección de Vialidad. Cap. 3
- Ministerio de Obras Públicas de Chile (2010)**, Estudio Básico Seguimiento de Pavimentos Asfálticos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Sanchez-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.
- Stewart Robinson (2004)**, Simulation: The Practice of Model Development and Use. Inglaterra: John Wiley and Sons, Inc. Cap. 1, 2, 5, 6, 7.
- Tighe S., Huen K. y Haas R. (2007)**, Environmental and traffic deterioration with mechanistic empirical pavement design model. Journal of Transportation Research Record, 2 (1989), 336-343.
- Videla C., De Solminihac H., Gaete R. y Bustos M. (1996)**, Ajuste de Factores de Calibración para Ampliar Modelos de Deterioro de Pavimentos asfálticos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile.

