



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD IMPLÍCITA EN EL MÉTODO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES AASHTO-93 EN BASE A MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO

MARIO ALBERTO RODRÍGUEZ MORENO

Tesis para optar al grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

Profesor Cosupervisor:

TOMAS ECHAVEGUREN NAVARRO

Santiago de Chile, Diciembre, 2014

© 2014, Mario Alberto Rodríguez Moreno



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD IMPLÍCITA EN EL MÉTODO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES AASHTO-93 EN BASE A MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO

MARIO ALBERTO RODRÍGUEZ MORENO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

TOMAS ECHAVEGUREN NAVARRO

CARLOS VIDELA CIFUENTES

ERWIN KOHLER

ÁLVARO ANDRÉS GONZÁLEZ VACCAREZZA

PAUL GARNICA ANGUAS

CRISTIAN VIAL EDWARDS

Para completar las exigencias del grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre, 2014

*A Dios por permitirme vivir esta experiencia.
A mis Padres quienes siempre estarán
presentes en mi mente y corazón. A mi esposa
por su amor y compañía. A mi tía y hermanos
por su permanente apoyo.*

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar el desarrollo de este trabajo de investigación es momento de agradecer a Dios por permitirme vivir esta oportunidad. A mi esposa, quien con valor y decisión asumió el reto de esta aventura y en forma permanente me brindó su amor, consejo y consuelo en los momentos difíciles de mis estudios. A mi familia, en especial a mis padres quienes facilitaron el desarrollo de esta meta formándome con responsabilidad, perseverancia y dedicación, a mi tía Judith quien junto a ellos fue pilar fundamental en mi desarrollo académico. A mis hermanos y sus familias.

El desarrollo de este trabajo investigación contó con el apoyo fundamental de personas que permanentemente brindaron su apoyo y consejo, como Don Hernán de Solminihaq Tampier quien me brindó su confianza para acceder al programa de Doctorado. A Don Guillermo Thenoux Zeballos, mi Supervisor, quien siempre me brindó un consejo que permitió la construcción de este sueño. De manera muy especial agradezco el sabio consejo, el acompañamiento y la amistad de Don Tomas Echaveguren Navarro quien desde el comienzo del desarrollo de esta investigación supo brindarme su guía para llevarlo adelante.

A todos los Profesores y personal administrativo del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, y especialmente a Edith, Mary, Selma, Sandra, Ximena, Doña Bernardita, Carolina, Don Willian, Claudio y de forma especial a Doña Lidia, les agradezco sus palabras de aliento, el abrazo de consuelo y su permanente amistad. Siempre ocuparán un lugar muy especial en mi corazón. También quiero agradecer a la Señora Fernanda Kattan y a las secretarias de la Oficina de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Señoras Debbie Meza y Danisa Herrera por toda la ayuda y colaboración que me brindaron durante mi estancia en el doctorado.

Mil gracias a todas aquellas personas que en algún momento me ofrecieron su consejo como Don Carlos Videla, Álvaro González, Erwin Kohler, Robinson Lucero, Priscila Hidalgo, Alondra Chamorro. Y a los que me brindaron su amistad Álvaro González, Mauricio Salgado, Omar Cegarra, Calos López y Carlos Marín.

Agradezco enormemente el apoyo del Ministerio de Obras de Obras Públicas de Chile y en especial de Don Juan Acevedo Córdova en el Departamento de Gestión Vial del Ministerio y APSA LTDA, sin su colaboración esta investigación no habría podido desarrollarse.

Finalmente agradecer a la Pontificia Universidad Católica de Chile, al Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación COLCIENCIAS, a la Universidad de Medellín y a la Universidad Diego Portales por el apoyo brindado durante mis estudios.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Métodos de Diseño Estructural de Pavimentos	1
1.1.1. Métodos de diseño mecanicistas.....	2
1.1.2. Métodos de diseño empíricos	3
1.1.3. Métodos de diseño empírico-mecanicista.....	4
1.2. Modelos de comportamiento estructural de pavimentos	5
1.3. Introducción a la confiabilidad en AASHTO-93.....	6
1.4. Necesidad de investigación	7
1.5. Hipótesis	8
1.6. Objetivos.....	9
1.7. Contribución de la investigación	9
1.8. Plan de trabajo	10
1.8.1. Etapa No 1: Antecedentes.....	11
1.8.2. Etapa No 2: Teoría de la confiabilidad	12
1.8.3. Etapa No 3: Simulador.....	13
1.8.4. Etapa No 4: Caso de estudio	14
1.9. Alcance de la tesis	14
1.10. Estructura de la tesis	16

2.	DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	17
	SEGÚN AASHTO-93	17
2.1.	Características generales del método AASHTO-93	17
2.2.	El concepto de serviciabilidad en AASHTO-93	20
2.3.	El concepto de confiabilidad en AASHTO-93	23
2.4.	Efecto de la variación de la confiabilidad en el tránsito y el Número Estructural - método AASHTO-93	26
2.5.	Efecto de la variación de la confiabilidad en el tránsito y el Número Estructural - método AASHTO-93	28
3.	MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	30
3.1.	Características generales	30
3.2.	Mecanismos de falla del pavimento asfáltico	32
3.3.	Modelo de rugosidad con base en el mecanismo de falla de pavimentos flexibles	34
3.4.	Modelos de deterioro	36
3.4.1.	Modelo de deterioro por agrietamiento	36
3.4.2.	Modelo de ahuellamiento	39
3.4.3.	Modelo de deterioro de rugosidad	44
3.5.	Ecuación para el cálculo de la serviciabilidad con base en el modelo de rugosidad	47
3.5.1.	Modelo matemático de AASHO	48
3.5.2.	Modelos matemáticos con base en el IRI	49
4.	INTERACCIÓN ENTRE MÉTODOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS Y MODELOS DE COMPORTAMIENTO	52
4.1.	Interacción entre método de diseño mecanicista y modelo de comportamiento empírico	52
4.1.1.	Método de diseño mecánico-empírico de pavimentos AASHTO-2008	53

4.1.2.	Interacción entre el método de diseño mecanicista y los modelos de comportamiento propuestos por Morosiuk.....	56
4.1.3.	Interacción entre el método de diseño empírico AASHTO-93 y modelos de comportamiento empíricos	57
5.	CONCEPTOS GENERALES EN RELACIÓN A LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD	59
5.1.	Conceptos generales sobre confiabilidad	59
5.2.	El diseño basado en el riesgo.....	62
5.3.	Fundamento conceptual del análisis de confiabilidad (Haldar y Mahadevan, 2000)	64
5.4.	Métodos de confiabilidad de primer orden (FOSM)	66
5.4.1.	Método avanzado de primer orden segundo momento para variables normales (Advanced First-Order Second-Moment AFOSM).....	67
5.4.2.	Método AFOSM para variables no-normales.....	71
5.5.	Aplicación de método de análisis de confiabilidad a la ingeniería de pavimentos	71
6.	METODOLOGÍA DE LA APLICACIÓN	74
6.1.	Confiabilidad aplicada a la ingeniería de pavimentos	74
6.2.	Definición de la función de desempeño	78
6.2.1.	Vida de diseño $f_R(r)$	78
6.2.2.	Vida útil $f_S(s)$	81
6.2.3.	Definición de la función de desempeño $f_Z(z)$ y estado límite de interés.....	86
6.3.	Desarrollo del análisis de confiabilidad	87
6.4.	Implementación en el método de diseño estructural	89

7. DESARROLLO DE CASO DE ESTUDIO.....	94
7.1. Alcance	94
7.2. Metodología para el desarrollo de la aplicación.....	95
7.2.1. Etapa 1 Modelo conceptual	96
7.2.2. Etapa 2 Arquitectura de la información.....	96
7.2.3. Etapa 3 Obtención de las variables aleatorias básicas	
vida de diseño $f_R(r)$ y vida útil $f_S(s)$	119
7.2.4. Etapa 4 Análisis de confiabilidad	125
7.3. Análisis de resultado del caso de estudio	132
7.3.1. Modelos de comportamiento	132
7.3.2. Modelo de vida de diseño	141
7.3.3. Análisis de confiabilidad	144
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
8.1. Conclusiones.....	147
8.2. Recomendaciones	148
BIBLIOGRAFÍA	150
ANEXOS	162
Anexo 1. Listado de caminos seleccionados.....	162
Anexo 2. Cálculo del tránsito.....	167
Anexo 3. Cálculo del número estructural	172
Anexo 4. Funciones de densidad de probabilidad que representan el	
tránsito	179
Anexo 5. Código computacional del modelo de simulación	192
Anexo 6. Funciones de densidad de probabilidad que caracterizan el	
modelo de agrietamiento.....	203
Anexo 7. Ejecución del análisis de confiabilidad	239

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1 Clasificación de algunos métodos de diseño	1
Tabla 3-1 Modelos matemáticos para el cálculo del PSI basados en el valor del IRI para pavimentos flexibles.	50
Tabla 6-1 Etapas para la generación de las variables aleatorias básicas de la vida de diseño $f_R(r)$	79
Tabla 6-2. Etapas para la generación de la función de densidad de probabilidad de la vida de útil s	83
Tabla 6-3. Valores de β_{HL} definidos según variación de la función de densidad de probabilidad de la vida de diseño f_{ss}	91
Tabla 7-1 Clasificación del clima aplicado a Chile.....	97
Tabla 7-2 Diseño factorial.....	99
Tabla 7-3 Diseño factorial definitivo del caso de estudio.....	103
Tabla 7-4 Funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable aleatoria Número Estructural NE en pulgadas	106
Tabla 7-5 Funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable.....	107
Tabla 7-6 Valores de serviciabilidad inicial y final utilizadas en el caso de estudio para ejecutar el modelo de vida de diseño.....	108
Tabla 7-7 Tasas de crecimiento para el cálculo de la variable tránsito.....	109
Tabla 7-8 Funciones de densidad de probabilidad para los años 14 y 15 que caracterizan la variable tránsito para cada nivel del factorial	110

Tabla 7-9	Funciones de densidad de probabilidad que caracterizan la deflexión (mm) del pavimento para cada celda del factorial.....	112
Tabla 7-10	Funciones de densidad de probabilidad que caracterizan el espesor (mm) de la capa de asfalto para cada celda del factorial	113
Tabla 7-11	Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de agrietamiento	115
Tabla 7-12a	Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de ahuellamiento	116
Tabla 7-12b	Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de ahuellamiento	117
Tabla 7-13	Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de rugosidad.	118
Tabla 7-14	Listado de funciones de densidad de probabilidad que describe la variable aleatoria básica vida útil fSs con $P_f = 2,0$	123
Tabla 7-15	Listado de funciones de densidad de probabilidad que describe la variable aleatoria básica vida de diseño fRr con $P_f = 2,0$	124
Tabla 7-16	Variaciones de la desviación estándar de la variable aleatoria Módulo Resiliente (M_R)	126
Tabla 7-17	Listado de funciones de densidad de probabilidad de las variables aleatorias básicas vida útil y vida de diseño..... requeridas para el análisis de confiabilidad del caso de estudio.....	127
Tabla 7-18	Valores de Z_R y S_o para caminos localizados en Chile.....	131
Tabla 7-19	Valores determinitas de los ejes equivalentes en millones por pista	143
Tabla 7-20	Análisis de confiabilidad para la condición de fdp vida de diseño original.....	145

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1-1	Metodología de Trabajo.	11
Figura 2-1	Concepto de serviciabilidad en el método de diseño AASHTO-93.	21
Figura 2-3	Variación del Número Estructural y la confiabilidad de una estructura de pavimento flexible tipo con respecto al aumento del tránsito acumulado.	27
Figura 2-4	Variación de la Serviciabilidad final y la Confiabilidad de una estructura de pavimento flexible tipo con respecto al crecimiento del tránsito.	28
Figura 3-1	Mecanismo de falla e interacción de deterioros en pavimentos flexibles.	32
Figura 3-2	Modelo de agrietamiento para pavimentos.	37
Figura 3-3	Modelo de ahuellamiento de pavimentos asfálticos.	40
Figura 3-4	Modelo de rugosidad de pavimentos asfálticos.	44
Figura 3-5	Modelo de serviciabilidad de pavimentos asfálticos.	48
Figura 5-1	Fundamentos de la evaluación del riesgo en el diseño estructural de pavimentos.	60
Figura 5-2	Concepto de estado límite en el análisis de confiabilidad aplicado al diseño estructural de pavimentos.	64
Figura 5-3	Índice de confiabilidad de Hasofer-Lind en funciones de desempeño lineal.	68

Figura 5-4	Índice de confiabilidad de Hasofer-Lind en funciones de desempeño no-lineal.	69
Figura 6-1	Concepto de sub y sobre dimensionamiento ocasionado por la variabilidad del tiempo de servicio de un pavimento definido en base PSI final.	75
Figura 6-2	Variabilidad del tiempo de servicio de un pavimento analizado con base en la serviciabilidad.	76
Figura 6-3	Concepto de confiabilidad en pavimentos	77
Figura 6-4	Diagrama de flujo para obtener la variable aleatoria básica de vida de diseño fRr.	81
Figura 6-5	Diagrama de flujo para obtener la función de densidad de probabilidad de vida de útil fSs.	85
Figura 6-6	Evaluación del valor de serviciabilidad más probable para un momento cualquier de servicio del pavimento.	86
Figura 6-8a	Modelo conceptual para la implementación práctica del análisis de confiabilidad.	92
Figura 6-8b	Modelo conceptual para la implementación práctica del análisis de confiabilidad.	93
Figura 7-1	Modelo conceptual del método desarrollado en la investigación.	95
Figura 7-2	Metodología de selección de tramos testigos	101
Figura 7-3	Modelo conceptual para el desarrollo del simulador de las variables aleatorias básicas vida útil fSs y vida de diseño fRr	119

Figura 7-5	Funciones de densidad de probabilidad que representan la respuesta del modelo de iniciación de todas las grietas estructurales ICA, para 6 grupos de caminos.	133
Figura 7-6	Función de densidad de probabilidad, que representa la respuesta del modelo de iniciación de grietas estructurales anchas ICW, para 6 grupos de caminos.	134
Figura 7-7	Valores medios e intervalo de confianza del 95%, de las funciones de densidad de probabilidad, modelo de agrietamiento ACA y ACW.	137

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD UTILIZADA EN EL DISEÑO
ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS POR MEDIO DE MODELOS DE
PREDICCIÓN DEL DETERIORO

Tesis enviada a la Dirección de Investigación y Postgrado en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

MARIO ALBERTO RODRÍGUEZ MORENO

RESUMEN

En la actualidad cuando se requiere definir la confiabilidad que se utilizará en el diseño de un pavimento, esta se asigna según recomendaciones de guías de diseño o de acuerdo al criterio del diseñador. Esta situación hace probable que cuando se evalúa la estructura la vida diseño puede verse sub o sobre dimensionada.

Adicionalmente, el valor de confiabilidad elegido se define como un valor determinista, que en el diseño se involucra como una simplificación de un análisis basado en la teoría de confiabilidad y que para efectos prácticos se configura como un factor de seguridad que minora el número de ejes equivalentes predichos por el método de diseño.

De otro lado, los modelos de comportamiento son desarrollos empíricos que se calibran en base a información tomada de campo y que gracias a ella pueden evaluar el desempeño de una estructura de pavimento en condiciones reales de clima, calidad del proceso constructivo, desempeño de los materiales, comportamiento del tránsito, etc.

Por lo tanto, la forma adecuada de enfrentar el diseño es evaluar el desempeño en términos de la probabilidad de éxito, definida como la probabilidad de que el número de repeticiones carga realmente aplicadas sobre el pavimento, no excedan el número de repeticiones de carga que puede soportar hasta alcanzar un nivel mínimo de serviciabilidad especificada y no desde una perspectiva determinista.

Debido a lo anterior, esta investigación propone un método que relaciona el diseño con los modelos de comportamiento, mediante el cual puede obtenerse valores de confiabilidad que reducen la incertidumbre de su asignación y proporcionen una estimación realista de la vida de diseño, al tomar en cuenta los modelos de comportamiento.

Para lograr este objetivo se desarrolló un modelo conceptual del método de diseño, que considerando su naturaleza aleatoria y aplicando técnicas de simulación permitieran obtener distribuciones de probabilidad que caracterizan la vida de diseño utilizando datos tomados en campo. Paralelamente, se realizó una propuesta mediante la cual fuese posible integrar los modelos de deterioro, de tal manera que pudiesen predecir la evolución de la serviciabilidad con respecto a las cargas del tránsito que circulan sobre el pavimento. De esta manera, puede estimarse la vida útil del pavimento, que se caracterizó mediante funciones de densidad de probabilidad que fueron ajustadas utilizando datos tomados en campo.

Posteriormente con las representaciones aleatorias de la vida de diseño y vida útil, y la utilización de la teoría de la confiabilidad se obtienen valores de confiabilidad que contrastan adecuadamente el diseño predicho con el desempeño esperado de un pavimento en servicio. Finalmente, la propuesta de este estudio fue evaluada mediante un caso de estudio sobre carreteras localizadas en Chile. Los modelos desarrollados definieron valores de confiabilidad para distintas categorías de caminos, clasificados por ubicación geográfica, nivel de tránsito y capacidad estructural. Además se obtuvieron representaciones probabilísticas de los distintos deterioros analizados y de la expectativa de vida de diseño por categorías clasificadas según se indicó antes.

Se concluye que la relación entre el método de diseño empírico AASHTO-93 y los modelos de comportamiento del programa HDM-4 es una herramienta válida para definir el valor de confiabilidad, que ajusta el resultado del diseño gracias a una evaluación anticipada de la evolución del camino cuando se coloca en servicio, lo que representa una menor variabilidad de la vida útil de la estructura de pavimento.

Palabras clave: Confiabilidad, diseño de pavimento, modelos de desempeño, ciclo de vida, evaluación probabilística, pavimentos asfálticos.

Miembros de la Comisión de Tesis Doctoral

Guillermo Thenoux Zeballos

Tomas Echaveguren Navarro

Carlos Videla Cifuentes

Erwin Kohler

Álvaro Andrés González Vaccarezza

Paul Garnica Anguas

Cristian Vial Edwards

Santiago, Diciembre, 2014

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

RELIABILITY DETERMINATION USED IN PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN
THROUGH DETERIORATION PREDICTION MODELS

Thesis submitted to the Office of Research and Graduate Studies in partial fulfillment of
the requirements for the Degree of Doctor in Engineering Sciences by

MARIO A. RODRÍGUEZ

ABSTRACT

Today when required to define the value of reliability to be used in the design of a pavement structure, this is assigned based on recommendations of the design guidelines or determined by the designer criteria. This situation makes it likely that when the performance of the pavement structure is evaluated, its life may be under or oversized.

Additionally, the chosen value of reliability is defined as a deterministic value, which is involved in the design as a simplification of an analysis based on reliability theory and for practical purposes is set up as a safety factor that reduce the number of axes equivalents predicted by the design method . But the proper way to address the engineering design is to evaluate the performance in terms of probability of success and not from a deterministic perspective.

Therefore, this research proposes the interaction of the pavement design method with behavior of the pavement performance models, whereby they can be obtained reliability values that reduce the variability of life pavement, integrating reliability concepts in the analysis.

To achieve this aim, a conceptual model of the design method which considered its random nature applying simulation techniques was developed, whereby probability distributions that characterizing the design life using existing databases were obtained.

Simultaneously, this research made a proposal whereby it is possible to integrate the deterioration models, so you can predict the evolution of serviceability with respect to traffic loads moving across the road. Thus, can be predicted life of the pavement, which is characterized by probability density functions which assess its variability using existing databases.

Later with random representations of the design life and service life, and the use of elements of the theory of reliability are obtained values of reliability that contrast the design properly preach with the expected performance of a pavement in service.

Finally, the proposal of this study was developed through a case application on roads located in Chile. The developed models defined reliability values for different categories of roads, classified by geographical location, level of traffic and structural capacity. Furthermore, probabilistic representations of the different deteriorations analyzed and the design life expectancy was obtained classified categories as indicated above.

It is concluded that the interaction between the empirical design method AASHTO - 93 and pavement performance models of HDM-4 software is a valid tool to define the value of reliability, which adjusts the result of design thanks to a prospective evaluation of the evolution of the road when it is placed in service, representing a lower variability of the life of the pavement structure.

Keywords: Reliability, pavement design, pavement performance models, life cycle, probabilistic assessment, asphalt pavements.

Members of the Doctoral Thesis Committee:

Guillermo Thenoux Zeballos

Tomas Echaveguren Navarro

Carlos Videla Cifuentes

Erwin Kohler

Álvaro Andrés González Vaccarezza

Paul Garnica Anguas

Cristian Vial Edwards

Santiago, Diciembre, 2014

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone el marco conceptual y la metodología bajo el cual se desarrolló la tesis. El capítulo inicia con una recapitulación general de los aspectos más importantes que motivaron el trabajo, posteriormente se presenta la necesidad de investigación, para continuar con la presentación del plan de trabajo a través de un diagrama de actividades, desarrollando una corta explicación de cada etapa y de los hitos de cumplimiento. Para finalizar, se presenta la estructura general del documento.

1.1. Métodos de Diseño Estructural de Pavimentos

Los métodos de diseño de pavimentos se denominan mecanicistas cuando se basan en la mecánica de materiales, empíricos cuando se fundan en el desarrollo de pruebas y ensayos de campo, o empírico-mecanicistas cuando el fundamento teórico se obtiene desde la mecánica de materiales y se complementan con las experiencias de ensayos de campo (FHWA, 2006).

Tabla 1-1 Clasificación de algunos métodos de diseño

ENFOQUE DEL MÉTODO	NOMBRE	REFERENCIA
Empírico	Método de diseño AASHTO-1993	AASHTO (1993)
Empírico Mecanicista	Método de diseño SHPR - LTPP	SHELL (1978)
	Método de diseño del Asphalt Institute	Asphalt Institute A.I. (1999)
	Método de diseño de la PCA 1984	Southgate & Deen (1984)
	Método de diseño AASHTO-1998 para pavimentos rígidos	AASHTO (1998)
	Método de diseño AASHTO-2008	AASHTO (2008)
	Método de diseño Sudafricano	Theyse, De Beer & Rust (1996)
	Método de diseño Francés	Corté & Goux (1996).
	Método de diseño Australiano	Austroads (2010)

La Tabla 1-1, presenta un resumen de los distintos métodos de diseño utilizados a nivel mundial, clasificados según el enfoque utilizado. Los métodos de diseño determinan la estructura del pavimento para satisfacer una vida de diseño bajo indicadores y umbrales de servicio.

1.1.1. Métodos de diseño mecanicistas

Los métodos mecanicistas describen el desempeño estructural del pavimento ante cargas vehiculares y la influencia del ambiente (FHWA 2006). Estos métodos evalúan la respuesta del pavimento a esfuerzos de compresión, tracción y corte, además de deformaciones (Tighe et al., 2007) y requieren calibrar las leyes de fatiga con el desarrollo de estudios de desempeño en campo (Maji & Das, 2008), por lo cual los métodos mecanicistas puros no existen (FHWA, 2006).

Algunas características de los métodos de diseño mecanicista son:

- Requieren gran cantidad de datos para el diseño: información detallada del tránsito, condiciones ambientales y propiedades de los materiales.
- Para realizar la simulación analítica del método requiere muchas características de las propiedades mecánicas de los materiales que deben medirse en laboratorio, como por ejemplo módulos resilientes, dinámicos y de Poisson.
- Requiere utilizar la teoría clásica de elasticidad y plasticidad para describir la respuesta del pavimento a las cargas que lo solicitan.
- Requiere de hardware y software sofisticado, capacitación del personal que participa en las distintas etapas del diseño.

1.1.2. Métodos de diseño empíricos

Los métodos empíricos se desarrollan en base a experiencias de laboratorio o de campo. Sus resultados se representan a través de relaciones matemáticas desarrolladas a partir de la información recolectada. Su limitación más importante es aplicar los resultados alcanzados bajo estas condiciones, a zonas con situaciones distintas a las consideradas en su desarrollo experimental (Carvalho et al., 2006).

El método de diseño AASHTO-93, es el método de diseño empírico de mayor difusión y más ampliamente utilizado no sólo en Estados Unidos sino también a nivel mundial (Abaza & Abu-Eisheh, 2003).

Desarrollado en base a los resultados encontrados en la prueba AASHO, que se adelantó en Ottawa, Illinois entre el 15 de Octubre de 1958 y el 30 de noviembre de 1960. Contó con 6 circuitos cada uno de dos pistas, la tangente norte fue construida en asfalto y la sur en hormigón. El tránsito vehicular se caracterizó por la circulación de una carga específica por cada pista. Los datos de las pruebas establecieron las relaciones para los diseños estructurales de pavimento en base a las cargas esperadas durante la vida útil de un pavimento, cuyos hallazgos fueron consistentes con las predicciones. La prueba AASHO sentó las bases para la evaluación analítica de las tensiones y deformaciones de vehículos en movimiento.

Algunas de las limitaciones del ensayo AASHO (FHWA, 2006) y que se reflejan en el método de diseño son:

- A nivel geotécnico: No se utilizaron sistemas de drenaje en la subrasante, que fue la misma en todas las pistas de ensayo y que además era susceptible de sufrir congelamiento. Solo se utilizó un material del tipo base y sub-base, además de algunos pocos tipos de estabilizaciones de materiales. Se utilizó un tipo de asfalto y de cemento hidráulico para la construcción de las estructuras de pavimentos.
- A nivel de diseño: Las técnicas de rehabilitación de pavimentos son empíricas y fueron incorporadas después de realizada la prueba AASHO. Presenta limitaciones

en especial para altos volúmenes de tránsito. La configuración actual de los ejes vehiculares, la presión y el tipo de llanta no corresponden a la que se utilizó en la prueba original, característica que tienen una fuerte influencia en el desempeño de la estructura, en especial para altos volúmenes de tránsito.

- Las ecuaciones del diseño fueron desarrolladas para cargas de tránsito inferiores a 2 millones de ejes equivalentes (Ali, 2005). Hoy es común realizar diseños con cargas de tránsito superiores a 50 millones de ejes equivalentes.
- Debido a la corta duración del experimento AASHO, no se evaluó el comportamiento de los materiales por la acción del clima y el envejecimiento.

1.1.3. Métodos de diseño empírico-mecanicista

Combinan las hipótesis de los métodos empírico y mecanicistas. La respuesta del pavimento medida en términos de distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ) debidos a las cargas del tránsito y a las condiciones climáticas son relacionados con el desempeño del pavimento a través de modelos de deterioro empíricos (Carvalho et al., 2006). El criterio de diseño del método se basa en el control del esfuerzo de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica que ocasiona fisuras, además de la deformación elástica en la parte superior de la capa de subrasante en donde se presenta el ahuellamiento y cuyos resultados se contrastan con el desempeño medido con equipos de ensayo acelerado del pavimento (Sánchez-Silva et al., 2005; Tighe et al., 2007).

Buscando subsanar las limitaciones de los métodos de diseño empírico, AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO) desarrolló el estudio denominado NCHRP 1-37A (NCHRP, 2004). Este proyecto tuvo por objetivo desarrollar una guía de diseño de pavimentos para Estados Unidos basada en principios Mecanicista-Empíricos, que dio origen a la guía Mecanicista-Empírica de diseño AASHTO-2008. La cual se calibró y validó utilizando la base de datos del

programa LTPP de la FHWA (Tighe et al., 2007). Las principales limitaciones del método son:

- Requiere espectros de carga para la determinación de la influencia del tránsito (FHWA, 2006), bases climáticas detalladas (Ali, 2005), modelos de deterioro calibrados (Wahr & Montenegro, 2007) y especificaciones de diseño de mezclas asfálticas para el caso de pavimentos asfálticos (Ali, 2005).
- Requiere de grandes esfuerzos para validar y calibrar el modelo de deterioro con el objeto de mejorar su precisión, ya que solo una pequeña fracción de la base de datos del LTPP pudo rescatarse para usarse en la calibración (NCHRP, 2004)

1.2. Modelos de comportamiento estructural de pavimentos

Los modelos de comportamiento corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la evolución del estado del pavimento durante su vida útil (FICEM, 1996). Su representación matemática proviene de desarrollos empíricos o mecanicistas (Solorio et al., 2004) que se implementan y calibran a través de técnicas numéricas como el enfoque Bayesiano (Hong & Prozzi, 2006), regresiones del tipo *clusterwise* (Hong & Wang, 2006), modelos estocásticos (Hong & Wang, 2003), redes neuronales (Shekharan, 2000; Arliansyah et al., 2004), cadenas de Markov (Yang, Gunaratne, Lu & Dietrich, 2005), entre otros.

La estructura de los modelos de comportamiento corresponde a dos tipos, absolutos e incrementales. Dependiendo del tipo de deterioro se acostumbra dividirlo en una etapa de inicio y otra de progresión. Cronológicamente, se clasifican en modelos de primera fase y modelos de segunda fase (de Solminihac, 2001).

Los modelos de comportamiento predicen la velocidad de cambio de deterioros tales como la fisuración, ahuellamiento y rugosidad (Bailey et al., 2006) entre otros, lo cual facilita la programación de labores de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción,

de acuerdo al nivel de deterioro alcanzado y a los estándares de serviciabilidad con los cuales se desea mantener la estructura del pavimento. Además, permiten proyectar asignaciones presupuestarias de inversión (Shahin, 1994) y facilitan la evaluación financiera de proyectos viales.

Para establecer el modelo de comportamiento de un tipo específico de deterioro, se requiere de datos de entrada que dan forma a una expresión matemática, que en términos generales puede expresarse como:

$$MD = k f(\text{Variables descriptivas}, \text{Parámetros}, \text{Constantes}) \quad 1-1$$

Dónde:

- MD: Modelos de comportamiento o modelos de deterioro (fisuración, ahuellamiento, rugosidad, etc.).
- k: Factores de calibración que permiten adaptar los modelos a condiciones locales.
- Variables descriptivas: Variables que describen el comportamiento del deterioro, generalmente cuantitativas.
- Parámetros: Son valores recomendados por el modelo de comportamiento de acuerdo a las características del camino a modelar.
- Constantes: Propias del modelo de comportamiento, constantes de calibración.

La principal consideración que se debe tener en cuenta para la implementación de los modelos de comportamiento, es que deben adaptarse a condiciones locales (Huang, 1993; Jain, Aggarwal & Parida, 2005), tales como el tránsito, clima y características de los materiales.

1.3. Introducción a la confiabilidad en AASHTO-93

Las limitaciones que posee el ensayo AASHO debieron ser cubiertas con el objetivo de que la ecuación de diseño pudiera ser utilizada en zonas diferentes a donde se desarrolló

el estudio, además de que tuviera en cuenta la variabilidad de los datos de entrada. Esto se logró mediante la incorporación en la guía de diseño de 1986 del Factor de Confiabilidad (F_R), definido por la Ecuación 1-2 (Hall y Correa, 1999).

$$\text{Log } F_R = -Z_R S_o \quad 1-2$$

El Factor de Confiabilidad F_R está asociado a un nivel de confiabilidad asumido para el diseño (R) en base a recomendaciones de la guía de diseño y al criterio del investigador; que asocia en la Distribución Normal un valor Z_R . La desviación estándar (S_o) toma en cuenta la variabilidad de los datos de entrada, especialmente lo relacionado con la estimación del tránsito de diseño y la caracterización de la subrasante. El método AASHTO-93 protege el diseño calculado de la variabilidad de los factores de diseño mediante la incorporación del Factor de Confiabilidad F_R que minora la estimación de las cargas de diseño.

1.4. Necesidad de investigación

Cualquiera que sea la metodología de diseño elegida para dimensionar una estructura de pavimento, esta no puede comprobar el desempeño de la estructura diseñada cuando se encuentra en servicio, y evaluar la influencia real que tiene la aplicación de cargas de tránsito, condiciones del clima, calidad del proceso constructivo, etc. Estos factores presentan variabilidad que afecta directamente el desempeño de un pavimento.

Como siempre habrá presencia de incertidumbre entre el comportamiento supuesto en el diseño y el real, una forma de verificar que el pavimento diseñado se desempeñe adecuadamente es por medio del seguimiento y la construcción de modelos de comportamiento, los cuales miden la evolución del desempeño bajo condiciones reales.

De acuerdo a lo anterior esta tesis propone integrar los conceptos metodológicos del diseño empírico AASHTO-93 con la estimación de los modelos de comportamiento calibrados para el agrietamiento, el ahuellamiento y la rugosidad, como una manera de reducir la incertidumbre del diseño e incorporar la Confiabilidad en el análisis de la respuesta del pavimento, medida en término de diseño y desempeño.

Al relacionar el diseño a través de la Confiabilidad con el desempeño del pavimento, también se busca reducir la posibilidad de sobre o sub-dimensionamiento del tiempo de servicio en estructuras de pavimento. Así también, se busca que los diseñadores puedan tener a su alcance una forma objetiva para definir la confiabilidad del diseño, además de brindar algunos valores recomendados para caminos localizados en Chile, clasificados por nivel de tránsito, capacidad estructural y ubicación geográfica

1.5. Hipótesis

- Se puede desarrollar una metodología para la selección de los valores Z_R y S_o basada no solo en el volumen de tránsito, si no también comparando la variabilidad implícita del actual método de diseño, con la variabilidad que se obtiene a partir de las mediciones de campo utilizadas para los modelos de deterioro.
- Los valores Z_R y S_o utilizados en la ecuación de diseño AASHTO-93 pueden ser determinados (retro-calculados) para el caso de Chile empleando la metodología desarrollada

1.6. Objetivos

Objetivo general

Encontrar los valores Z_R y S_o , a través de relacionar el método de diseño estructural de pavimento flexibles AASHTO-93 y los modelos de deterioro de los programas de seguimiento de pavimento.

Objetivos específicos

- Modelo conceptual: Desarrollar un modelo conceptual que relacione el método de diseño AASHTO-93 y los modelos de deterioro, ahuellamiento, fisuración y rugosidad.
- Desarrollo herramienta: Desarrollar una herramienta teórica que permita calcular sobre la base del modelo desarrollado (en “1”), los valores de Z_R y S_o utilizando métodos estadísticos.
- Modelo de simulación: Caracterizar mediante funciones de densidad de probabilidad la vida de diseño estimada a través del método AASHTO-93 y la vida útil a través de los modelos de deterioro.
- Proponer valores de Z_R y S_o que puedan ser utilizados en el método empírico AASHTO-93 para pavimentos en Chile.

1.7. Contribución de la investigación

Las principales contribuciones de esta investigación serán:

- Proponer un método que permita relacionar el diseño estructural AASHTO-93 con los modelos de agrietamiento, ahuellamiento y rugosidad en base a un análisis de

confiabilidad, mediante el cual se puede mejorar la estimación de la vida de diseño de un pavimento flexible.

- Caracterizar la estimación de la vida de diseño entregada por AASHTO-93 mediante funciones de densidad de probabilidad, gracias a datos tomados en campo que permiten establecer valores probabilísticos de la vida de diseño.
- Caracterizar modelos de comportamiento como agrietamiento, ahuellamiento y rugosidad mediante funciones de densidad de probabilidad, gracias a datos tomados en campo que permiten establecer valores probabilísticos del deterioro.
- Proponer valores globales de confiabilidad para caminos localizados en Chile, clasificados según su ubicación geográfica, tránsito y capacidad estructural.

1.8. Plan de trabajo

El plan de trabajo considera 4 etapas, que a su vez están conformadas por sub etapas e hitos de cumplimiento, como se esquematizan en la Figura 1-2. No se incluye en la figura las actividades de redacción de informe final, avances y defensa, las cuales se han considerado en la carta Gantt de esta investigación.

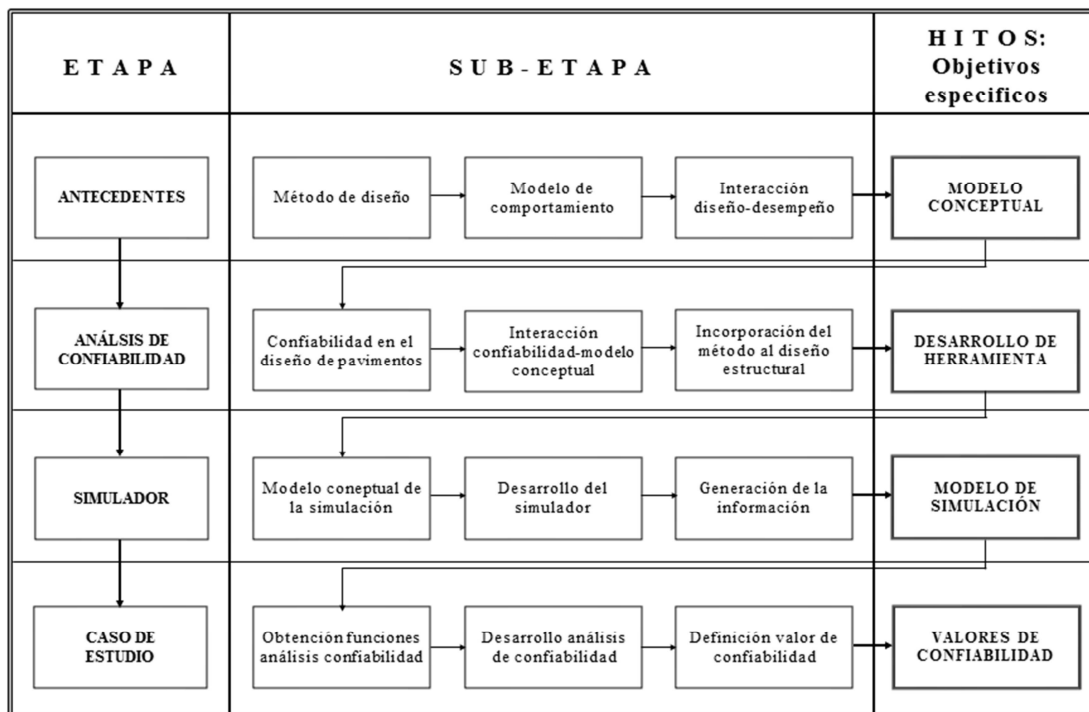


Figura 1-1 Metodología de Trabajo

1.8.1. Etapa No 1: Antecedentes

En esta etapa se definirá el fundamento teórico de la investigación, conceptualizando tres tópicos básicos del estudio: método de diseño, modelos de deterioro e interacción entre el método de diseño y los modelos de comportamiento.

Etapa 1.1: Método de diseño

Estudiará el método de diseño AASHTO-93 en relación a: origen, confiabilidad, serviciabilidad y definición del ciclo de vida. Además, se desarrollará un análisis de la variación del tránsito y los valores Z_R y S_o sobre la estimación del método.

Etapa 1.2: Modelo de comportamiento

Analizará las características generales de los modelos de agrietamiento, ahuellamiento, rugosidad y su interacción con los mecanismos de falla del pavimento flexible. Finalizará con un análisis de la función que permite calcular la serviciabilidad en base a los modelos de comportamiento.

Etapas 1.3: Interacción diseño - desempeño

Definirá conceptos teóricos que permiten desarrollar la propuesta del modelo conceptual de interacción entre el modelo de diseño y los modelos de comportamiento.

Hito No 1: Definición del modelo conceptual que permitirá relacionar el método de diseño y los modelos de comportamiento.

1.8.2. Etapa No 2: Teoría de la confiabilidad

Desarrollará una propuesta de incorporación de la Teoría de Confiabilidad en la ingeniería de pavimentos, en base a la relación entre el método de diseño AASHTO-93 y los modelos comportamiento, utilizando la simulación de Montecarlo

Etapas 2.1: Confiabilidad en el diseño de pavimentos

Definirá los conceptos de la Teoría de Confiabilidad y se discutirá la forma cómo deben implementarse en la ingeniería de pavimentos.

Etapas 2.2: Interacción confiabilidad – modelo conceptual

Desarrollará una propuesta de interacción de la Teoría de Confiabilidad con el modelo conceptual definido en la etapa 1, para evaluar el desempeño de pavimentos flexibles y calcular los valores Z_R y S_o usados en el diseño AASHTO-93.

Etapa 2.3: Aplicación al método de diseño

Discutirá metodológicamente la forma como la Teoría de Confiabilidad debe incorporarse de forma aplicada al método de diseño AASHTO-93.

Hito No 2: Método de incorporación del análisis de confiabilidad en ingeniería de pavimentos, en base al método de diseño y modelos de comportamiento.

1.8.3. Etapa No 3: Simulador

Desarrollará el modelo de simulación utilizado en la aplicación de la investigación, además de la selección de la información hasta generar la base de datos requerida por el simulador.

Etapa 3.1: Modelo conceptual

Construirá una representación simplificada del sistema real a simular, definiendo los objetivos, entradas, salidas, supuestos y simplificaciones del modelo de simulación.

Etapa 3.2: Desarrollo del simulador

Siguiendo los lineamientos del modelo conceptual, desarrollará la rutina de simulación con la ayuda del software AREANA® y Visual Basic con Aplicaciones (VBA).

Etapa 3.3: Generación de la información

Realizará un balance de la información requerida para definir las variables del análisis de confiabilidad y generar la base de datos requerida por el simulador.

Hito No 3: El hito alcanzado corresponderá al desarrollo del modelo de simulación.

1.8.4. Etapa No 4: Caso de estudio

Consistirá de las siguientes fases:

Etapa 4.1: Obtención funciones análisis de confiabilidad

Consistirá en la recopilación de salidas de la simulación y desarrollo del test de ajuste para definir las variables aleatorias básicas requeridas en el análisis de confiabilidad.

Etapa 4.2: Desarrollo análisis de confiabilidad

Obtenidas las variables aleatorias para análisis de confiabilidad se definirá el análisis de confiabilidad.

Etapa 4.3: Definición valor de confiabilidad

Las salidas del análisis de confiabilidad, definirán los valores globales de Z_R y S_o que podrán incorporarse al diseño estructural para mejorar la estimación de la vida de diseño.

Hito No 4: Este hito recogerá los resultados del análisis de confiabilidad, entregando valores globales de Z_R y S_o recomendados para carreteras chilenas.

1.9. Alcance de la tesis

La aplicación desarrollada en esta investigación hace relación únicamente con pavimentos flexible en caliente, sobre los cuales no se hayan realizado actividades de mantenimiento que hubiesen modificado el desempeño del pavimento. Sin embargo el procedimiento es extrapolable a otro tipo de pavimentos.

No se considera en el análisis estructuras con capas granulares sometidas a procesos de estabilización.

No se tomó en cuenta dentro de la base de datos la red de autopistas, ni caminos sometidos a condiciones de congelamiento.

Con el objetivo de realizar el cálculo del modelo de rugosidad descrito por Morosiuk (1996,1998, 1999), según la lógica y el mecanismo de falla propuesto por Paterson (1987), se realizaron algunas simplificaciones al modelo de rugosidad que serán utilizadas en esta investigación.

- **Deterioro por desgaste superficial:** Este deterioro no fue tomado en cuenta, en vista a que un pavimento puede verse afectado por varios tipos de deterioro, sin embargo, la jerarquía empleada por el modelo clasifica al agrietamiento por encima del desgaste superficial, debido a que el agrietamiento es considerado como un deterioro más severo que el desgaste (Paterson, 1987).
- **Deterioro por baches:** No se consideró el deterioro por baches en el cálculo del modelo de rugosidad, debido a que teóricamente este deterioro posee un umbral máximo de 10%, y cualquier valor por encima convierte el sector en una zona mal definida, invalidando la función que describe el modelo de rugosidad. Además la existencia de baches sobre la superficie de la carretera entra en oposición con los sistemas de administración de pavimentos (Pavement Management System PMS) que no aceptan su presencia. Adicionalmente, el modelo propone un valor por defecto de 20% de grietas anchas estructurales para que el modelo de baches inicie (Keraly, 2000).
- **Deterioro por grietas de borde:** Este deterioro no fue tomado en cuenta para el cálculo del modelo rugosidad, ya que considera que no se produce grietas de borde en caminos con un ancho de calzada superior a 7,5 m o que posean bermas que confinan los hombros (Keraly, 2000). Para el cálculo de la rugosidad se supuso que las carreteras que hacen parte de la investigación poseen bermas que confinan los hombros o que las calzadas son de ancho superior a 7,5 m.

1.10. Estructura de la tesis

La tesis se estructura en ocho capítulos. El primero describe el contexto del problema partiendo por los métodos de diseño estructural y los modelos de comportamiento, en base a lo cual plantea la necesidad de la investigación. Luego se expone la hipótesis, el objetivo general y específicos, además del plan de trabajo donde se describen cada una de sus etapas y finalmente el alcance de la tesis. El segundo capítulo entra en detalle en el método de diseño AASHTO-93, analiza conceptos teóricos, la forma en que enfrenta la confiabilidad, además realiza una evaluación del impacto del tránsito y los factores como la desviación estándar asociada a la confiabilidad R (Z_R) y error estándar combinado (S_o) sobre la estimación del modelo. El tercer capítulo analiza los modelos de comportamiento utilizados en la investigación, inicia con la definición del mecanismo de falla y la relación que existe entre los diferentes tipos de deterioro. Luego define las variables descriptivas, los datos de entrada y finaliza con una discusión teórica sobre la forma como puede calcularse el modelo de serviciabilidad basado en los diferentes modelos de deterioro. El cuarto capítulo describe la interacción entre los métodos de diseño y los modelos de comportamiento, además presenta algunas aplicaciones a nivel internacional. El quinto capítulo presenta un resumen de los conceptos y teorías en los que se basa el análisis de confiabilidad. El sexto capítulo presenta el modelo conceptual que soporta teóricamente el desarrollo del análisis de confiabilidad aplicado a la ingeniería de pavimentos. El séptimo capítulo hace una descripción de la metodología seguida en la aplicación desarrollada en la investigación, exponiendo la forma en que se llega a la matriz experimental, los datos de entrada, el desarrollo del simulador, hasta describir la metodología seguida para obtener las variables aleatorias básicas del análisis de confiabilidad, la función de estado límite, hasta llegar a presentar valores globales de confiabilidad clasificados de acuerdo a la ubicación geográfica, tránsito y capacidad estructural del camino. El octavo capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

2. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES SEGÚN AASHTO-93

Este capítulo describe los conceptos teóricos relacionados con el método de diseño estructural de pavimentos AASHTO-93, que ha sido adoptado en el Manual de Carreteras de Chile como guía oficial de diseño (MOP, 2014). También se presenta una descripción de cómo el método de diseño incorpora el concepto de confiabilidad, y un análisis del efecto de la variación del tránsito en el dimensionamiento de la estructura de pavimento.

Los temas abordados en este capítulo aportan a la definición del modelo conceptual que permite desarrollar la sinergia entre el método de diseño y el modelo de comportamiento. También permite caracterizar, mediante funciones de densidad de probabilidad, la vida de diseño de una estructura de pavimento flexible diseñada con el método de diseño AASHTO-93.

2.1. Características generales del método AASHTO-93

El método de diseño AASHTO-93 corresponde a un método empírico de diseño estructural de pavimentos basado en la prueba AASHO finalizada en mayo de 1962. Su primera guía de diseño fue publicada en 1961 de forma interina y posteriormente modificada por las guías de 1986 y 1993 (Hall y Correa, 1999). El método AASHTO-93 es el método de diseño empírico de mayor difusión y el más ampliamente utilizado a nivel internacional (Abaza & Abu-Eisheh, 2003).

La expresión general para pavimentos flexibles formulada durante la prueba AASHO fue simplificada utilizando ejes de carga de 80 kN (18 kips), ajustando algunos parámetros y manteniendo un módulo resiliente (M_R) de 20,7 MPa (3000 psi). La Ecuación 2-1 representa esta expresión que se encuentra dimensionada en unidades inglesas.

$$\text{Log}(W_{t18}) = 9,36 \log(NE + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{P_i - P_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(NE-1)^{5,19}}} \quad 2-1$$

Dónde:

- W_{t18} : Predicción del número de aplicaciones de ejes estándar equivalentes de 80 kN, hasta alcanzar el valor del índice de serviciabilidad final de P_f .
- P_i : Índice de serviciabilidad inicial.
- NE: Número Estructural (pulgadas) requerido para pavimentos flexibles.

Para aplicar la expresión en condiciones ambientales y de subrasante diferentes, la Ecuación 2-1 fue modificada incorporándole el módulo resiliente de la subrasante (M_R), mediante el cual se puede representar cualquier tipo de subrasante distinta a la original del lugar en donde se desarrolló la prueba. Cuando el término M_R toma un valor de 3000 psi la Ecuación 2-2 se convierte en la Ecuación 2-1.

$$\text{Log}(W_{t18}) = 9,36 \log(NE + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{P_i - P_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(NE-1)^{5,19}}} + 2,32 + \log(M_R) - 8,07 \quad 2-2$$

La Ecuación 2-2 fue modificada en la guía de diseño de 1986, incorporando la variabilidad de los componentes del diseño, generando la ecuación actualmente usada para el diseño.

$$\text{Log}(W_{t18}) = Z_R S_o + 9,36 \log(NE + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{P_i - P_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(NE-1)^{5,19}}} + 2,32 + \log(M_R) - 8,07 \quad 2-3$$

Dónde:

- Z_R : Desviación estándar asociada a la confiabilidad (R).
- R: Es el valor correspondiente de probabilidad asociado al valor Z de la variable normal estándar.

- S_o : Error estándar combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.

El Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2014) expresa la Ecuación 2-3 en unidades del sistema internacional como:

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} 10^{-(16,40+Z_R S_o)} M_R^{2,32} [(P_i - P_f)/(P_i - 1,5)]^{1/\xi} \quad 2-4$$

$$\xi = 0,40 + [97,81/(NE + 25,4)]^{5,19} \quad 2-5$$

Dónde:

- EE: Predicción del número de aplicaciones de ejes estándar equivalentes de 80 kN, hasta alcanzar el valor del índice de serviciabilidad final de P_f (variable de entrada).
- NE: Número Estructural (en mm) (variable de salida).
- Z_R : Desviación estándar asociada a la confiabilidad R (parámetro de entrada)
- S_o : Error estándar combinado (parámetro de entrada).
- M_R : Módulo resiliente de la subrasante (en MPa) (variable de entrada).
- P_i : Índice de serviciabilidad inicial (parámetro de entrada).
- P_f : Índice de serviciabilidad final (parámetro de entrada).

El método de diseño AASHTO-93 es un proceso iterativo que define el valor del Número Estructural requerido para una condición de tránsito, capacidad estructural de la sub-rasante, serviciabilidad inicial y final pre-establecida. La aplicación del método de diseño entrega el valor del número de ejes equivalentes de 80 kN (w_{t18}) que soportará la estructura hasta llegar a una condición de deterioro (P_f), que representa el valor máximo de deterioro que obliga a su reconstrucción para un cierto Número Estructural (NE) y módulo resiliente de la subrasante (M_R). Finalmente, se incorpora en el cálculo el valor

de serviciabilidad inicial (P_i), cuyo valor representa la serviciabilidad con la que se supone debe entregarse al servicio el pavimento.

Los datos de entrada de este método de diseño se clasifican como variables y parámetros. Las variables de entrada se definen de acuerdo a un análisis estadístico que se desarrolla sobre información recolectada en campo, con la cual se tramifica la carretera para ajustar el diseño a cada tramo. Los parámetros son valores recomendados por la guía de diseño y definidos de acuerdo con el criterio del diseñador. Los datos de entrada así como los de salida se establecen en forma determinista.

Las variables independientes que intervienen en las Ecuaciones 2-4 y 2-5 presentan algún grado de variabilidad, así como también las actividades de planeación, construcción, operación, mantenimiento y el clima. Esta aleatoriedad afecta el desempeño del pavimento que puede valorarse a través de una disminución o alargamiento de la vida de diseño (FHWA, 1993).

El método AASHTO-93 protege el diseño de la variabilidad de los datos de entrada a través de la utilización de los parámetros R , Z_R y S_o , los cuales minoran el diseño calculado mediante la utilización de la Ecuación 2-2. Sin embargo el diseño no queda protegido de la variación de las condiciones climáticas durante la operación ni de actividades como la planeación, construcción, operación y el mantenimiento.

2.2. El concepto de serviciabilidad en AASHTO-93

La serviciabilidad se define como la capacidad que tiene una sección específica de pavimento de soportar el tránsito vehicular bajo el estado o condición real, es una medida de la calidad del servicio que ofrece un pavimento. Fue producto de la prueba AASHO que posteriormente se incluiría al procedimiento de diseño del método AASHTO-93 (Huang, 1993).

Inicialmente la serviciabilidad fue medida por medio de una medida subjetiva realizada

por un panel de usuarios, que evaluaban la forma como percibían la calidad del pavimento. Este procedimiento se denominó PSR (*Present Serviceability Rating*), y corresponde a una valoración que utiliza una escala de calificación que va de 5 (condición de pavimento nuevo o casi nuevo al inicio del periodo de servicio) a 0 (estado de extremo deterioro, característica del final del periodo de servicio) (AASHO, 1962.) (Figura 2-1).

La Figura 2-1 representa la forma general de un gráfico de serviciabilidad, en el que se indica la forma como el pavimento pierde confort a medida que pasan las cargas vehiculares.

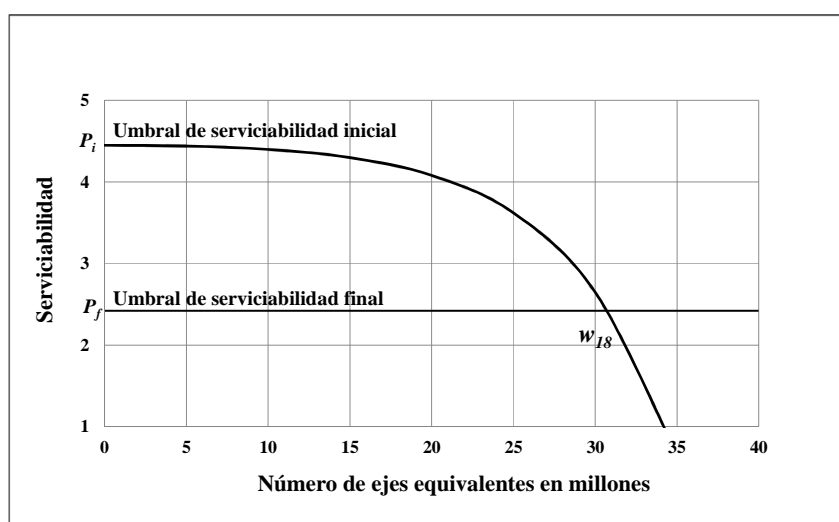


Figura 2-1 Concepto de serviciabilidad en el método de diseño AASHTO-93.

El PSR presentó dificultades a causa de la subjetividad del procedimiento de evaluación, reflejado en una baja reproducibilidad y repetitividad, lo que dificultó su incorporación al método de diseño (Hall y Correa, 1999).

Uno de los resultados de la prueba AASHO fue el desarrollo de una relación que

permitiera pasar de una evaluación subjetiva medida en términos de PSR, a un índice objetivo llamado PSI (*Present Serviceability Index*). El PSI puede calcularse en base a la rugosidad caracterizada por la varianza estadística de la pendiente del perfil longitudinal (*Slope Variance SV*) evaluado cada 0,3048 m (1 pie) y de algunos deterioros (Al-Omari & Darter, 1994). El PSI puede representarse a través de la Ecuación 2-6 (Carey & Irick, 1960).

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log (1 + SV) - 1,38 RD^2 - 0,01 (C + P)^{0,5} \quad 2-6$$

Dónde:

- SV: Varianza de la pendiente (slope variance)
- RD: Profundidad de la huella en pulgadas.
- C: Área con presencia de agrietamiento en $\text{pie}/1000 \text{ pie}^2$.
- P: Área con presencia de parches en $\text{pie}^2/1000 \text{ pie}^2$.

Paterson (1987) realizó un análisis de la Ecuación 2-6, desarrollada para el análisis de pavimentos flexibles y encontró que el PSI presenta una correlación de 0,81 con el Slope Variance (SV) y de 0,03 con los deterioros. Además encontró que de forma individual Slope Variance (SV) presenta un R^2 de 0,90 y 0,65 con el ahuellamiento y el agrietamiento respectivamente.

De acuerdo a lo anterior Paterson propuso que era preferible predecir las tendencias de los deterioros de forma independiente, más que involucrarlos en el cálculo de un índice compuesto como ocurre con el cálculo del índice de serviciabilidad mediante la Ecuación 2-6 y que sería mejor calcular la serviciabilidad a partir de una evaluación independiente de cada deterioro.

El índice de serviciabilidad inicial utilizado en la ecuación 2-2, es función del tipo de pavimento y de la calidad de construcción. El valor típico encontrado en la prueba AASHO para estructuras de pavimento flexibles fue de 4,2. Por su parte el índice de

serviciabilidad final, es el menor índice que será tolerado antes de realizar una rehabilitación, recapado o reconstrucción de la estructura. La guía de diseño recomienda un índice de serviciabilidad final de 2,5 para carreteras con alto volumen de tránsito y de 2,0 para carreteras con bajo volumen de tránsito para pavimentos flexibles (AASHTO-93).

2.3. El concepto de confiabilidad en AASHTO-93

Según AASHTO (1993) una forma de definir la confiabilidad es como “la probabilidad de que el número de repeticiones carga realmente aplicadas sobre el pavimento, no excedan el número de repeticiones de carga que puede soportar hasta alcanzar un nivel mínimo de serviciabilidad especificada”.

Es en base a esta definición que realiza el análisis de confiabilidad del método, para lo cual desarrolla las siguientes definiciones:

- Tránsito real del periodo de diseño (N_T): Es el tránsito que realmente pasará por el pavimento y cuyo índice de serviciabilidad (PSI) se extenderá más allá de la serviciabilidad final (P_f)
- Predicción del tránsito del periodo de diseño (w_T): Corresponde a la predicción de N_T , definido mediante datos de tránsito, carga y factores de equivalencia.
- Desempeño real del pavimento durante el periodo de diseño (N_i): Puede calcularse como el área entre la curva de serviciabilidad hasta el eje ordenado que corresponde a la serviciabilidad final especificada o como el número de ejes equivalentes que fueron realmente resistidos por el pavimento hasta alcanzar el valor de serviciabilidad final especificada.

- Predicción del desempeño del pavimento durante el periodo de diseño (W_t): Corresponde a la predicción de N_t , que es calculado a través de la ecuación de diseño (Ecuaciones 2-3 o 2-4).
- Periodo de diseño: Corresponderá al número de ejes equivalentes de 80 kN que transitan desde la serviciabilidad inicial (P_i), hasta alcanzar la serviciabilidad final (P_f) especificada.

De acuerdo a la definición de confiabilidad el método de diseño propone como hipótesis que el valor de N_t siempre debe exceder el valor de N_T , condición que también debe cumplirse con sus predicciones (Carrey e Irick, 1960). De esta manera se establece la confiabilidad del diseño como:

$$\text{Confiabilidad} = \text{Probabilidad}(\log W_t - \log w_T) > 0 \quad 2-7$$

La diferencia entre ejes estándar equivalentes definidos como $\log W_t$ y $\log w_T$, representados en la Figura 2-2, define el Factor de Confiabilidad del Diseño F_R (Ecuación 2-8), que representa un margen de seguridad que define el diseñador y que puede analizarse como un elemento que trata de controlar el nivel de varianza de los factores que se incorporan en el diseño.

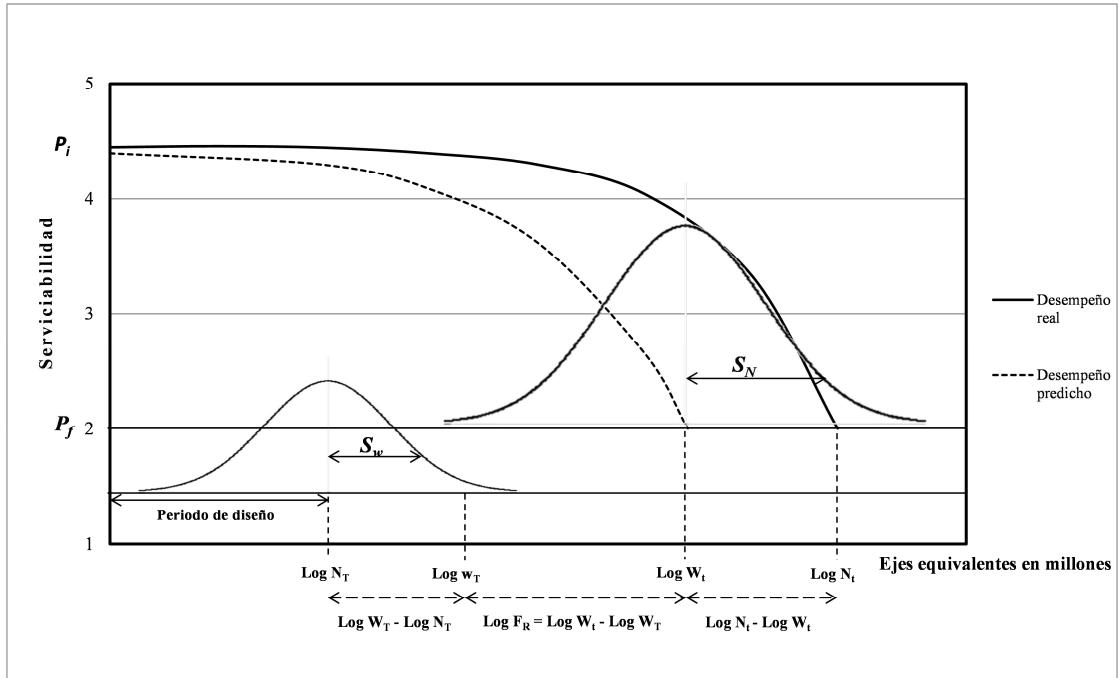


Figura 2-2 Concepto de confiabilidad en el método de diseño AASHTO-93 basado en Ejes Estándar Equivalentes de 80 kN.

(AASHTO, 1993)

$$\log F_R = \log W_t - \log w_T \quad 2-8$$

F_R debe ser mayor o igual a uno y tiene la única finalidad de hacer a w_T mayor o igual a W_t . En la Figura 2-2, también se presenta la desviación estándar de la predicción del desempeño corresponde a S_N y la desviación estándar de la predicción del tránsito S_w .

El análisis de confiabilidad reúne en una función de distribución conjunta, todos los posibles errores causados por la predicción de valores N_T y N_t , a través de las estimaciones de w_T y W_t , respectivamente. En donde la media es F_R y la desviación estándar se define como S_o . Realizando un cambio de variable para normalizar la función y analizando el punto en donde $S_o = 0$, la variable Z se convierte en Z_R .

$$Z_R = (-\text{Log } F_R)/S_O \quad 2-9$$

Y por lo tanto de la Figura 2-2 se puede concluir que:

$$-Z_R S_O = \log W_t - \log w_T \quad 2-9$$

Despejando la ecuación, se encuentra:

$$\log w_T = Z_R S_O + \log W_t \quad 2-10$$

La Ecuación 2-10 configura en forma simplificada la ecuación de diseño 2-3.

En conclusión, el número de ejes estándar equivalentes de 80 kN calculado siguiendo la Ecuación 2-2, entrega un valor determinista del número de ejes simples equivalentes admisibles que posteriormente es minorado por un factor de seguridad, definido como Factor de Confiabilidad del Diseño F_R , que se calcula a partir del establecimiento de un nivel de confianza (R) que se asocia con un valor Z_R en la Función Distribución Normal y de un valor que abarca la varianza estimada (S_O) de cada uno de los factores de diseño utilizados en la predicción del modelo.

2.4. Efecto de la variación de la confiabilidad en el tránsito y el Número Estructural - método AASHTO-93

La Figura 2-3 representa la variación del Número Estructural y número de ejes equivalentes de un diseño estructural de pavimento flexible, en el cual se han mantenido constantes todos los datos de entrada y modificado el valor de la confiabilidad utilizada en el diseño, aplicando la Ecuación 2-3.

Un análisis de la Figura 2-3 permite identificar dos sectores en cada curva, uno al inicio en el que la tendencia es asintótica al eje de las ordenadas para bajas solicitaciones de carga y otro en donde la pendiente es menor para altos valores de ejes equivalentes. En ellos cualquier cambio en el valor del tránsito implica necesariamente una modificación del Número Estructural recomendado.

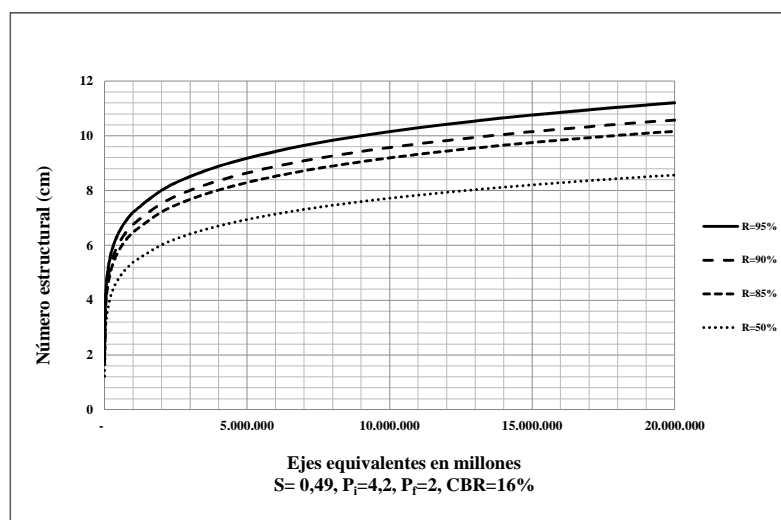


Figura 2-3 Variación del Número Estructural y la confiabilidad de una estructura de pavimento flexible tipo con respecto al aumento del tránsito acumulado.

Por otro lado, en la gráfica también se aprecia una fuerte variación en el diseño cuando se elige en forma incorrecta el valor de confiabilidad. Como ejemplo, una estructura que se diseña para 8 cm de Número Estructural con 95% de confiabilidad podría soportar dos millones de ejes equivalentes, pero si se diseña con el 85% soportaría cuatro millones de ejes equivalentes, es decir 100% más de tránsito estimado.

Adicionalmente, se aprecia que para un tránsito de diseño cualquiera, el valor del número estructural se hace cada vez más grande en la medida en que se elija un mayor nivel de confiabilidad.

En conclusión, para cualquier camino se está en posibilidad de diseñar estructuras sub o sobre dimensionadas a causa en primer lugar de un error en la estimación del tránsito y en segundo lugar a causa de una equivocada definición del valor de confiabilidad utilizado en el proceso de diseño.

En el caso de caminos con volúmenes bajos de tránsito las dos situaciones anteriores,

junto a la recomendación de la guía de diseño AASHTO-93 de usar bajos valores de confiabilidad, afectan la extensión de la vida de útil y la confiabilidad del diseño.

2.5. Efecto de la variación de la confiabilidad en el tránsito y el Número Estructural - método AASHTO-93

La Figura 2-4 refleja la pérdida de serviciabilidad de una estructura de pavimento flexible para distintos valores de confiabilidad. Cada gráfica representa el mismo diseño, en el cual se han mantenido constantes las variables y parámetros de la Ecuación 2-3, con excepción del número de ejes equivalentes y la serviciabilidad final P_f .

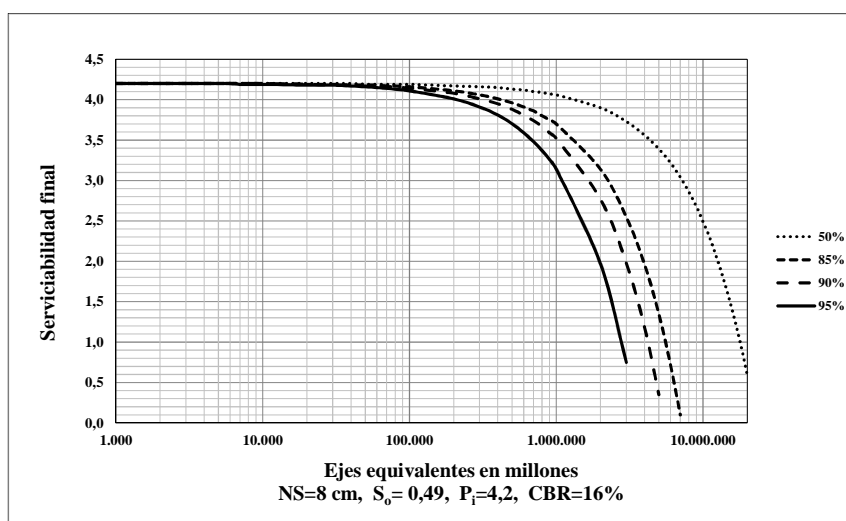


Figura 2-4 Variación de la Serviciabilidad final y la Confiabilidad de una estructura de pavimento flexible tipo con respecto al crecimiento del tránsito.

La sub-rasante está caracterizada por un CBR de 16%, el Número Estructural de 8 cm, el error estándar combinado $S_o=0,49$ y la serviciabilidad inicial de 4,2.

Un análisis de la Figura 2-4 permite establecer que los valores del tránsito, expresados en número de ejes equivalentes, que definen el fin de la vida de servicio de una estructura de pavimento, se ve modificado por el valor de confiabilidad elegido en el diseño y que este es inversamente proporcional al valor de confiabilidad elegido, es decir: a mayor valor de confiabilidad elegido, menor será el número de ejes equivalentes que definen el fin de la vida de servicio.

Un ejemplo podrá dar mayor claridad: si para un diseño se asume un valor de serviciabilidad final de 2, y se toma un valor de confiabilidad de 85% el número de ejes equivalentes que definen el fin de la vida de servicio es de 4 millones, mientras si se toma un valor de confiabilidad de 95, este valor será de 2 millón de ejes equivalente.

3. MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Este capítulo presenta una descripción general de los modelos matemáticos que predicen el deterioro de pavimentos flexibles y de la relación que permite calcular la serviciabilidad. Paterson (1987) indica que debe utilizarse la estimación de los deterioros para calcular la rugosidad, y que este valor puede utilizarse para evaluar la serviciabilidad del pavimento, lo que se convierte en una de las bases de esta investigación.

3.1. Características generales

Los modelos de comportamiento corresponden a expresiones matemáticas utilizadas para predecir la evolución del deterioro del pavimento (FICEM, 1996). Existen dos clases de modelos, los basados en el análisis mecanicista y los empíricos (NDLI, 1995). Los modelos mecanicistas relacionan el estado del pavimento con el nivel de tensiones y deformaciones de las capas utilizando los fundamentos del análisis estructural (Solorio, Hernández & Gómez, 2004). Los modelos empíricos surgen del análisis estadístico de tendencias del deterioro observadas localmente en campo y que relacionan el estado del pavimento con variables como tránsito, clima y pueden no aplicarse fuera de las condiciones para las cuales fueron desarrollados.

Ambos tipos de modelos requieren de una amplia y confiable base de datos que por lo general es difícil de recabar y de procesos de calibración vinculados necesariamente con procedimientos de campo.

Los modelos de comportamiento de acuerdo a su estructura pueden ser absolutos o incrementales. Los primeros requieren conocer la historia del pavimento. Los segundos solo la condición actual medida en terreno además de datos adicionales tales como clima, tránsito y características estructurales. Dependiendo del tipo de deterioro, se pueden dividir en una etapa de inicio y otra de progresión. Finalmente los modelos

pueden ser de primera o segunda fase, dependiendo del estado cronológico en el que sean evaluados. Los de primera fase describen el comportamiento entre el momento en el cual se da al servicio la carretera y el momento en cual se realiza el primer mantenimiento importante; los de segunda fase describen el comportamiento entre el momento del primer mantenimiento importante en adelante (de Solminihac, 2001).

Los modelos de comportamiento utilizados en esta investigación corresponden a los modelos empíricos desarrollados a partir de los trabajos de Paterson (1987), Watanatada et al. (1987), NDLI (1995), Riley y Bennett (1995 y 1996) y publicados en la más reciente actualización por Morosiuk (1996, 1998, 1999). Estos modelos se originaron 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 el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Fueron complementados con un estudio de campo realizado por el Banco Mundial en conjunto con el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) en países en vía de desarrollo, lo que permitió desarrollar el programa HDM-4.

Los datos de entrada requeridos por los modelos de comportamiento, se clasifican en variables de entrada o variables descriptivas del fenómeno de deterioro, factores de calibración de los modelos matemáticos a condiciones locales, parámetros y constantes. Las variables descriptivas se obtienen de información medida en campo y analizadas estadísticamente, los factores de calibración se utilizan para adaptar la estimación del modelo a nivel local, las constantes y los parámetros se proporcionan para cada modelo.

Adicional a los modelos de comportamiento descritos anteriormente, también se tomará en cuenta el modelo propuesto por Al-Omari y Darter (1994) para el cálculo del PSI con base en el modelo de rugosidad.

A continuación se presenta la descripción del mecanismo de falla de estructuras de pavimento flexible propuesto por Morosiuk (1996, 1998, 1999), más adelante se explica en detalle los modelos de deterioro, para finalmente desarrollar su interacción con el modelo de serviciabilidad.

3.2. Mecanismos de falla del pavimento asfáltico

Paterson (1987) desarrolló de forma general el mecanismo de falla de estructuras de pavimento asfáltico, en donde los deterioros que afectan el pavimento se desarrollan a través de diferentes interacciones como se ilustran en la Figura 3-1.

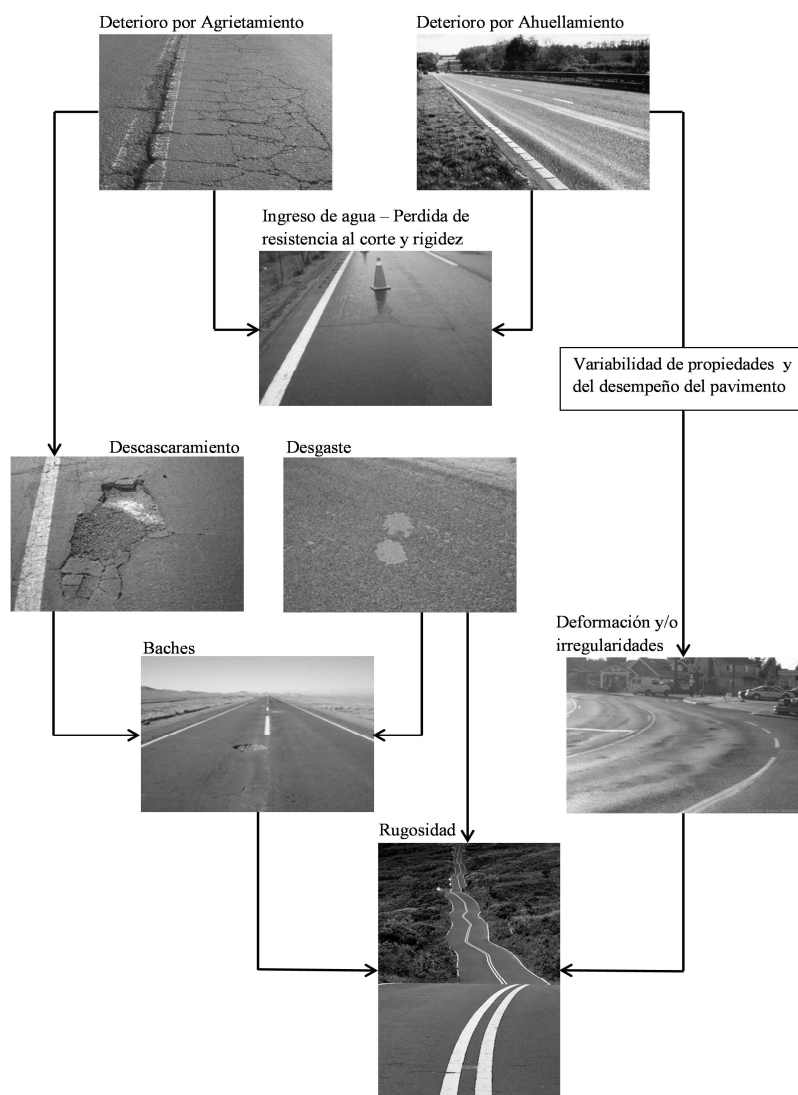


Figura 3-1 Mecanismo de falla e interacción de deterioros en pavimentos flexibles.

Inicialmente, las cargas del tránsito inducen niveles de esfuerzo y deformación dentro de las capas del pavimento que son función de la rigidez y el espesor de cada capa de material, que causan la iniciación del agrietamiento como consecuencia de la fatiga de los materiales ligados y la deformación de todas las capas de material con diferente nivel de severidad dependiendo de las propiedades mecánicas del material.

El clima ocasiona que los materiales bituminosos superficiales se envejecen, y por lo tanto que sean más susceptibles al agrietamiento y la desintegración (Así como también al desgaste superficial, el desconche y la presencia de grietas de borde).

Una vez iniciado el agrietamiento del pavimento, este progresa en área y severidad hasta el punto de producirse el desconche de la capa superficial y por último la presencia de baches.

Las grietas abiertas en la superficie permiten el ingreso de agua al interior del pavimento acelerando el proceso de la desintegración, reduciendo la resistencia al corte de los materiales no ligados e incrementando la tasa de deformación causada por la acción de los esfuerzos inducidos por las cargas del tránsito.

La deformación acumulada a través de la profundidad del pavimento se manifiesta en las huellas de circulación vehicular como roderas y de forma general sobre la superficie como un desnivel o distorsión del perfil longitudinal definido por la rugosidad.

Los efectos ambientales del drenaje, el clima y las estaciones influyen la resistencia y el desempeño de los materiales del pavimento bajo las cargas del tránsito, causando distorsión y probablemente cambios volumétricos que contribuyen a incrementar la rugosidad.

La rugosidad es la medida de la variación del perfil longitudinal de una carretera, está directamente relacionado con deterioros característicos de un pavimento como la rugosidad, ahuellamiento, grietas por fatiga, etc (Zhou & Wang, 2008), que ocasiona la pérdida de confort del usuario que transita sobre el pavimento. La forma convencional

para referirse a la confiabilidad es a través del Índice de Regularidad Internacional (International Roughness Index – IRI), que fue desarrollado por el banco mundial en la década de los años 80 (Huang, 1993)

La rugosidad del pavimento es por lo tanto el resultado de una cadena de mecanismos de deterioro y de la combinación de efectos entre ellos. Este proceso interactivo de causa y efecto conduce finalmente a la rugosidad, que es el concepto clave del enfoque de modelación que adopta Morosiuk (1996, 1998, 1999).

3.3. Modelo de rugosidad con base en el mecanismo de falla de pavimentos flexibles

Los modelos de comportamiento publicados por Morosiuk (1996,1998, 1999) permiten el cálculo de la rugosidad y siguen la lógica descrita por Paterson (1987) para el desarrollo del mecanismo de falla de un pavimento flexible y contempla el desarrollo en secuencia de los siguientes deterioros:

- **Deterioro por agrietamiento:** Se desarrolla primero sobre un área sin presencia de daño y luego de que ésta se haya extinguido, desde el área con presencia de desgaste superficial si la hay. El área agrietada solo puede evolucionar en baches pero no en desgaste superficial.
- **Deterioro por desgaste superficial:** Se considera como la pérdida de material superficial consecuencia de la abrasión del tránsito. La aparición del desgaste superficial varía considerablemente entre diferentes regiones y países de acuerdo a los métodos constructivos, especificaciones, materiales disponibles y la práctica local. El desgaste superficial es un deterioro común en procesos constructivos de poca calidad, en capas bituminosas delgadas, tales como tratamiento superficial, pero en procesos constructivos de alta calidad y en mezclas asfálticas en caliente es escasa su presencia. El desgaste superficial sólo puede desarrollarse a partir de un área sin

presencia de daño. Después de que una zona presenta desgaste superficial esta puede agrietarse, reclasificando la zona con desgaste superficial en áreas con agrietamiento.

- **Deterioro por baches:** Pueden desarrollarse en áreas que previamente manifestaron deterioro por agrietamiento, desgaste superficial y áreas sin presencia de daño. A menos que el área afectada sea reparada, un área de baches no puede convertirse en un área agrietada, con presencia de desgaste superficial o sin daño. La presencia de agua sobre el pavimento acelera la formación de baches a través del debilitamiento general de la estructura del pavimento, pérdida de la resistencia de la superficie y de los materiales de base hasta la desintegración. El deterioro por baches posee un límite superior de 10%, debido a que por encima de este nivel la superficie del pavimento se convierte en una zona mal definida y la función que permite calcular la rugosidad no es válida. El deterioro por agrietamiento activa la iniciación de baches cuando se cumple la condición de que el área afectada por grietas anchas estructurales al comienzo del año análisis, es mayor que el área de agrietamiento ancho en la que se considera que este deterioro permite la iniciación de baches, el cual se define por defecto con un valor de 20% (Paterson, 1987).

El deterioro por desgaste superficial activa la iniciación de baches cuando se cumple la condición de que el área afectada por desgaste superficial, al comienzo del año análisis es mayor que el área de desgaste superficial en la que se considera que este deterioro permite la iniciación de baches, se define por defecto con un valor de 30% (Paterson, 1987).

- **Deterioro por grietas de borde:** Se define como la pérdida de material superficial y de base en el borde del pavimento causado por una falla de corte y desgaste. Comúnmente surge en carreteras angostas con hombros no confinados y donde los vehículos pasan sobre o muy cerca del borde del pavimento. El modelo predice la grieta de borde para una carretera con un ancho de calzada definido por el usuario, se aceptan valores hasta un ancho máximo de 7,5 m como límite superior y se considera

que no se produce grieta de borde en caminos con un ancho de calzada superior a este valor.

Las grietas de borde sólo pueden desarrollarse desde áreas agrietadas, con presencia de desgaste superficial y sin daño. A menos que una zona afectada por grietas de bordes sea reparada no puede revertirse en baches, grietas, desgaste superficial o área sin daño. Se establece un límite superior de 18% para el área con grietas de borde, que se basa en la suposición de que el deterioro no afectará más allá de 0,5 m de ancho desde cualquiera de los bordes de la calzada si el ancho del pavimento es de 5,5 m de ancho (Paterson, 1987).

Los argumentos expuestos aquí sirven para realizar algunas simplificaciones que agilizan el cálculo del valor del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

3.4. Modelos de deterioro

El ahuellamiento y el agrietamiento son las principales formas de deterioro estructural de un pavimento causadas por la fatiga y el envejecimiento del material. Las expresiones matemáticas que permiten predecir la evolución de estos deterioros son función de variables explicativas, parámetros, constantes y factores de calibración, todos definidos en forma determinista. Las variables explicativas en su mayoría se obtienen de mediciones hechas en campo, los parámetros y las constantes se definen para cada modelo en forma específica y los factores de calibración permiten adaptar los modelos a condiciones locales.

3.4.1. Modelo de deterioro por agrietamiento

Según Geo et al. (2012) los modelos de agrietamiento de una estructura de pavimento asfáltico se clasifican en dos tipos, uno que predice el tiempo que transcurre hasta que el

área agrietada alcanza un umbral determinado y el segundo que predice la progresión del agrietamiento en función de una expresión que reúne un conjunto de variables explicativas. Queiroz (1981) y Paterson (1987), desarrollaron modelos para la iniciación y progresión del agrietamiento, en donde el modelo de iniciación siguió el primer enfoque y el modelo de progresión el segundo.

El modelo de agrietamiento de Morosiuk (1996, 1998, 1999) sigue este enfoque y se divide en dos sub-modelos de acuerdo a la severidad del deterioro, uno para todas las grietas estructurales que corresponde a grietas de más de 1 mm de ancho y otro para grietas estructurales anchas con grietas mayores de 3 mm de ancho.

Cada sub-modelo presenta dos fases, una de iniciación y otra de progresión. El modelo de iniciación indica el tiempo transcurrido desde la puesta en servicio del pavimento hasta el inicio del agrietamiento. Se considera que el agrietamiento ha iniciado cuando el deterioro afecta más del 0.5% del área total de la superficie del pavimento.

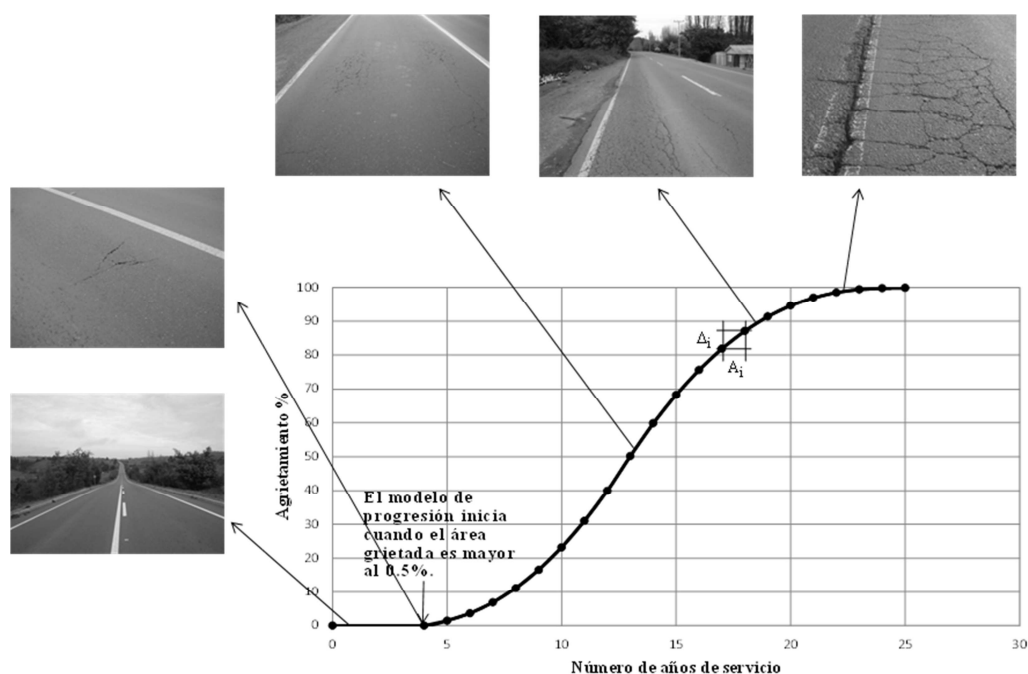


Figura 3-2 Modelo de agrietamiento para pavimentos.

El modelo de progresión está representado mediante una curva sigmoïdal (Figura 3-2) que se construye de forma incremental (el modelo entrega el cambio Δ_i en % área agrietada para cada año A_i) e inicia en el momento que predice el modelo de iniciación.

El incremento calculado en cada periodo de análisis del modelo de progresión (Δ_i) depende del área agrietada del periodo análisis, 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 independientes o factores de diseño, presentados en las ecuaciones 3-1 a 3-4. Las Ecuaciones 3-1 y 3-2 corresponden al modelo de iniciación de todas las grietas estructurales (ICA, en años) y al modelo de iniciación de grietas anchas estructurales (ICW, en años) respectivamente. Las Ecuaciones 3-3 y 3-4 corresponden al modelo de progresión de todas las grietas estructurales (ΔACA , en porcentaje de área agrietada) y al modelo de progresión de grietas estructurales anchas (ΔACW , en porcentaje de área agrietada) respectivamente.

$$ICA = k_{cia} \left\{ CDS^2 a_{0cia} e^{[a_{1cia} NE + a_{2cia} (\frac{YE^4}{NE^2})]} + CRT \right\} \quad 3-1$$

$$ICW = k_{ciw} \text{MAX} \{ (a_{0ciw} + a_{1ciw} ICA), a_{2ciw} ICA \} \quad 3-2$$

$$\Delta ACA = k_{cpa} \left(\frac{CRP}{CDS} \right) Z_A \left\{ \left(Z_A a_{0cpa} a_{1cpa} \delta t_A + SCA^{a_{1cpa}} \right)^{\frac{1}{a_{1cpa}}} - SCA \right\} \quad 3-3$$

$$\Delta ACW = k_{cpw} \left(\frac{CRP}{CDS} \right) Z_W \left\{ \left(Z_W a_{0cpw} a_{1cpw} \delta t_W + SCW^{a_{1cpw}} \right)^{\frac{1}{a_{1cpw}}} - SCW \right\} \quad 3-4$$

Dónde:

- NE: Número Estructural, en pulgadas.
- YE4: Tránsito en millones de ejes equivalentes acumulados por pista. Variable de entrada, proviene de información de terreno y se estiman en forma determinista.
- k_{cxy} : Factores de calibración. Permiten adaptar los modelos a condiciones locales.
- $a_{\#cxy}$: Coeficientes definidos para cada tipo de modelo de deterioro.
- CDS: Indicador de defectos de construcción para superficies en asfalto (parámetro).
- CRT: Tiempo en que se retarda la aparición de grietas debido al mantenimiento (en años - parámetro). las expresiones matemáticas que permiten predecir la evolución de estos deterioros las expresiones matemáticas que permiten predecir la evolución de estos deterioros
- 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.

3.4.2. Modelo de ahuellamiento

El ahuellamiento se define como una deformación permanente e irrecuperable dentro de las capas del pavimento, asociada al tránsito y medida con una regla de 2 m de ancho. Se presenta cuando el flujo vehicular se canaliza sobre la calzada y con el paso del tiempo se convierte en un surco que durante las épocas de lluvia almacena agua, disminuyendo

la resistencia al deslizamiento de la llantas sobre el pavimento y por lo tanto la seguridad de los usuarios. Es un modelo incremental, que puede representarse por la Figura 3-3.

En el modelo matemático del ahuellamiento propuesto por Morosiuk (1996, 1998, 1999) únicamente puede calcularse después de que los valores de los deterioros han sido previamente evaluados al final del año de análisis. El modelo del ahuellamiento está basado en cuatro componentes, cuya suma definen el valor del deterioro:

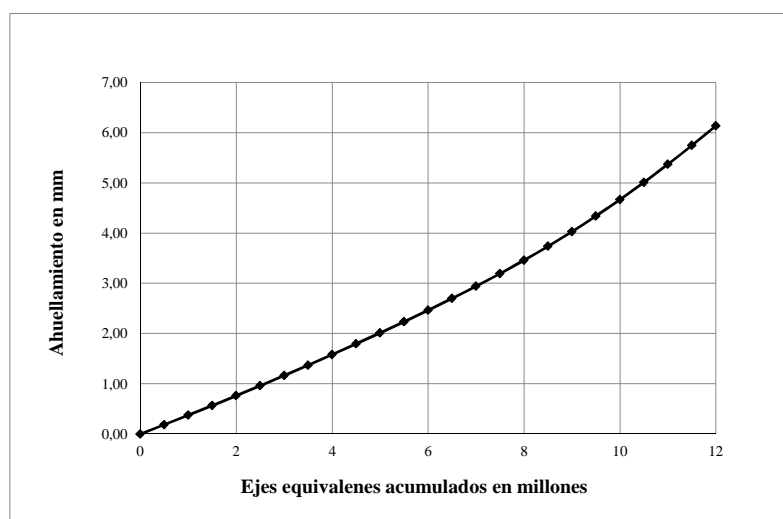


Figura 3-3 Modelo de ahuellamiento de pavimentos asfálticos.

a) Densificación inicial

Depende del grado de compactación relativa (COMP) de las capas de base, sub-base y subrasante, cuyos valores típicos se proponen en la guía del modelo.

$$RDO = k_{rid} \left[a_{0rid} (YE4 \ 10^6)^{(a_{1rid} + a_{2rid}^{DEF})} NE^{a_{3rid}} COMP^{a_{4rid}} \right] \quad 3-5$$

Dónde:

- RDO: Ahuellamiento debido a la densificación inicial (mm).
- DEF: Deflexión anual media con viga Benkelman – variable de entrada (mm).
- COMP: Compactación relativa – parámetro (%).
- k_{rid} : Factor de calibración para la densificación inicial.
- $a_{\#rid}$: Constantes del modelo, suministrados por la guía del modelo.

La densificación inicial solamente se toma en cuenta en estructuras de pavimentos nuevas o reconstrucciones, en las cuales necesariamente se haya construido una capa nueva de base.

b) Deformación estructural

Posee dos modelos separados para calcular la deformación estructural, uno sin presencia de grietas (Ecuación 3-6) y el otro que toma en cuenta su presencia (Ecuación 3-7).

$$\Delta RDST_{UC} = k_{rst} (a_{0_{uc}} NE^{a_{1_{uc}}} YE4^{a_{2_{uc}}} COMP^{a_{3_{uc}}}) \quad 3-6$$

$$\Delta RDST_{crk} = k_{rst} (a_{0_{crk}} NE^{a_{1_{crk}}} YE4^{a_{2_{crk}}} MMP^{a_{3_{crk}}} ACX^{a_{4_{crk}}}) \quad 3-7$$

Para el caso en que no haya presencia de agrietamiento el incremento anual se calcula como (Morosiuk, 1996, 1998, 1999):

$$\Delta RDST = \Delta RDST_{UC} \quad 3-8$$

Para el caso en que se esté en presencia de grietas se calcula como (Morosiuk, 1996, 1998, 1999):

$$\Delta RDST = \Delta RDST_{UC} + \Delta RDST_{crk} \quad 3-9$$

Dónde:

- $\Delta RDST$: Incremento total en la deformación estructural en el año de análisis (mm).
- $\Delta RDST_{UC}$: Incremento del ahuellamiento debido a la deformación estructural sin agrietamiento en el año de análisis (mm).
- $\Delta RDST_{crk}$: Incremento del ahuellamiento debido a la deformación estructural en presencia de grietas en el año de análisis (mm).
- MMP : Precipitación media mensual – parámetro. (mm/mes).
- ACX : Área de agrietamiento al inicio del año de análisis – variable de entrada (% del área total de la calzada).
- k_{rst} : Factor de calibración para la deformación estructural.
- $a_{\#uc} - a_{\#crk}$: Constantes del modelo de deformación estructural, suministrados por la guía del modelo.

c) Deformación plástica:

Interviene una variable denominada CDS que trata de identificar si la superficie es propensa a la deformación plástica.

$$\Delta RDPD = k_{rpd} a_{0rpd} CDS^{a_{1rpd}} YE4 Sh^{a_{2rpd}} [\min(HS, HSLIM)]^{a_{3rpd}} \quad 3-10$$

Dónde:

- $\Delta RDPD$: Incremento en la deformación plástica en el año de análisis (mm).
- Sh : Velocidad media para vehículos pesados – variable de entrada (km/h).
- HS : Espesor total de la capa asfáltica – variable de entrada (mm).

- HSLIM: Espesor máximo de la capa asfáltica en donde se desarrollan los efectos del flujo plástico – variable de entrada (mm).
- k_{rpd} : Factor de calibración para la deformación plástica.
- $a_{\#rdp}$: Constantes del modelo de deformación plástica, suministrados por la guía del modelo.

d) Desgaste superficial como consecuencia del uso de neumáticos con revestimientos metálicos:

El aporte al modelo ahuellamiento se utiliza para aquellos lugares en donde debido a las características climáticas, es usual que los autos se movilicen con algún elemento metálico alrededor de las llantas para poder desplazarse sobre la nieve. Este aporte no será tomado en cuenta en la investigación, ya que es una condición inusual para las carreteras que hicieron parte de la investigación.

e) Cálculo del ahuellamiento total:

El ahuellamiento total se calcula como:

Si la edad del pavimento es menor o igual a un año:

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW \quad 3-11$$

En cualquier otro caso:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW \quad 3-12$$

Dónde:

- ΔRDM : Incremento en el ahuellamiento total medio para ambas huellas en el año de análisis (mm).

3.4.3. Modelo de deterioro de rugosidad

El modelo de rugosidad consiste en la suma de varios componentes como: estructural, agrietamiento, ahuellamiento, ambiental.

Está representado por una gráfica como la que se presenta en la Figura 3-4, que corresponde a un modelo incremental. Matemáticamente está representado por la Ecuación 3-13.

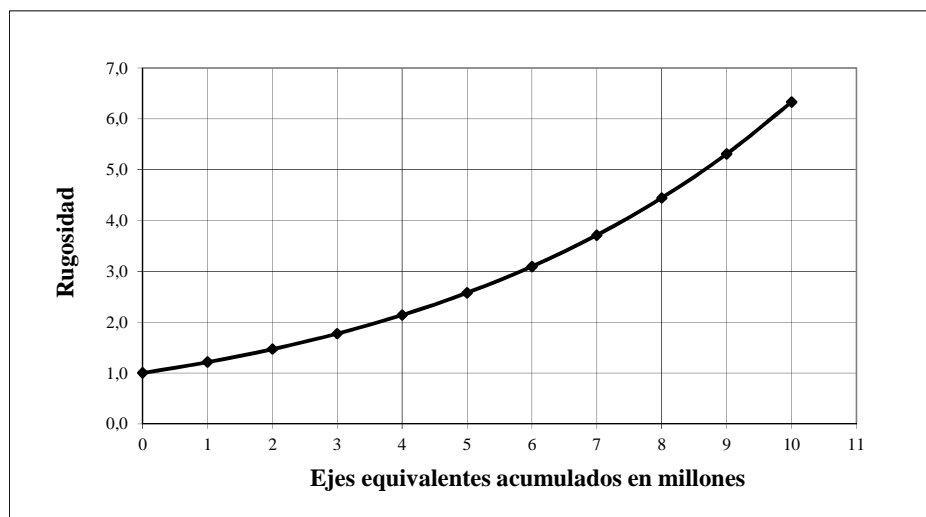


Figura 3-4 Modelo de rugosidad de pavimentos asfálticos.

a) Componente estructural:

La componente estructural de la rugosidad toma en cuenta la deformación de los materiales que integran el pavimento y que se encuentran sometidos a esfuerzos de corte impuestos por las cargas de tránsito. Está definido por:

$$\Delta RI_s = k_{gs} a_{0_{gs}} \exp(m k_{gm} AGE3) (1 + NE)^{-5} YE4 \quad 3-13$$

Dónde:

- ΔRI_s : Cambio incremental de la rugosidad debido a la deformación estructural durante el año de análisis (IRI m/km).
- m : Coeficiente medioambiental - parámetro.
- $k_{gs} - k_{gm}$: Factor de calibración para la componente estructural de la rugosidad.
- $AGE3$: Tiempo transcurrido desde el último recapado o desde la reconstrucción del pavimento o nueva reconstrucción.
- $a_{0_{gs}}$: Constante de la componente estructural del modelo de rugosidad, suministrados por la guía del modelo.

b) Componente del agrietamiento:

La componente de la rugosidad debida al agrietamiento está definida como:

$$\Delta RI_c = k_{gc} a_{0_{gc}} \Delta ACRA \quad 3-14$$

Dónde:

- ΔRI_c : Cambio incremental de la rugosidad debido al agrietamiento durante el año de análisis (IRI m/km).
- $\Delta ACRA$: Cambio incremental de todo el agrietamiento durante el año de análisis – variable de entrada (% del área total de la calzada).
- m : Coeficiente medioambiental - parámetro.
- k_{gc} : Factor de calibración para la componente debida al agrietamiento de la rugosidad.
- $a_{0_{gc}}$: Constante de la componente del agrietamiento del modelo de rugosidad, suministrados por la guía del modelo.

c) Componente del ahuellamiento:

$$\Delta RI_r = k_{gr} a_{0_{gr}} \Delta ARDS \quad 3-15$$

Dónde:

- ΔRI_r : Cambio incremental de la rugosidad debido al ahuellamiento durante el año de análisis (IRI m/km).
- $\Delta ARDS$: Cambio incremental de la desviación estándar del ahuellamiento durante el año de análisis – variable de entrada (mm).
- k_{gr} : Factor de calibración para la componente debida al ahuellamiento.
- $a_{0_{gr}}$: Constante de la componente del ahuellamiento del modelo de rugosidad, suministrados por la guía del modelo.

d) Componente ambiental:

La componente ambiental de la rugosidad toma en cuenta factores que incluyen la temperatura, las fluctuaciones de humedad, además de movimientos del suelo de fundación como hundimientos.

$$\Delta RI_e = m k_{gm} RI_a \quad 3-16$$

Dónde:

- ΔRI_e : Cambio incremental de la rugosidad debido al ambiente durante el año de análisis (IRI m/km).
- RI_a : Rugosidad al inicio del año de análisis – variable de entrada (IRI m/km).
- k_{gm} : Factor de calibración para la componente debida al medioambiente.

e) Cálculo de la rugosidad final:

Se calcula con base en el aporte de cada uno de los anteriores componentes, de la siguiente manera:

$$\Delta RI = \{\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r\} + \Delta RI_e \quad 3-17$$

El principal requerimiento para la utilización de los modelos de deterioro es que deben calibrarse a condiciones locales. En Chile se han realizado tres estudios para calibrarlos a nivel de red (MOP, 1996, 2001, 2010), gracias a que se cuenta con una base de datos de la red vial nacional de propiedad del Ministerio de obras Públicas de Chile (MOP), donde se lleva el registro anual de evolución de deterioros como fisuración, ahuellamiento y rugosidad, además de almacenar características físicas de las carreteras como espesores de capas, CBR, características geométricas, condiciones climáticas, clase de mantenimiento y tránsito entre otros.

3.5. Ecuación para el cálculo de la serviciabilidad con base en el modelo de rugosidad

Esta ecuación corresponde a un modelo matemático que permite obtener el valor de una variable llamada dependiente, en este caso la serviciabilidad, a través del resultado calculado desde otra variable que es utilizada como dato de entrada del modelo matemático o variable independiente, en este representada por la rugosidad.

Como se mencionó en la sección 2.2, a través del PSI se evalúa la condición del pavimento medido en términos de la serviciabilidad, el cual se representa por la Figura 3-5. En ella la evolución de este indicador se describe mientras el pavimento está en servicio y los vehículos transfieren las solicitaciones a la estructura degradando gradualmente la condición superficial en el tiempo. Este indicador puede calcularse mediante una relación cuantitativa que puede modelarse matemáticamente de varias formas.

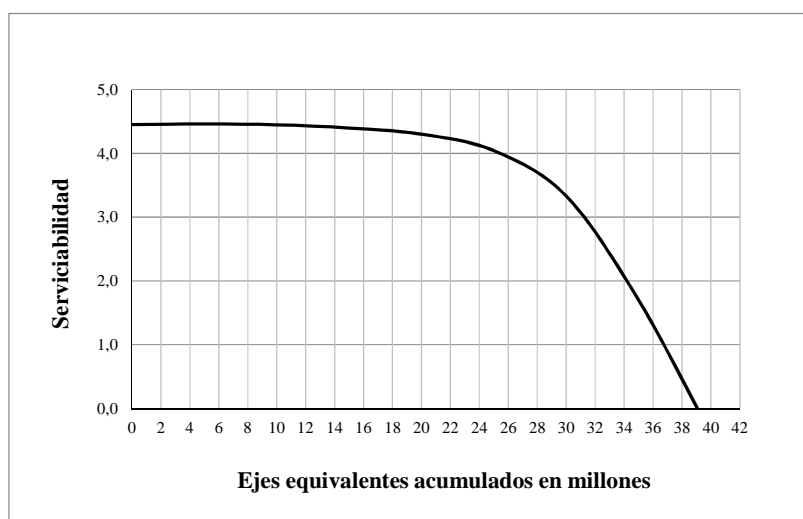


Figura 3-5 Modelo de serviciabilidad de pavimentos asfálticos.

3.5.1. Modelo matemático de AASHO

El modelo reproduce el valor del PSI a través de la evaluación de los deterioros que presentan la estructura de pavimento. Fue desarrollado durante la prueba AASHO a finales de la década de los años 50 y relaciona la varianza de la pendiente longitudinal (SV), medida sobre la sección de estudio mediante el uso del perfilómetro CHLOE, la profundidad media de la huella en pulgadas (RD), las grietas en $\text{m}^2/1000 \text{ m}^2$ (C), el parcheo en $\text{m}^2/1000 \text{ m}^2$ (P), la estimación del error estándar (SEE) y el número de secciones (n) utilizadas (AASHO, 1962).

$$PSI = 5,03 - 1,91 \text{ Log } (1 + SV) - 1,38 RD^2 - 0,01 (C + P)^{0,5} \quad 3-18$$

Con $R^2=0,84$ $SEE=0,38$ $n=74$

En la prueba AASHO no existió información relacionada con valores de PSI mayores a 4,4, lo que hace muy incierta una extrapolación para este rango. Además los valores de serviciabilidad inferiores a 1.5 fueron retirados de los datos de la prueba, por lo que esta

expresión no debe considerarse para representar un mínimo absoluto (Hall y Correa, 1999).

Peterson (1987) realizó un análisis de la ecuación y encontró que presenta una fuerte correlación con la rugosidad mediante la cual se puede explicar el 81% de la varianza y que los otros deterioros solo aportan un 3%. Además, de forma individual el agrietamiento y los baches presentan una alta correlación con el PSI con valores de coeficiente de regresión del orden de 0,62; para el caso del ahuellamiento la correlación es menor con coeficiente de correlación de 0,16. Para el caso del SV el coeficiente de regresión es de 0,90 con respecto al ahuellamiento y para el agrietamiento es de 0,65. En la prueba AASHO la serviciabilidad del pavimento es en gran parte una función de la rugosidad en donde el perfil superficial de la carretera es el que más logra influenciarlo.

Basado en estos resultados, Paterson (1987) propuso que era deseable evaluar la serviciabilidad en términos de la rugosidad del pavimento sin la intervención de los deterioros superficiales y utilizar las estimaciones de los deterioros para calcular el IRI en m/km.

En la actualidad el indicador que evalúa la condición del perfil longitudinal de la carretera es el Índice de Regularidad Internacional (International Roughness Index – IRI), que es una medida del desempeño del pavimento basándose en consideraciones de la calidad del desplazamiento. El IRI es el resultado de la aplicación de un modelo matemático que simula el movimiento vertical relativo acumulado de la masa superior de 1/4 de carro, causado por las variaciones de la magatextura al recorrer el perfil longitudinal de la carretera a 80 km/h (Huang, 1993).

3.5.2. Modelos matemáticos con base en el IRI

Zhou y Wang (2008) demostraron que los cambios incrementales del valor de IRI en el tiempo están directamente relacionados con los deterioros característicos de un

pavimento como ahuellamiento, grietas por fatiga, etc. Además los estudios más recientes han mostrado que el valor inicial del IRI se reconoce como un factor clave que impacta la evolución de la rugosidad de los pavimentos (Sayers, 1985; Sun y Deng, 1998; Zhou y Wang, 2008). El IRI puede calcularse desde datos de elevación superficial recolectados por trabajos de nivelación topográfica o por perfilómetros mecánicos.

Como se mencionó antes, la serviciabilidad (PSI) presenta una correlación con el valor rugosidad medido en términos de IRI. Para la definición de este modelo se ha encontrado que las funciones de tipo no lineal entregan las mejores correlaciones (Prozzi, 2001). Existe un grupo de modelos que permiten calcular la serviciabilidad en base al valor del IRI (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Modelos matemáticos para el cálculo del PSI basados en el valor del IRI para pavimentos flexibles.

Autor	Año	Ecuación
Paterson	1987	$PSI = 5 e^{(-0,18 IRI)}$
Al-Omari y Darter	1994	$PSI = 5 e^{(-0,24 IRI)}$
Hall y Muñoz	1999	$PSI = 5 - 0,2397X^4 + 1,771X^3 - 1,4045X^2$ $- 1,5803X$ $X = \log(1 + sv)$ $sv = 2,2704(IRI)^2$
Gulen	1994	$PSI = 4,8 - 6,36\log(IRI)$
Dujisin	1995	$PSI = 5,85 - 1,68(IRI)^{0,5}$
de Solminihac et al.	2003	$PSI = 5,671 - 1,714(IRI)^{0,5}$

Las ecuaciones desarrolladas por Paterson (1987) y Al-Omari and Darter (1994), se obtuvieron a partir de datos provenientes del proyecto NCHRP 1-23. Al modelo de Al-Omari y Darter se le adicionaron algunos datos de Indiana. La mayor desventaja de la base de datos utilizada para la calibración del modelo es que la información no contenía

valores de PSI mayores a 4,5 ni de IRI menores a 0,5 m/km, lo que hace que ambas expresiones desarrolladas a partir de datos de la prueba AASHO no se recomienden para valores de PSI mayores a 4,4 y de IRI menores a 1,5 (Hall y Correa, 1999).

La ecuación desarrollada por Paterson se ajustó con datos que provinieron del estudio realizado en Brasil, Sudáfrica y Pensilvania (Al-Omari y Darter, 1994), los cuales posteriormente permitieron el desarrollo de los modelos de comportamiento utilizados por Morosiuk (1996, 1998, 1999). El modelo desarrollado por Hall y Correa (1999), se utilizó para analizar la correlación entre la variación de la pendiente longitudinal (SV) y los valores de PSI usando los datos del ensayo de carreteras de la AASHO, así como también analizar la correlación entre el valor de SV y el IRI.

4. INTERACCIÓN ENTRE MÉTODOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS Y MODELOS DE COMPORTAMIENTO

En los primeros capítulos de esta tesis se evidenció las diferencias entre los métodos de diseño de pavimentos y se planteó la interacción entre la teoría y el empirismo como una forma de analizar el desempeño de una estructura de pavimento.

Este capítulo presenta algunos trabajos que se han desarrollado con el objeto de lograr la interacción entre los métodos de diseño estructural de pavimentos y los modelos de comportamiento que buscan mejorar la predicción del desempeño de la estructura a lo largo de la vida útil.

También se argumenta la posibilidad de interacción de los métodos de diseño empírico como es el caso de la guía de diseño AASHTO-93 y los modelos de deterioro empíricos analizados en el capítulo anterior, con un enfoque similar al que se utiliza cuando se combinan los conceptos mecanicistas del diseño con el empirismo de los modelos de comportamiento.

4.1. Interacción entre método de diseño mecanicista y modelo de comportamiento empírico

El método de diseño mecánico-empírico modela las cargas del tránsito en forma de presión de contacto sobre el pavimento, a través de ellas determina tensiones y deformaciones que son utilizadas para establecer ecuaciones de fatiga, que luego se verifican empíricamente a través de pruebas a escala (Accelerated Pavement Testing - APT) y estudios de información estadística de proyectos reales (Long Term Pavement Performance - LTTP). De esta manera conjuga la respuesta mecanicista del pavimento frente a las solicitaciones de cargas y condiciones climatológicas con los modelos de deterioro empírico, convirtiéndose en la herramienta más contemporánea para el diseño

de pavimentos de asfalto (Austroads, 2004, French Design Manual, 1997; IRC, 2001; NCHRP, 2008; Shell, 1978; Theyse et al., 1996).

Desde la década de 1960 hasta 1993 todas las versiones de la guía de diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO se basaron en ecuaciones de desempeño empíricas desarrolladas en la prueba AASHO. Con la publicación de la Guía de Diseño AASHTO-86 se reconoció la necesidad y beneficios de un procedimiento basado en un enfoque mecanicista para el diseño de pavimentos. Para satisfacer esta necesidad AASHTO en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA) y la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), patrocinaron durante la década de los años 90 un estudio para desarrollo de una metodología de diseño de pavimento mecánico empírico con el nombre NCHRP 1-37A que dio origen al Mechanistic Empirical Pavement Design Guide ME-PDG (AASHTO, 2008).

4.1.1. Método de diseño mecánico-empírico de pavimentos AASHTO-2008

En este método de diseño el indicador de desempeño deja de ser la serviciabilidad y pasa a ser la rugosidad. El modelo permite el cálculo del IRI como una función del valor de IRI inicial (IRI_0) con el cual se da al servicio el corredor y de algunos deterioros. El modelo matemático que pronostica el comportamiento del pavimento según la versión actual del MEPDG (AASHTO, 2008) se define como:

$$IRI = IRI_0 + 0,0150 (SF) + 0,400 (FC_{Total}) + 0,0080 (TC) + 40,0 (RD) \quad 4-1$$

En donde: FC_{Total} = área de grietas de fatiga (combinación de grietas de cocodrilo, grietas longitudinales y grietas de reflexión bajo la trayectoria de la rueda), en porcentaje de la superficie total del carril; TC = longitud del agrietamiento transversal en pies por milla, y RD = profundidad promedio del ahuellamiento medido en pulgadas. El término SF se define como:

$$SF = AGE \{0,02003 (PI + 1) + 0,007947 (Precip + 1) + 0,000636 (FI + 1)\} \quad 4-2$$

Dónde:

- AGE = Edad del pavimento, en años
- PI = Índice de plasticidad del suelo en porcentaje.
- Precip = Promedio anual de precipitación o lluvias en pulgadas.
- FI = Índice promedio anual de congelamiento.

En general se requieren grandes esfuerzos para la validación y calibración del modelo de comportamiento con el objeto de mejorar su precisión. Solo una pequeña fracción de la base de datos del LTPP (Long-Term Pavement Performance) pudo utilizarse en su calibración (NCHRP, 2008). Además, el modelo de IRI exhibe múltiples tipos de sesgo, debidos a la heterogeneidad e incorrectas suposiciones en el proceso de implementación del modelo (Aguilar-Moya, Prozzi & Fortier Smit, 2011).

Delgadillo et al. (2011) desarrollaron una investigación en la cual se plantea los requerimientos necesarios para la adaptación de la guía de diseño en países de América Latina y como principales conclusiones proponen:

- Se requiere la adquisición de datos de entrada para el modelo que implica grandes esfuerzos para desarrollar las bases de datos necesarias para el método. Los datos climatológicos no están disponibles para el investigador y la información con la que se cuenta está limitada exclusivamente a zonas aeroportuarias donde se encuentran las estaciones climatológicas.
- Se requiere desarrollar versiones del software MEPDG que puedan utilizarse en regiones diferentes de América del Norte, que incluyan la posibilidad de añadir nuevas estaciones climatológicas para evitar la necesidad de modificar las estaciones existentes, además incorporar una opción para el análisis del Hemisferio Sur que elimine la necesidad de un retraso artificial de 6 meses para los datos

meteorológicos, situación que solo se puede asimilar en los países del sur del continente.

- La caracterización y parametrización del cemento asfáltico y las mezclas asfálticas requeridas por el método de diseño no están disponibles en todos los países de América latina y sólo algunos países como Chile pueden contar con esta información.
- Se requiere de inversión en equipos que no están ampliamente disponibles en los países de América Latina para la caracterización de materiales.
- Se requiere la calibración de modelos de comportamiento.
- Se requiere el desarrollo de espectros de carga para el diseño de segundo nivel, además las distribuciones de eje de carga predeterminadas en el MEPDG no son aplicables a la realidad específica de Chile y América latina.

El análisis de confiabilidad que desarrolla MEPDG, se realiza a través de una simple evaluación del error estándar global del deterioro predicho, comparado con el deterioro observado en secciones tomadas desde la base de datos del LTPP (Long-Term Pavement Performance), en lugar de parámetros de entrada específicos del sitio que inducen tal incertidumbre en las predicciones del deterioro (Thyagarajan et al., 2011)

Comparaciones realizadas entre el método de diseño propuesto por la guía NCHRP en su proyecto 1-37A y el método de diseño empírico AASHTO-93 encontraron que el método AASHTO-93 sobre-estima el desempeño subestimando el deterioro sobre todo en lugares cálidos y con niveles de tránsito altos. Además las tendencias del desempeño para ambas metodologías son similares y los resultados de los dos modelos son ampliamente consistentes con lo observado históricamente en los pavimentos diseñados con la guía AASHTO-93 (Carvalho & Schwartz, 2006; Saldaña Marulanda, 2013).

En conclusión, si bien el método de diseño AASHTO-93 posee restricciones a causa de su concepción, en especial con el número de ejes equivalentes que puede soportar un

pavimento y las características de los materiales que pueden ser utilizados en el diseño. Posee una historia de más 50 años, en la cual se ha encontrado un adecuado desempeño de las estructuras que se diseñan a través de dicho método. En este trabajo de investigación no se desconoce que la ingeniería de pavimentos debe orientarse al desarrollo e implementación de un método de diseño empírico-mecanicista, pero tampoco deja de lado que su aplicación no es una tarea fácil de lograr, más aún en países en vía de desarrollo, razón por lo cual hasta hoy ningún investigador se arriesga a establecer el momento en el que el método AASHTO-93 dejará de ser utilizado. En base a estos razonamientos se propone este trabajo de investigación, tratando de mejorar la incertidumbre que presenta el método de diseño, a través de modelos de comportamiento que han sido calibrados a nivel local y de cuales se tiene mayor conocimiento en contraste con los utilizados por el método AASHTO-2004, mejor conocido como MEPDG.

4.1.2. Interacción entre el método de diseño mechanicista y los modelos de comportamiento propuestos por Morosiuk.

Los modelos de deterioro también han sido integrados a los métodos de diseño en experiencias desarrolladas en Nueva Zelanda, en donde se utilizaron los modelos de comportamiento propuestos por Morosiuk (1996, 1998, 1999), en conjunto con el método mechanicista descrito en la guía de diseño para pavimentos AUSTROADS y su complemento para este país (Patrick y Bailey, 2003).

En base a ellos, Patrick y Bailey (2003), realizaron un estudio sobre 79 secciones de carreteras a las que se les estableció periódicamente el daño reflejado en la superficie, al igual que el tránsito vehicular y características mecánicas de los materiales que componían el pavimento hasta el momento en que se debió desarrollar la rehabilitación de la estructura. A partir de modelaciones realizadas con el software de análisis

mecanicista CIRCLY (Wardle y McNabb, 2014), el uso del programa HDM III (Banco Mundial, 2014) y siguiendo las especificaciones de las AUSTROADS, concluyeron que:

- Se presenta una buena correlación entre los valores de rugosidad estimados con el programa HDM-III y los datos de rugosidad medidos en terreno, con un valor de R^2 de 0,58.
- El uso del modelo de progresión de rugosidad utilizado por el programa HDM-III “es una poderosa herramienta que complementa el diseño mecánico de pavimentos, especialmente para determinar la razón de cambio de los deterioros” en los periodos analizados.

De otro lado, de Solminihac et al. (2002), desarrollaron la calibración de nivel 2, que corresponde a calibración de las relaciones primarias de los modelos de comportamiento propuestos por Morosiuk (1996, 1998, 1999) para las condiciones locales de Chile, encontrando que las predicciones hechas por los modelos se ajustaban satisfactoriamente al valor de los deterioros medidos en campo, “con valores significativos de correlación superiores a 0,5”. En donde el error medio de la estimación, resultó similar al error asociado a las mediciones.

De acuerdo a Patrick y Bailey (2003) y a de Solminihac et al. (2002), para esta investigación se consideran satisfactorios valores de correlación (R^2) superiores a 0,5. Además, concluyen que los resultados de la calibración del modelo de rugosidad predicen el deterioro de una estructura en forma satisfactoria y de que complementan el diseño de estructuras de pavimentos.

4.1.3. Interacción entre el método de diseño empírico AASHTO-93 y modelos de comportamiento empíricos

En base a lo anterior, es posible plantear la evaluación del comportamiento de pavimentos flexibles que han sido diseñados utilizando la guía de diseño AASHTO-93

por medio de modelos de comportamiento empírico como los propuestos por Morosiuk (1996, 1998, 1999), como una manera de:

- Evaluar la capacidad para relacionar los métodos de diseño y los modelos de comportamiento para el beneficio del desempeño del pavimento.
- Calibrar el método de diseño para comprobar razonablemente el funcionamiento de la estructura diseñada, bajo la aplicación de cargas reales de tránsito y medio ambiente cuando se encuentra en operación.
- Evaluar el impacto que sobre el desempeño propuesto en el diseño, tiene las técnicas utilizadas en el proceso constructivo.
- Minimizar la probabilidad de sub y sobre estimación de la vida útil en una estructura del pavimento.
- Evaluar si algunos parámetros del diseño pueden ajustarse o no como es el caso de la confiabilidad.

La utilización del método de diseño AASHTO-93, si bien conserva desde su origen inconvenientes para la aplicación fuera de la zona en donde se desarrolló, aún sigue siendo el método más usado en países en desarrollo y no se tiene establecida con claridad la fecha de su retiro. Al complementar este método con los modelos de comportamiento calibrados a nivel local, brinda la posibilidad de ajustar la incertidumbre inherente del método diseño, de tal manera que las estructuras diseñadas mediante su uso mejoren la confiabilidad de su desempeño.

5. CONCEPTOS GENERALES EN RELACIÓN A LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD

Este capítulo presenta en primera instancia una mirada determinista a la solución de la variabilidad en el diseño, para luego introducir el enfoque basado en el riesgo y definir factores que toman en cuenta la variabilidad de la vida de diseño y de la vida útil. Finalmente explica el método utilizado para realizar el análisis de confiabilidad.

5.1. Conceptos generales sobre confiabilidad

El diseño de ingeniería consiste en proporcionar los elementos necesarios para que un sistema satisfaga diferentes criterios de desempeño (seguridad, serviciabilidad, durabilidad, etc.) bajo distintos tipos de demanda. Por ejemplo, el pavimento de una carretera debe diseñarse para que su resistencia sea mayor que los efectos de las cargas del tránsito aplicadas sobre él. Sin embargo hay muchas fuentes de incertidumbre en los parámetros que definen tanto la carga como la resistencia.

La teoría de confiabilidad define la carga como demanda y la resistencia como la oferta. En esta tesis la demanda se asocia a la duración de la vida útil, que es el tiempo de servicio de la estructura evaluado a través de los modelos de comportamiento. La oferta se asocia a la duración de la vida de diseño de la estructura calculada a través del método de diseño estructural, ambas medidas en número de ejes equivalentes. La vida útil y la vida de diseño finalizan cuando el pavimento alcanza la serviciabilidad final especificada.

La Figura 5-1 representa el caso en el que se consideran dos variables, una la demanda sobre un sistema (Vida útil, S), y la oferta del sistema (Vida de diseño, R). Ambas variables S y R , son aleatorias por naturaleza y quedan caracterizadas respectivamente por las funciones de densidad de probabilidad (fdp) $f_S(s)$ y $f_R(r)$, que se asumen

normales para desarrollar el análisis, sus medias (μ_S y μ_R) y desviaciones estándar (σ_S y σ_R).

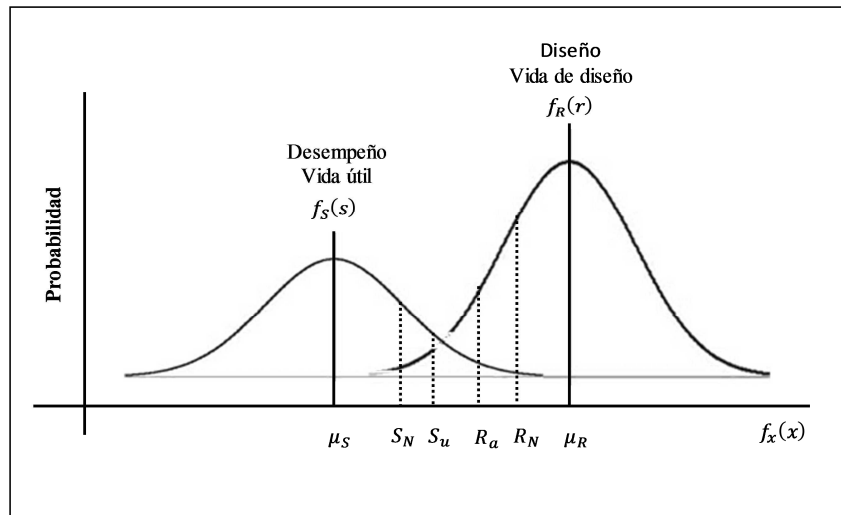


Figura 5-1 Fundamentos de la evaluación del riesgo en el diseño estructural de pavimentos.

(Haldar y Mahadevan, 2000)

En un enfoque determinista el diseño confiable se alcanza asegurando que la vida de diseño nominal (R_N) sea mayor que la vida útil nominal (S_N) ($R_N > S_N$).

El valor de vida de diseño nominal R_N es un valor establecido como una, dos o hasta tres desviaciones estándar menor que el valor de la media. La vida útil nominal S_N es un valor que se establece sumando a la media varias desviaciones estándar (Figura 5-1), de tal manera que:

$$S_F = \frac{R_N}{S_N} \quad 5-1$$

Dónde: S_F es el Factor de Seguridad Nominal.

Los valores nominales vida de diseño y vida útil introducidos en el diseño mediante la forma de un factor de seguridad nominal, dependen de la incertidumbre de la vida útil y la vida de diseño, así como también de la subjetividad con que fueron seleccionados por el diseñador. Lo que puede llevar al factor de seguridad nominal a fallar al procurar cubrir el diseño con un margen de seguridad real.

En un diseño determinista el factor de seguridad nominal puede aplicarse a la vida de diseño, a la vida útil o a ambos. De tal manera que:

- El valor de R_N se divide por un factor de seguridad para calcular la resistencia admisible R_a , en donde un diseño seguro requiere que se cumpla la condición $S_N < R_a$.
- S_N se multiplica por un factor de carga para obtener la carga última S_u y el diseño seguro requiere cumplir la condición de que $S_u < R_N$.
- Algunos métodos de diseño utilizan el concepto de factores de seguridad aplicados en forma simultánea a la demanda y oferta (Load and Resistance Factor Design LRFD), en donde el factor de reducción de la capacidad es menor a uno y el factor de demanda mayor a uno.

La probabilidad de falla estará definida por la probabilidad de que se presente el evento en donde la vida de diseño nominal (R_N) sea menor que la vida útil nominal (S_N), condición que solo puede presentarse en el área de traslapo que comparten las dos funciones $f_S(s)$ y $f_R(r)$ de la Figura 5-1. El área de traslapo provee una medida cualitativa de la probabilidad de falla y su magnitud depende de tres factores:

- La posición relativa entre las dos curvas: Cuando las dos curvas se alejan una de la otra se reduce la zona de traslapo por lo tanto la probabilidad de falla decrece. La posición de cada curva puede representarse por sus respectivos valores medios (μ_S y μ_R).

- La dispersión de las dos curvas: Si las curvas que describen la demanda y la capacidad presenta formas leptocúrticas (mas puntiaguda que la distribución normal), generan una pequeña zona de traslapeo y por lo tanto la probabilidad de falla será pequeña. La dispersión puede caracterizarse por medio de las desviaciones estándar (σ_S y σ_R) de las dos variables.
- La forma de las dos curvas: La forma está representada por las funciones de densidad de probabilidad para cada variable aleatoria $f_S(s)$ y $f_R(r)$, que en la figura 5-1 se sumen normales.

El enfoque convencional del diseño determinista alcanza su objetivo desplazando la posición de las curvas por medio del uso de factores de seguridad. Un enfoque más racional puede ser calcular el riesgo evaluando los tres factores de traslapeo y seleccionar el valor de las variables de diseño de tal manera que se alcance un aceptable riesgo de falla. Este es el fundamento del concepto de diseño basado en el riesgo, cuyo detalle será expuesto a continuación.

5.2. El diseño basado en el riesgo

En lugar de usar el factor de seguridad nominal para vida de diseño nominal (R_N) o uno para vida útil nominal (S_N), como se explicó antes, es más racional aplicar los factores de seguridad a ambos como se hace en el concepto LRFD (Load and Resistance Factor Design). Por lo tanto el factor nominal de reducción de la vida de diseño y el factor nominal de vida útil se expresen en términos de $\phi R_N \geq \gamma_{S_N}$ (Haldar y Mahadevan, 2000).

$$\phi = \frac{(1-\epsilon\beta\delta_R)}{(1-k_R\delta_R)} \quad 5-2$$

$$\gamma = \frac{(1+\epsilon\beta\delta_S)}{(1+k_S\delta_S)} \quad 5-3$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}{\sigma_R + \sigma_S} \quad 5-4$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\varepsilon(\sigma_R + \sigma_S)} \quad 5-5$$

Dónde:

- $\delta_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R}$ y $\delta_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S}$
- β : Riesgo
- $\phi - \gamma$: Factor de reducción de resistencia - Factor de carga, respectivamente.
- $\sigma_R - \sigma_S$: Desviación estándar, para la oferta y demanda respectivamente.
- $\mu_R - \mu_S$: Media, para la oferta y demanda respectivamente
- $k_R - k_S$: Coeficiente que permite establecer los valores nominales para la oferta y la demanda respectivamente.
- $\delta_R - \delta_S$: Coeficiente de variación para la oferta y demanda respectivamente.

Las anteriores expresiones transmiten mayor información en comparación con los factores homólogos calculados bajo el concepto determinista. En estas ecuaciones la presencia de β representa el riesgo que es capaz de aceptar la estructura de pavimento que está siendo analizada. Un valor de β grande indica un riesgo aceptable pequeño, lo que indica un diseño conservador debido al uso de un valor pequeño de ϕ o un valor alto de γ . Las expresiones también indican que estos factores dependen de la incertidumbre de la resistencia δ_R y la carga δ_S , así como también de qué tan conservador fue el valor nominal de la capacidad y de la demanda, el cual está evaluado por los términos k_R y k_S , respectivamente. El valor ε , toma en cuenta la incertidumbre en la definición de las variables de la capacidad y la demanda que actúan sobre la estructura del pavimento.

5.3. Fundamento conceptual del análisis de confiabilidad (Haldar y Mahadevan, 2000)

Para desarrollar un análisis de confiabilidad o de probabilidad de falla en una estructura de pavimento lo primero que debe definirse es el criterio de desempeño, las variables aleatorias básicas de demanda y capacidad (R, S) y la relación entre ellas que definen matemáticamente la función de desempeño (Ecuación 5-6):

$$Z = R - S$$

5-6

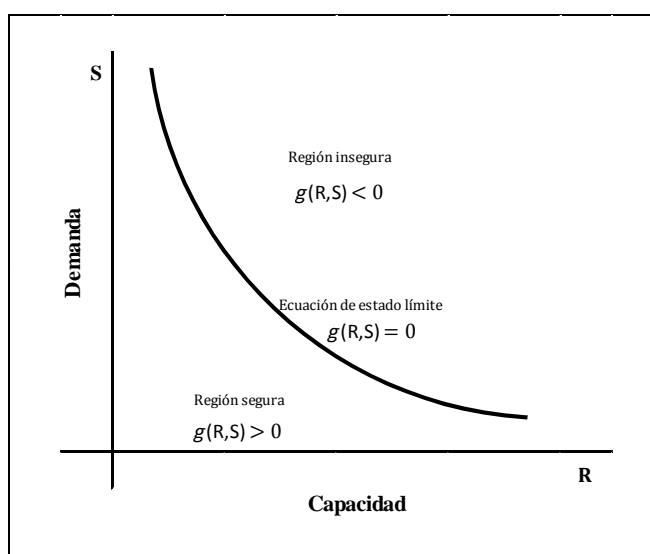


Figura 5-2 Concepto de estado límite en el análisis de confiabilidad aplicado al diseño estructural de pavimentos.

(Haldar y Mahadevan, 2000)

El conjunto de valores que pueden tomar las variables aleatorias R y S , llevan a que la solución de la Ecuación 5-6, tome valores que sean mayores o menores de cero; cuando son menores de cero se considera que la estructura ha fallado, ya que las cargas

superaron la resistencia. Existen un conjunto de valores en el que la respuesta de la Ecuación 5-6 es cero ($Z = 0$) y el sistema se considera en equilibrio, y representa la frontera entre la zona segura e insegura dentro del conjunto de todas las posibles respuestas de la función de desempeño (Figura 5-2). A esta frontera se le conoce como superficie de falla o estado límite de interés. Esta superficie también puede definirse como el estado más allá del cual la estructura ya no es capaz de cumplir la función para la cual fue diseñada.

La ecuación de estado límite $Z = R - S = 0$ juega un rol importante en la definición de los métodos de análisis de confiabilidad. Puede ser una función explícita o implícita de variables aleatorias básicas y define el tipo de método que debe implementarse para solucionar el problema. Se sabe que la falla ocurre cuando $Z < 0$, entonces la probabilidad de falla se expresa como:

La ecuación de estado límite $Z = R - S = 0$ juega un rol importante en la definición de los métodos de análisis de confiabilidad. Puede ser una función explícita o implícita de variables aleatorias básicas y define el tipo de método que debe implementarse para solucionar el problema. Se sabe que la falla ocurre cuando $Z < 0$, entonces la probabilidad de falla se expresa como:

$$P_F = \int \int_{g(R,S) < 0} f_X(R,S) dr ds \quad 5-7$$

En la cual $f_X(R,S)$ es una función de densidad probabilidad conjunta de las variables aleatorias básicas R y S . La integral se desarrolla dentro de la zona de traslapo de la Figura 5-1, es decir $g(R,S) < 0$.

La probabilidad de falla calculada mediante la Ecuación 5-7 se considera como la ecuación fundamental del análisis de confiabilidad. La evaluación de la función de densidad de probabilidad conjunta es compleja de obtener, incluso si se conoce las características de las distintas funciones aleatorias básicas, por lo cual se requiere de una

aproximación analítica de la integral que es más simple de obtener. Estos métodos se agrupan en dos tipos llamados (Hohenbichler, Gollwitzer, Kruse & Rackwitz, 1987):

- Métodos de confiabilidad de primer orden (First-Order Reliability Methods, FORM).
- Métodos de confiabilidad de segundo orden (Second-Order Reliability Methods, SORM).

La función que describe el estado límite de interés puede ser una función lineal o no-lineal de variables aleatorias básicas. El método FORM se utiliza para evaluar la Ecuación 5-7 cuando la función de estado límite es una función lineal de variables normales no correlacionadas o cuando la función de estado límite es no lineal y se representada por aproximaciones lineales de primer orden de variables normales equivalentes. El método SORM estima la probabilidad de falla de la función de estado límite lineal o no lineal, mediante aproximaciones de segundo orden, conformada por variables no-normales correlacionadas.

En vista a que las variables aleatorias básicas corresponden a variables aleatorias no correlacionadas, esta investigación usará el método FORM para desarrollar la aproximación analítica de la integral y calcular el valor P_F .

5.4. Métodos de confiabilidad de primer orden (FOSM)

Estos métodos se dividen en dos: métodos de primer orden segundo momento (First-Order Second-Moment FOSM), que no toman en cuenta para la solución del problema la información que pueda suministrar la distribución de la función que describe las variables aleatorias básicas y los métodos avanzados de primer orden segundo momento (Advanced First-Order Second-Moment AFOSM) que usan apropiadamente la información de la distribución de la función que describe las variables aleatorias básicas (Tu, Choi, & Park, 1999).

5.4.1. Método avanzado de primer orden segundo momento para variables normales (Advanced First-Order Second-Moment AFOSM).

Las deficiencias del método de primer orden segundo momento (First-Order Second-Moment FOSM) fueron estudiadas y superadas con la aparición del método avanzado de primer orden segundo momento (Advanced First-Order Second-Moment AFOSM) llamado también como el método de Hasofer-Lind, (1974).

Se aplica a variables normales no correlacionadas y utiliza un cambio del sistema de coordenadas al pasar de uno normal a otro reducido, convirtiendo las variables aleatorias en variables normales estándar, es decir con media cero y desviación estándar uno. Esta transformación de coordenadas se realiza a través de la siguiente expresión (Haldar & Mahadevan, 2000):

$$X'_i = \frac{(X_i - \mu_i)}{\sigma_{X_i}} \quad 5-8$$

Esta transformación permite convertir la función de desempeño de normal a normal estándar, en donde X'_i representa la variable normal estándar en el sistema de coordenadas reducido, transformando la función de estado límite $g(X) = 0$ en el sistema de coordenadas original $g(X') = 0$ en el sistema de coordenadas reducido. La distancia mínima desde el origen de coordenadas reducidas a la superficie de estado límite se llama índice de seguridad β_{HL} y se expresa como:

$$\beta_{HL} = \sqrt{(x'^*)'(x'^*)} \quad 5-9$$

El valor β_{HL} , permite localizar sobre la función de estado límite el punto de diseño, que corresponde a aquella posición en la que la combinación de las variables aleatorias básicas R y S ocasionan que $Z < 0$ o la falla del sistema, y que se define por el vector x^* en el sistema de coordenadas original y por x'^* en el sistema de coordenadas reducidas. Consideremos la función de estado límite:

$$Z = R - S \quad 5-10$$

Realizando el cambio de coordenadas con base en:

$$R' = \frac{(R - \mu_R)}{\sigma_R} \quad 5-11$$

$$S' = \frac{(S - \mu_S)}{\sigma_S} \quad 5-12$$

Remplazando las ecuaciones 5-11 y 5-12 en la ecuación 5-10, se obtiene:

$$g(R, S) = \sigma_R R' - \sigma_S S' + \mu_R - \mu_S = 0 \quad 5-13$$

La Figura 5-3 presenta la función de estado límite en los sistemas de coordenadas originales (a) y reducidas (b).

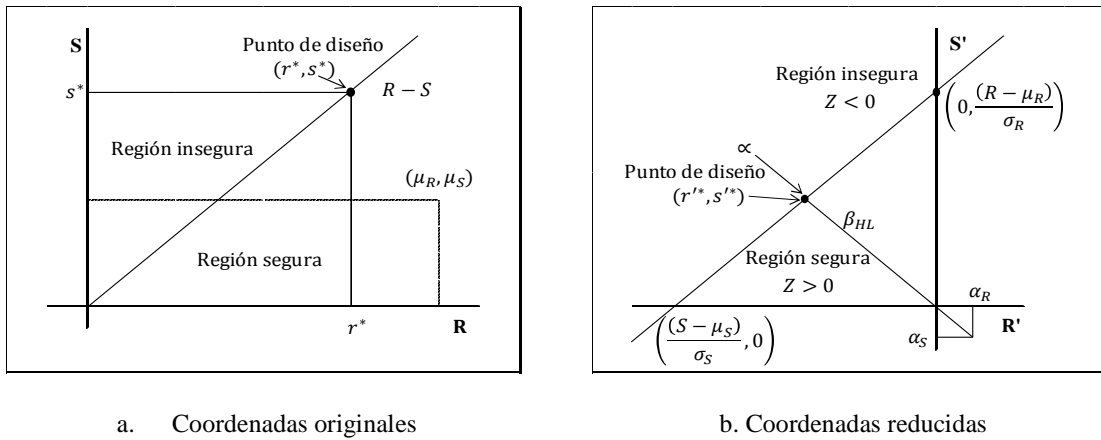


Figura 5-3 Índice de confiabilidad de Hasofer-Lind en funciones de desempeño lineal.

(Haldar y Mahadevan, 2000)

La ubicación de la línea de estado límite es un indicador de la confiabilidad del sistema, ya que si se encuentra cerca al origen el área insegura es más grande y por lo tanto la confiabilidad es baja, lo contrario sucede si se encuentra alejada. La distancia desde el

origen de coordenadas reducidas al punto de diseño puede calcularse trigonométricamente y expresarse como:

$$\beta = \frac{(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad 5-14$$

Esta distancia hace referencia al índice de confiabilidad o índice de seguridad, que para el caso en el que la función de estado límite es lineal y las variables aleatorias R y S son distribuciones normales se representa de la misma forma del método MVFOSM (Mean Value First-Order Second-Moment).

En muchos casos la función de estado límite $g(X') = 0$ no es una función lineal, sino que corresponde a una función no-lineal como se muestra en la Figura 5-4, donde $g(X') > 0$ representa la zona segura y $g(X') < 0$ la zona insegura. En la figura el valor β_{HL} representa el índice de confiabilidad de Hasofer-Lind que es la menor distancia entre el origen de coordenadas y el punto de diseño X'^* sobre la función de estado límite en el sistema de coordenadas reducidas.

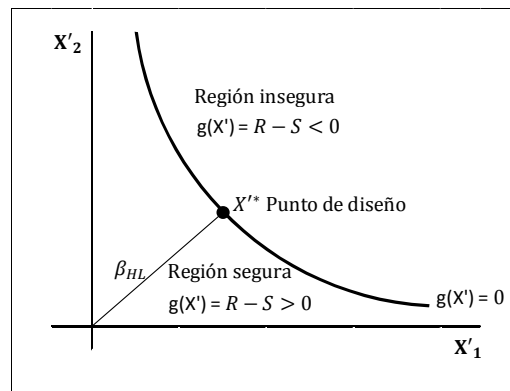


Figura 5-4 Índice de confiabilidad de Hasofer-Lind en funciones de desempeño no-lineal.

(Haldar y Mahadevan, 2000)

El punto de diseño se considera el más probable punto de falla del diseño y representa la peor combinación de las variables R y S como solución de la función $g(X')$.

Cuando la función de estado límite es no-lineal el procedimiento de cálculo de la distancia mínima o del valor β_{HL} se convierte en un problema de optimización, que se resuelve a través del uso de multiplicadores de Lagrange, obteniendo el valor de distancia mínima como:

$$\beta_{HL} = - \frac{\sum_{i=1}^n X_i'^* \left[\frac{\partial g}{\partial X_i'} \right]^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g}{\partial X_i'} \right]^{2*}}} = \Phi^{-1}(1 - P_F) \quad 5-15$$

En donde $\left[\frac{\partial g}{\partial X_i'} \right]^*$ es la i-ésima derivada parcial evaluada en punto de diseño en el sistema de coordenadas reducidas. Las coordenadas del punto de diseño están representadas por:

$$x_i'^* = -\alpha \beta_{HL} \quad i = (1, 2, 3, \dots, n) \quad 5-16$$

Dónde:

$$\alpha_i = \frac{\left[\frac{\partial g}{\partial X_i'} \right]^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g}{\partial X_i'} \right]^{2*}}} \quad 5-17$$

Los ángulos α_i representan los cosenos directores alrededor de los ejes coordenadas X_i' .

El punto de diseño en el sistema de coordenadas originales se expresa como:

$$x_i'^* = \mu_{X_i} - \alpha \sigma_i \beta_{HL} \quad 5-18$$

El algoritmo para el cálculo de β_{HL} consiste en realizar una aproximación lineal de la función de estado límite para cada punto de búsqueda y encontrar la distancia desde el origen de coordenadas a la función de estado límite. De forma inicial el algoritmo supone un punto de diseño que corresponde a la media de las variables aleatorias, de esta manera el algoritmo continúa ejecutándose hasta converger.

5.4.2. Método AFOSM para variables no-normales.

El índice de Hasofer-Lind se relaciona exactamente con el índice de confiabilidad si todas las variables son estadísticamente independientes, normalmente distribuidas y la superficie de estado límite es lineal. Para situaciones diferentes el índice no entrega valores adecuados de la probabilidad de falla. Los trabajos desarrollados por Rackwitz y Fiessler (1978) y Chen y Lind (1983) entre otros, lograron incorporar información sobre la distribución de las variables aleatorias en el algoritmo para funciones de estado límite lineal y no lineal.

No todas las variables básicas pueden representarse como funciones de densidad de probabilidad normal, reflejando una deficiencia del método de Hasofer-Lind, por lo cual se hace necesario convertir las variables no-normales en variables normales equivalentes, para lo cual puede usarse la transformación de Rosenblatt (Rosenblatt, 1952), que permite obtener un conjunto de variables normales estándar estadísticamente independientes si la función de distribución acumulada de todas las variables está disponible.

Esta aproximación permite calcular los parámetros de la variables normal equivalente (μ y σ), luego de lo cual el procedimiento de cálculo es similar al seguido cuando se tienen todas las variables normales, calculando el índice de probabilidad y la correspondiente probabilidad de falla.

5.5. Aplicación de método de análisis de confiabilidad a la ingeniería de pavimentos

Luego de la publicación de la guía de diseño AASHTO-93, se realizaron varios estudios que buscaron evaluar el concepto de confiabilidad que recién se había incorporado en el método de diseño. Además que la comunidad científica hiciera uso apropiado del

concepto y lo incorporara no solo en el diseño, sino también en la construcción, la evaluación y validación de los modelos de comportamiento del pavimento.

Todo lo anterior en base a que el concepto de confiabilidad surgido muchos años antes, hacia parte integral de desarrollos científicos en otras áreas del conocimiento distintas de la ingeniería de pavimentos (Pendleton, 1994; Brown, 1994).

El primer concepto que se trató de implementar fue el de analizar la confiabilidad en el diseño de pavimentos como la probabilidad de que este pudiera soportar el número real de aplicaciones de carga durante la vida de diseño mientras se mantenía su integridad estructural (Kulkarni, 1994).

Killingsworth y Zollinger (1995) evaluaron la sensibilidad de la respuesta del diseño como consecuencia de la variabilidad de los parámetros de entrada, estableciendo la importancia de disminuir la variabilidad de los datos de entrada y de identificar cuidadosamente los valores de confiabilidad como una manera de reducir la incertidumbre en el desempeño del pavimento.

También se han desarrollado simulaciones basadas en la técnica de Montecarlo que buscaron calcular valores de confiabilidad utilizando el método por aproximación de momentos en una función de estado límite generada para el método de diseño AASHTO-93 (Zhang & Damnjanović, 2006).

Una aplicación frecuente en la guía de diseño Mecánico Empírico MEPDG es la evaluación de la variabilidad de los parámetros de entrada que se requieren para el cálculo de la confiabilidad en el diseño de pavimento, tal como espectro de carga, los deterioros por agrietamiento y ahuellamiento (Haider et al., 2012), resistencia de la subrasante (Tarefder et al., 2010).

El método de diseño MEPDG incorpora conceptos básicos de confiabilidad mediante el cálculo del error que surge de comparar el deterioro predicho contra el deterioro observado en secciones del LTPP (Long-Term Pavement Performance) (Thyagarajan et

al., 2011). El análisis no se realiza en forma probabilística por lo cual se han desarrollado investigaciones que buscan incorporar este tipo análisis en el método de diseño MEPDG (Retherford & McDonald, 2010; McInvale et al., 2012). Además se han desarrollado estudios de costo efectividad para definir el espesor óptimo sin sacrificar la confiabilidad y para evaluar el desempeño de la estructura basado en la confiabilidad (Rajbongshi & Das, 2008; Choun & Le 2011).

6. METODOLOGÍA DE LA APLICACIÓN

Este capítulo describe el procedimiento propuesto para incorporar los conceptos teóricos del análisis de confiabilidad a la ingeniería de pavimentos, de tal manera que al relacionar el método de diseño con los modelos de comportamiento, disminuya la incertidumbre del desempeño estimado de un pavimento.

6.1. Confiabilidad aplicada a la ingeniería de pavimentos

En ingeniería de pavimentos la condición de una estructura se establece en términos de su desempeño que es evaluado a través de la condición funcional y estructural. La condición funcional permite determinar qué tan cómodo y seguro es el tránsito de los usuarios y si se mantiene sobre umbrales mínimos aceptables, lo que se conoce como serviciabilidad.

El diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de estructuras de pavimento reúnen factores que poseen variabilidad, como es el caso de la determinación del tránsito, las características mecánicas de los materiales, la calidad de los procesos constructivos, las condiciones climáticas, etc. Esta variabilidad no siempre es posible de cuantificar razón por la cual el pavimento puesto en servicio ve reducida la confiabilidad de su desempeño, afectando en forma directa su vida útil (Sharaf, Nouredin, Arafah & Al-Sugair, 1995). Bajo esta condición, la vida de diseño (T_{fo}) evaluado a través de la vida útil de un pavimento (T_{f2} ó T_{f1}) pueda considerarse como sobre o sub-estimado, dependiendo del resultado de comparar la vida de diseño y la vida útil (Figura 6-1).

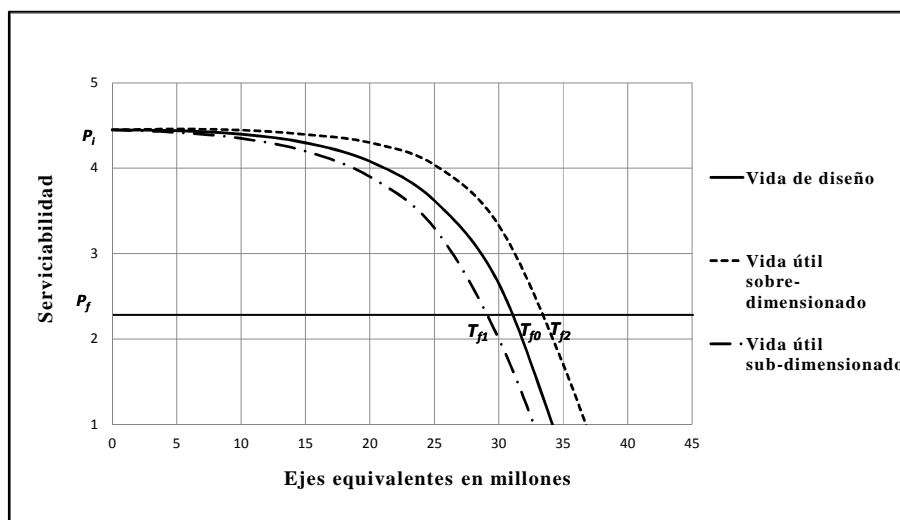


Figura 6-1 Concepto de sub y sobre dimensionamiento ocasionado por la variabilidad del tiempo de servicio de un pavimento definido en base PSI final.

Si se considera la variabilidad que interviene en las etapas de diseño y la operación de una estructura de pavimento, la vida de diseño y la vida de útil reflejarán algún grado de variabilidad que puede caracterizarse por medio de funciones de densidad de probabilidad (fdp) (Figura 6-2), descritas por su media (μ) y desviación estándar (σ). Además, el momento en el que se considera el final de la vida útil o de diseño se define cuando el pavimento alcanza el valor de serviciabilidad final.

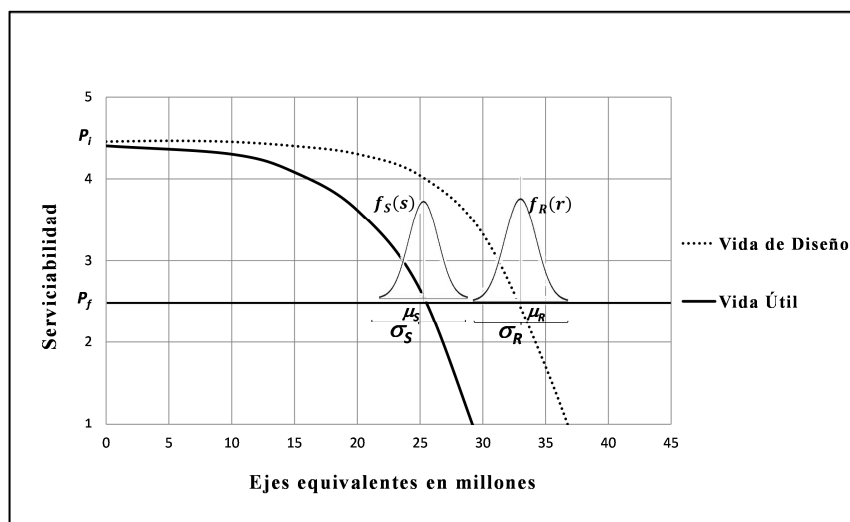


Figura 6-2 Variabilidad del tiempo de servicio de un pavimento analizado con base en la serviciabilidad

Si $f_R(r)$ representa la fdp que reúne todos los posibles valores que alcanza la vida de diseño y $f_S(s)$ representa la fdp que reúne todos los posibles momentos en los que se alcanza el fin de la vida útil, un diseño seguro estará definido por la probabilidad de que cuando las dos funciones se acercan el valor que tome la función $f_S(s)$ no supere el valor que tome la función $f_R(r)$. Cuando las dos funciones se acercan, generan una zona de traslapo en la cual esta condición puede o no suceder (Figura 6-3).

Las fdp que caracterizan a $f_R(r)$ y $f_S(s)$ se obtienen a partir de la simulación del método de diseño estructural y de modelos de comportamiento respectivamente, ambas pueden utilizarse para generar el análisis la confiabilidad que permita establecer la probabilidad de falla de la estructura y por lo tanto el valor de confiabilidad que debe utilizarse en el diseño del pavimento para garantizar que la vida útil $f_S(s)$ de la estructura esté lo más cerca posible de la vida de diseño $f_R(r)$, sin que se produzca la falla.

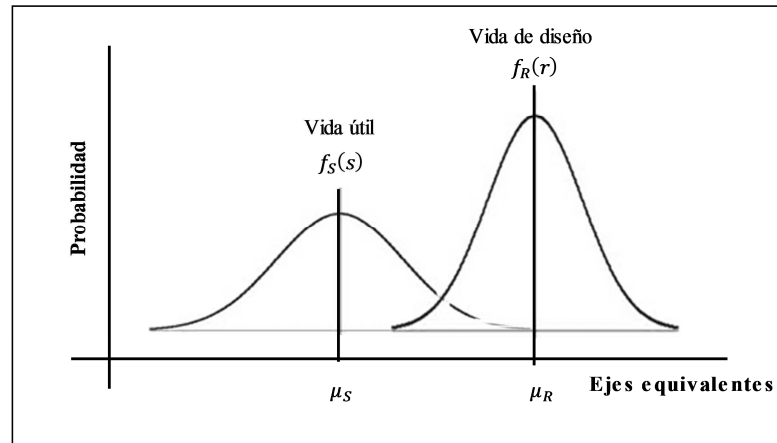


Figura 6-3 Concepto de confiabilidad en pavimentos

(Haldar y Mahadevan, 2000)

La zona de traslapo de las funciones $f_R(r)$ y $f_S(s)$ representa el espacio paramétrico de respuesta de la Ecuación 6-1 y que se denomina función de desempeño (Haldar & Mahadevan, 2000).

$$f_Z(z) = f_R(r) - f_S(s) \quad 6-1$$

Los diferentes valores que pueden tomar las variables aleatoria de la Ecuación 6-1, permiten que el conjunto de respuestas que dan solución a la ecuación, se divida en dos áreas dentro de la zona de traslapo, una en donde la combinación de la funciones entregan valores donde $f_Z(z) > 0$ y otra en el que $f_Z(z) < 0$. El primero representa un diseño exitoso y el segundo la falla del diseño. Ambas zonas están limitadas por una frontera en la que $f_Z(z) = 0$, que se denomina superficie de falla o estado límite de interés, definida como el estado más allá del cual una estructura no es capaz de cumplir la función para la cual fue diseñada y que se define por medio de la Ecuación 6-2. En esta frontera se encuentra el valor que optimiza el diseño.

$$f_Z(z) = f_R(r) - f_S(s) = 0 \quad 6-2$$

Las funciones de densidad de probabilidad $f_R(r)$ y $f_S(s)$ se definen dentro del análisis de probabilidad como funciones aleatorias básicas y juegan un rol importante en la definición del método de análisis de confiabilidad que debe usarse para llevar adelante el estudio, como se mostrará más adelante.

6.2. Definición de la función de desempeño

El análisis de confiabilidad requiere la definición de la función de desempeño (Ecuación 6-1), para lo cual esta investigación propone que la variable aleatoria básica $f_R(r)$ se obtenga a partir de la simulación del método de diseño estructural AASHTO-93 y la variable aleatoria básica $f_S(s)$ a partir de la simulación del PSI utilizando la expresión desarrollada por Al-Omari y Darter (1994), donde el valor del IRI se calcula en base a los resultados de la simulación de los modelos matemáticos de comportamiento desarrollados en los trabajos de Paterson (1987), Riley y Bennett (1995,1996), Watanatada et al. (1987) y NDLI (1995), publicados por Morosiuk (1996-1998a).

6.2.1. Vida de diseño $f_R(r)$

La función de densidad de probabilidad conjunta que representa la vida de diseño se define mediante la simulación de la fórmula del método de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles (Ecuaciones 2-2) (Huang, 1993).

Para lograr simular esta ecuación, se requiere que las variables aleatorias de entrada se caractericen como fdp, lo que se establecen con base en un test de bondad de ajuste de datos tomados en campo. Los parámetros y constantes corresponden a valores recomendados por la guía de diseño AASHTO-93. La ecuación entrega como salida un valor determinista del número de ejes equivalentes de 80 kN que se estima soportará la estructura hasta llegar a una condición de deterioro (P_f) que obliga su reconstrucción.

Normalmente dentro del procedimiento de diseño estructural de pavimentos, el valor estimado del número de ejes equivalentes deben minorarse por un factor de seguridad definido en base a los valores Z_R y S_o . Para realizar el análisis de confiabilidad en esta investigación no se minoraron los valores de salida de la Ecuación 2-2.

La Ecuación 2-2 se calcula en forma reiterada definiéndose valores diferentes para las variables aleatorias de entrada por medio de la simulación de Montecarlo y gracias a la fdp que caracterizan estas variables, manteniéndose el valor de los parámetros y constantes. De esta manera se obtiene un conjunto de respuestas o salidas de la Ecuación 2-2, a cuyo conjunto de datos se le desarrolla un test de ajuste para definir la función de densidad de probabilidad que caracteriza la respuesta del método de diseño y que representa la variable aleatoria básica vida de diseño del pavimento $f_R(r)$. El procedimiento descrito se desarrolla gracias a la implementación de un modelo de simulación desarrollado bajo la herramienta Visual Basic. El test de bondad de ajuste se realiza mediante la utilización del programa para análisis estadístico Statgraphics ®.

La Tabla 6-1 presenta el orden en que los datos de entrada (Variables, parámetros o constantes) del modelo matemático (Ecuación 2-2) deben ingresarse para obtener la representación determinista de la variable vida de diseño del pavimento $f_R(r)$.

Tabla 6-1 Etapas para la generación de las variables aleatorias básicas de la vida de diseño $f_R(r)$

Etapa	Nombre	Definición
1	Definición del valor de Serviciabilidad Inicial	P_i Parámetro de diseño exigido al constructor y definido en las bases de licitación o recomendado en las guías de diseño.
2	Definición del valor de Serviciabilidad Final	P_f Parámetro de diseño definido por el diseñador y/o recomendado por las guías de diseño.

Etapa	Nombre		Definición
3	Definición del Número Estructural	NE	Variable aleatoria de entrada caracterizada con una fdp que fue evaluada a través de un test de ajuste de datos tomados de campo.
4	Definición del módulo resiliente efectivo de la subrasante (en MPa).	M_R	Variable aleatoria de entrada caracterizada con una fdp que fue evaluada a través de un test de ajuste de datos tomados de campo.
5	Predicción del número de aplicaciones de ejes estándar equivalentes de 80 kN.	EE	Respuesta o salida del modelo.
6	Cálculo del modelo de simulación reiterado	Datos de salida	Conjunto de salidas obtenidas a través del cálculo reiterado del modelo matemático.
7	Definición de la variable aleatoria $f_R(r)$	Variable aleatoria	Realización de un test bondad sobre el conjunto de datos de salida, para definir la variable aleatoria básica $f_R(r)$.

La Figura 6-4 representa el diagrama de flujo del procedimiento descrito y detallado en la Tabla 6-1, que conducen a la generación de la función que describe la variable aleatoria básica que representa la vida de diseño de un pavimento flexible $f_R(r)$.

En una simulación previa realizada en esta investigación, en la cual se siguió el procedimiento descrito anteriormente, se encontró que la variable aleatoria $f_R(r)$ que representa la respuesta del método de diseño AASHTO-93, en su mayoría es caracterizada por funciones de densidad no-normal, diferente de la propuesta desarrollada por AASHTO-93 para analizar la confiabilidad, en la cual caracterizan la respuesta del método de diseño mediante funciones de densidad de probabilidad Normal (Anexo 18).

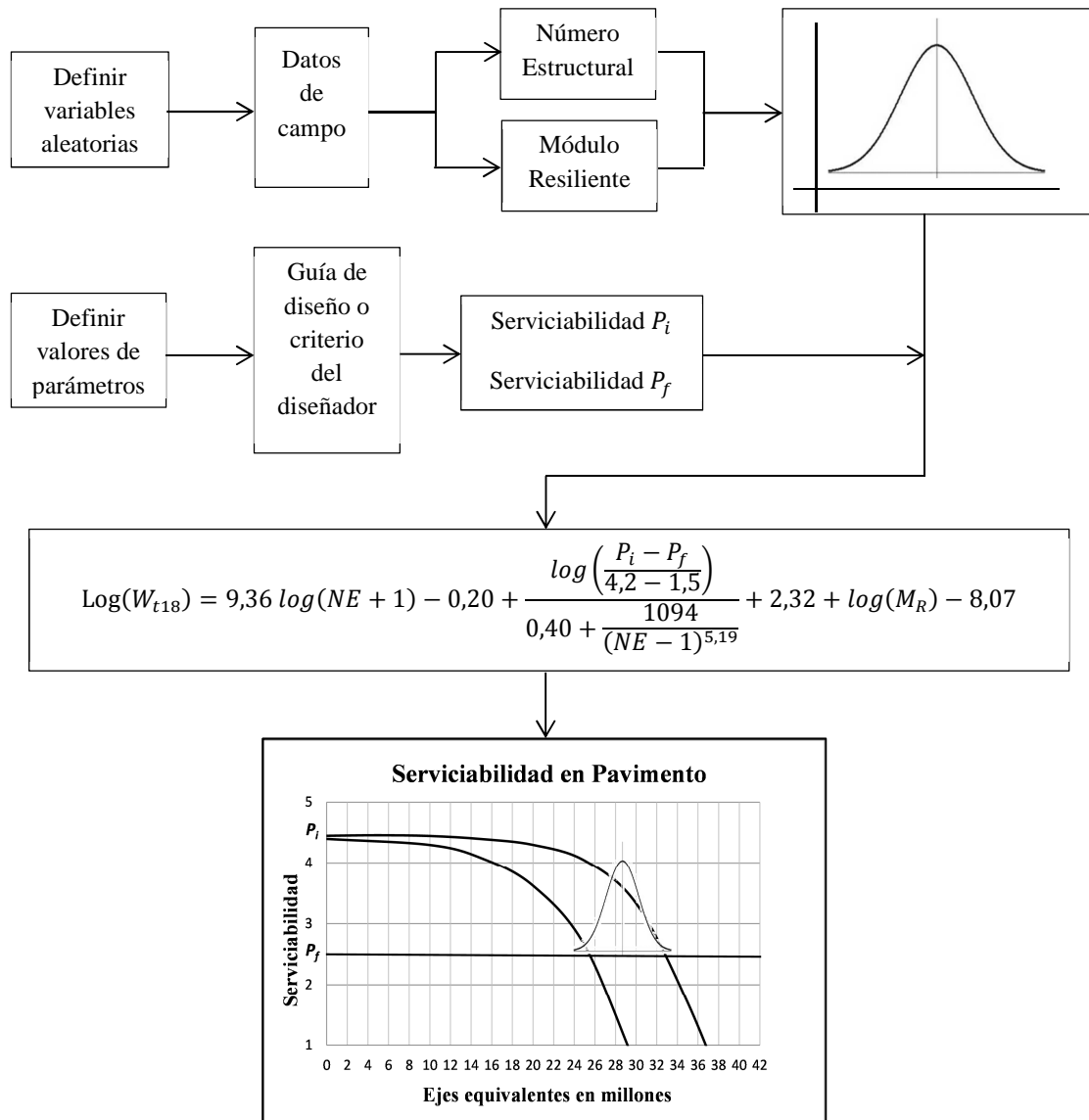


Figura 6-4 Diagrama de flujo para obtener la variable aleatoria básica de vida de diseño $f_R(r)$.

6.2.2. Vida útil $f_S(s)$

La función de densidad de probabilidad que caracteriza la vida útil $f_S(s)$ se define a

través de la Ecuación 6-3 desarrollada por Al-Omari y Darter (1994), mediante la cual se puede modelar el Índice de Serviciabilidad Final P_f para una estructura de pavimento (Tabla 3-1).

$$PSI = 5 e^{(-0,24 IRI)} \quad 6-3$$

Dónde:

- PSI: Índice de Serviciabilidad (Present Serviceability Index). Variable de salida.
- IRI: Índice de Regularidad Internacional en pulgadas por milla. Variable de entrada.

Esta expresión fue elegida debido a la credibilidad que genera en la comunidad científica internacional, lo cual se constata en la continua referenciación de la misma. La ecuación publicada por de Solminihac et al. (2003) no se utiliza ya que el autor no recomienda su uso para fines de diseño estructural.

La variable de entrada IRI puede calcularse siguiendo el modelo de comportamiento publicado por Morosiuk (1996, 1998, 1999) y descrito en la Ecuación 3-17.

Las variables independientes de la Ecuación 3-17, corresponden a expresiones matemáticas que se calculan, según se indicó en el capítulo 3, con ayuda de la estimación de los modelos de agrietamiento y ahuellamiento. La aleatoriedad de cada variable de entrada se obtiene por medio de una simulación de Montecarlo de la formulación matemática correspondiente, la cual genera a través de la ejecución reiterada un conjunto de valores los cuales son sometidos a un test de bondad de ajuste para identificar la función de densidad de probabilidad (fdp) que mejor representa los datos del conjunto.

Una vez caracterizadas las variables de entrada de la Ecuación 3-17, es posible alimentar el modelo de simulación que reproduce la respuesta del IRI, posteriormente puede encontrarse la función de densidad de probabilidad que mejor se ajusta al conjunto de salidas y representa la variable aleatoria IRI.

Definida la fdp que representa el IRI, es posible alimentar el modelo del PSI a través de la Ecuación 6-3 y mediante un procedimiento similar al seguido para encontrar la fdp IRI, se encuentra la fdp que caracteriza la variable PSI.

La Tabla 6-2 presenta la forma ordenada en que los datos de entrada (Variables, parámetros o constantes) del modelo de matemático (Ecuaciones 3-17 y 6-3) deben ingresarse para obtener la representación de la variable vida útil del pavimento $f_s(s)$.

Tabla 6-2. Etapas para la generación de la función de densidad de probabilidad de la vida de útil (s)

Etapas	Nombre		Definición
1	Definición de la variable de entrada Número Estructural	NE	Variable de entrada evaluada a través de un test de ajuste de datos tomados de campo.
2	Definición de la variable de entrada número de aplicaciones de ejes estándar equivalentes de 80 kN.	EE	Variable de entrada evaluada a través de un test de ajuste realizado a datos tomados de campo y/o de estudios de tránsito.
3	Cálculo del modelo deterioro por agrietamiento	ICA ICW ACA ACW	Cálculo de la estimación del agrietamiento a través de modelos de deterioro definidos por Morosiuk (1996, 1998, 1999), con variables de entrada NE y EE.
4	Cálculo del modelo deterioro por Ahuellamiento	RDM	Cálculo de la estimación del ahuellamiento a través del modelo de deterioro definido por Morosiuk (1996, 1998, 1999), con variables de entrada EE, NE, deflexión (mm), espesor de la capa asfáltica (mm) y de los resultados entregados por el modelo de agrietamiento (% del área total de la calzada).
5	Cálculo del modelo de Rugosidad	IRI	Cálculo de la estimación de la rugosidad a través de la Ecuación 3-17, con variables de entrada EE, NE y datos obtenidos de los modelos de agrietamiento (% del área total de la calzada) y ahuellamiento (mm).
6	Cálculo del modelo de Serviciabilidad	PSI	Cálculo de la estimación de la serviciabilidad a través de la Ecuación 6-3, con variables de entrada definidos por los resultados entregados por el modelo de

			rugosidad (Morosiuk, 1996, 1998, 1999).
7	Cálculo del modelo de simulación	Datos de salida	Conjunto de salidas calculadas a través de la repetición en la ejecución del modelo propuesto.
8	Definición de la variable aleatoria $f_s(s)$	Variable aleatoria	Realización de un test de bondad sobre el conjunto de datos de salida, que corresponden al tiempo de servicio hasta llegar al valor de P_f , para definir la variable aleatoria $f_s(s)$ que representa la vida de útil.

El modelo PSI permite evaluar la forma como se degrada la estructura del pavimento desde la puesta en servicio hasta una serviciabilidad final P_f . Como este modelo es incremental, es posible establecer la función de densidad de probabilidad que permite evaluar la variabilidad de la vida útil del pavimento cuando se ha alcanzado el valor de serviciabilidad final P_f . De esta manera se define la función de densidad de probabilidad que caracteriza la variable aleatoria básica vida útil $f_s(s)$.

En una simulación previa realizada en esta investigación, en la cual se siguió el procedimiento descrito antes, se encontró que la variable aleatoria $f_s(s)$ que representa la respuesta del modelo de desempeño, en su mayoría es caracterizada por funciones de densidad no-normal, diferente de la propuesta desarrollada por AASHTO-93 para analizar la confiabilidad, en la cual caracterizan la respuesta del desempeño mediante funciones de densidad de probabilidad Normal (Anexo 18).

El procedimiento descrito se desarrolla gracias a la implementación de un modelo de simulación desarrollado bajo la herramienta Visual Basic. El test de bondad de ajuste se realiza mediante la utilización del programa para análisis estadístico Statgraphics ®.

La Figura 6-5 representa el diagrama de flujo del procedimiento descrito y detallado en la Tabla 6-2, que conducen a la generación de la función que describe la variable aleatoria básica que representa la vida de diseño de un pavimento flexible $f_R(r)$.

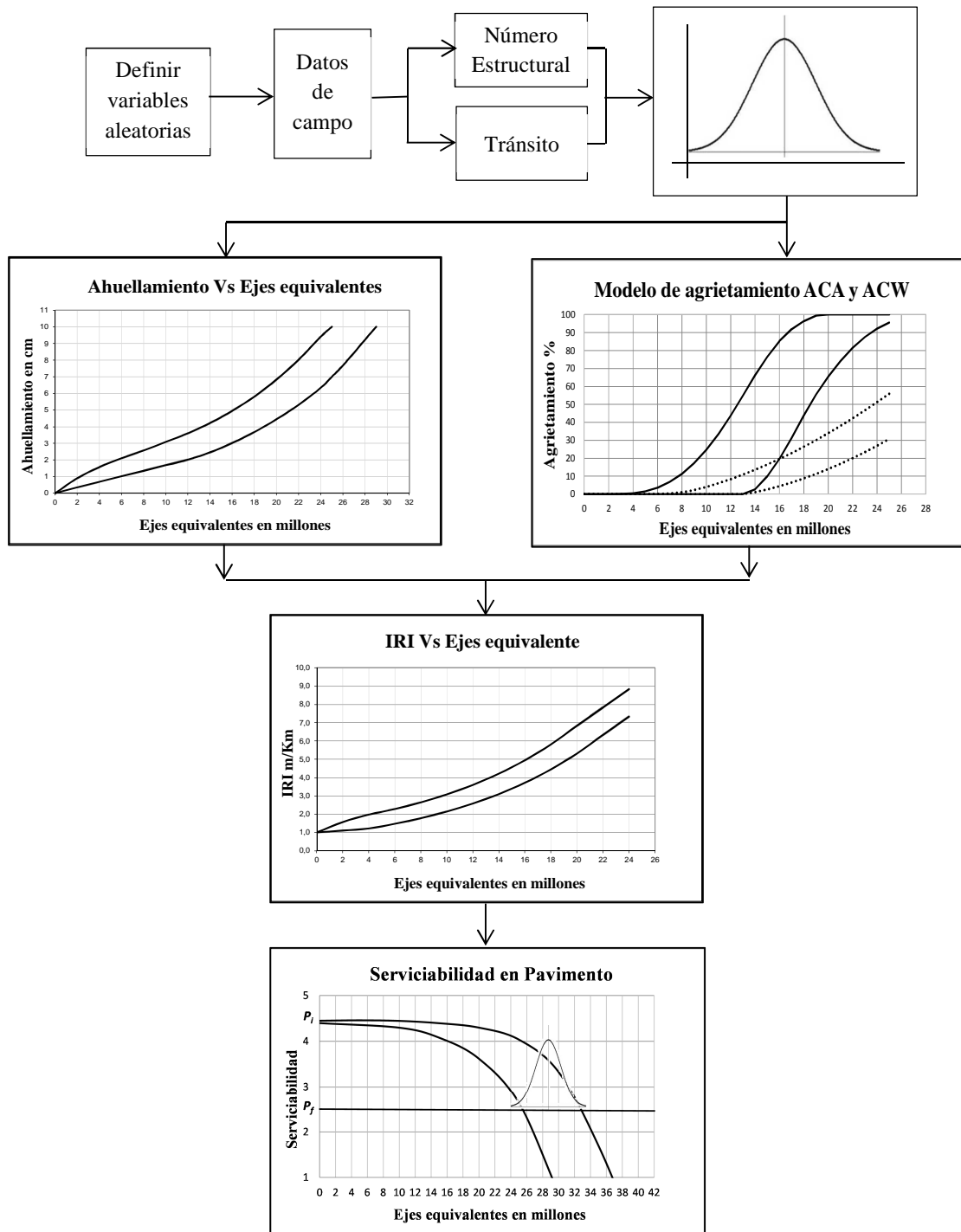


Figura 6-5 Diagrama de flujo para obtener la función de densidad de probabilidad de vida de útil $f_s(s)$.

La Figura 6-6, representa el resultado de reordenar los datos de salida de la simulación del modelo de serviciabilidad, en el cual se agrupan todos los datos de serviciabilidad que corresponden a un valor específico común de ejes equivalentes, posteriormente se realiza un test de bondad de ajuste al conjunto de datos, para establecer la fdp que mejor los representa, de esta manera puede utilizarse para pronosticar el valor de serviciabilidad más probable asociado a un periodo de tiempo cualquiera del ciclo de vida de la estructura de pavimento.

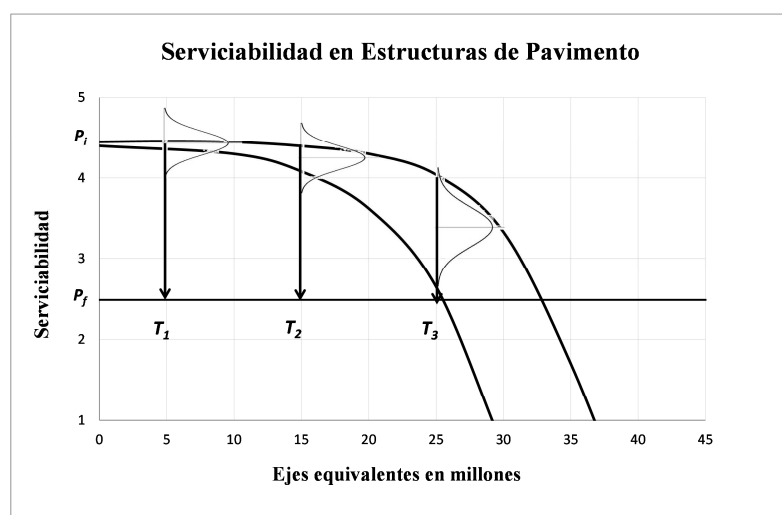


Figura 6-6 Evaluación del valor de serviciabilidad más probable para un momento cualquier de servicio del pavimento.

6.2.3. Definición de la función de desempeño $f_Z(z)$ y estado límite de interés.

Una vez obtenidas las funciones de densidad de probabilidad que representan las variables aleatorias básicas vida de diseño $f_R(r)$ y vida útil $f_S(s)$, según se planteó anteriormente, es posible definir la variable aleatoria que describe la función de desempeño $f_Z(z)$ (Ecuación 6-4).

Originalmente, la función de desempeño se había definido mediante la Ecuación 6-1.

$$f_Z(z) = f_R(r) - f_S(s) \quad 6-1$$

Reemplazando ahora las Ecuaciones 2-2, 3-17 y 6-3 en la Ecuación 6-1, encontramos:

$$f_Z(z) = 9,36 \log(NE + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{P_i - P_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(NE - 1)^{5,19}}} + 2,32 + \log(M_R) - 8,07 - \left\{5e^{(-0,26((\Delta RI_S + \Delta RI_C + \Delta RI_r + \Delta RI_t) + \Delta RI_e))}\right\} \quad 6-4$$

Haciendo la Ecuación 6-4 igual a cero queda definida la ecuación que describe el estado límite de interés.

6.3. Desarrollo del análisis de confiabilidad

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la falla del diseño estará definida por aquellos valores de la Ecuación 6-4 en los que se cumpla que:

$$f_Z(z) < 0 \quad 6-5$$

Evalutando la probabilidad de ocurrencia de la desigualdad se estará evaluando la probabilidad de falla, que estadísticamente se define como:

$$P_F = 1 - \Phi(z) \quad 6-6$$

Lo que quiere decir que cuando la función de desempeño $f_Z(z)$ se evalúe para un valor z , de tal manera que ese valor coincida con la posición del punto de diseño, según lo mencionado en el capítulo 5, el valor z tomará el nombre de índice de confiabilidad (β), convirtiéndose la Ecuación 6-7 en:

$$P_F = 1 - \Phi(\beta) \quad 6-7$$

El índice de confiabilidad (β), corresponde al vector que define la posición del punto de diseño o punto más probable de falla sobre la frontera que separa las dos zonas en que se divide el espacio paramétrico de respuesta de la Ecuación 6-4 y que establece la peor combinación de las variables estocásticas $f_R(r)$ y $f_S(s)$.

A partir de la expresión que representa la función de desempeño $f_Z(z)$ (Ecuación 6-4) se desarrolla el análisis de confiabilidad, que va dirigido a calcular el índice de confiabilidad (β).

Debidas a las características de las variables aleatorias básicas $f_R(r)$ y $f_S(s)$ encontradas y por lo tanto de la Ecuación 6-4, se debe recurrir al análisis numérico.

Como la Ecuación 6-4 está representada como una función implícita de variables aleatorias no-correlacionadas, el método numérico de análisis de confiabilidad que debe utilizarse es el método FORM (First-Order Reliability Methods). Este método requiere que las variables aleatorias $f_R(r)$ y $f_S(s)$ sean normales, y como se mencionó antes muchas de ellas resultaron ser funciones no normales, lo que obliga a la utilización de la transformación de Rosenblatt (Rosenblatt, 1952), para transformarlas en normales estándar.

El método FORM (First-Order Reliability Methods) consiste en la realización de un cambio del sistema de coordenadas originales a un sistema de coordenadas reducidas, lo que facilita la linealización de la superficie de falla, para encontrar el valor del índice de confiabilidad o índice de confiabilidad Hasofer–Lind (β_{HL}).

Como se ha demostrado hasta aquí los cálculos necesarios para obtener el valor β_{HL} son de una alta complejidad, por lo que normalmente se requiere utilizar un programa de computador especializado para realizar análisis de confiabilidad. En esta investigación se utilizó el programa COMREL-8 ®.

6.4. Implementación en el método de diseño estructural

Para lograr una aplicación práctica del análisis de confiabilidad propuesto en esta investigación, se busca la construcción de una matriz en la que de acuerdo al nivel funcional de la carretera se pueda elegir el valor de confiabilidad.

A continuación se describe el procedimiento, el cual se desarrolla para un solo nivel específico de tránsito siguiendo las Figuras 6-8a y 6-8b.

Etapas No 1.

Se obtiene la función que caracteriza la vida útil del pavimento, según lo que se planteó en el ítem 6.2.2 de este capítulo.

Etapas No 2.

Se obtiene la función que caracteriza la vida de diseño del pavimento, según lo propuesto en el ítem 6.2.1 de este capítulo.

El procedimiento se desarrolla para tres tipos de funciones de densidad de probabilidad (fdp) que caracterizan el módulo resiliente de la subrasante (M_R), de tal manera que en todos se conserve el valor de la media pero se modifique la desviación estándar, de esta manera se generan tres escenarios denominados nivel 1, 2 y 3. En donde en el nivel 1 se tiene una alta desviación estándar o bajo control sobre el valor del M_R y en el nivel 3 se tiene una baja desviación estándar o alto control sobre la misma variable.

El control que se tiene sobre el valor del M_R trata también de representar la importancia de la carretera. Por ejemplo, para una carretera de alta jerarquía se debe tener una baja desviación estándar y para una de baja jerarquía se acepta una alta desviación estándar. Los niveles elegidos guardarán relación con el coeficiente de variación (COV) expresado en porcentaje y representa la relación entre la desviación estándar y la media de la función de densidad de probabilidad que caracteriza la variable M_R .

Etapas No 3.

Posteriormente se desarrolla en primera instancia el análisis de confiabilidad tomando la fdp que representa la vida de diseño de uno de los tres niveles, con la fdp que representa la vida útil. De este procedimiento se encuentra un valor de β_{HL_1} .

Luego se realiza un nuevo análisis de confiabilidad modificando el valor de la media de la fdp que representa la vida de diseño del mismo nivel, con la fdp que representa la vida útil, del cual se encuentra un nuevo valor de β_{HL_2} .

Finalmente, se realiza en mismo procedimiento con una nueva modificación de la media de la fdp que representa la vida de diseño. Encontrándose de esta manera un nuevo valor de β_{HL_3} .

Con los tres valores de β_{HL} encontrados de esta manera se puede construir una gráfica en la cual, en el eje de las ordenadas se representa el valor encontrado de β_{HL} , y en la abscisa el valor de confiabilidad de cada uno de los tres análisis de confiabilidad realizados, con lo cual para un valor de β_{HL} es posible establecer el valor correspondiente de confiabilidad.

Etapas No 4.

El procedimiento desarrollado en la etapa 3, se realiza para cada una de las fdp que representa la vida de diseño, según los niveles restantes previamente definidos.

Finalizado el procedimiento se encuentra una colección de nueve valores de β_{HL} , tal como se presenta el Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Valores de β_{HL} definidos según variación de la función de densidad de probabilidad de la vida de diseño $f_S(s)$

Función de Densidad de Probabilidad fdp Vida útil								
Nivel de COV ₁			Nivel de COV ₂			Nivel de COV ₃		
v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
$\beta_{(H-L)1}$	$\beta_{(H-L)2}$	$\beta_{(H-L)3}$	$\beta_{(H-L)4}$	$\beta_{(H-L)5}$	$\beta_{(H-L)6}$	$\beta_{(H-L)7}$	$\beta_{(H-L)8}$	$\beta_{(H-L)9}$

Etapas No 5.

El procedimiento seguido desde la etapa 1 a la etapa 4 se realiza para diferentes valores de tránsito, obteniéndose una amplia matriz de valores de confiabilidad según el tránsito.

El procedimiento seguido a través de las etapas descritas, es esquematizado por medio de las Figuras 6-8a y 6-8b.

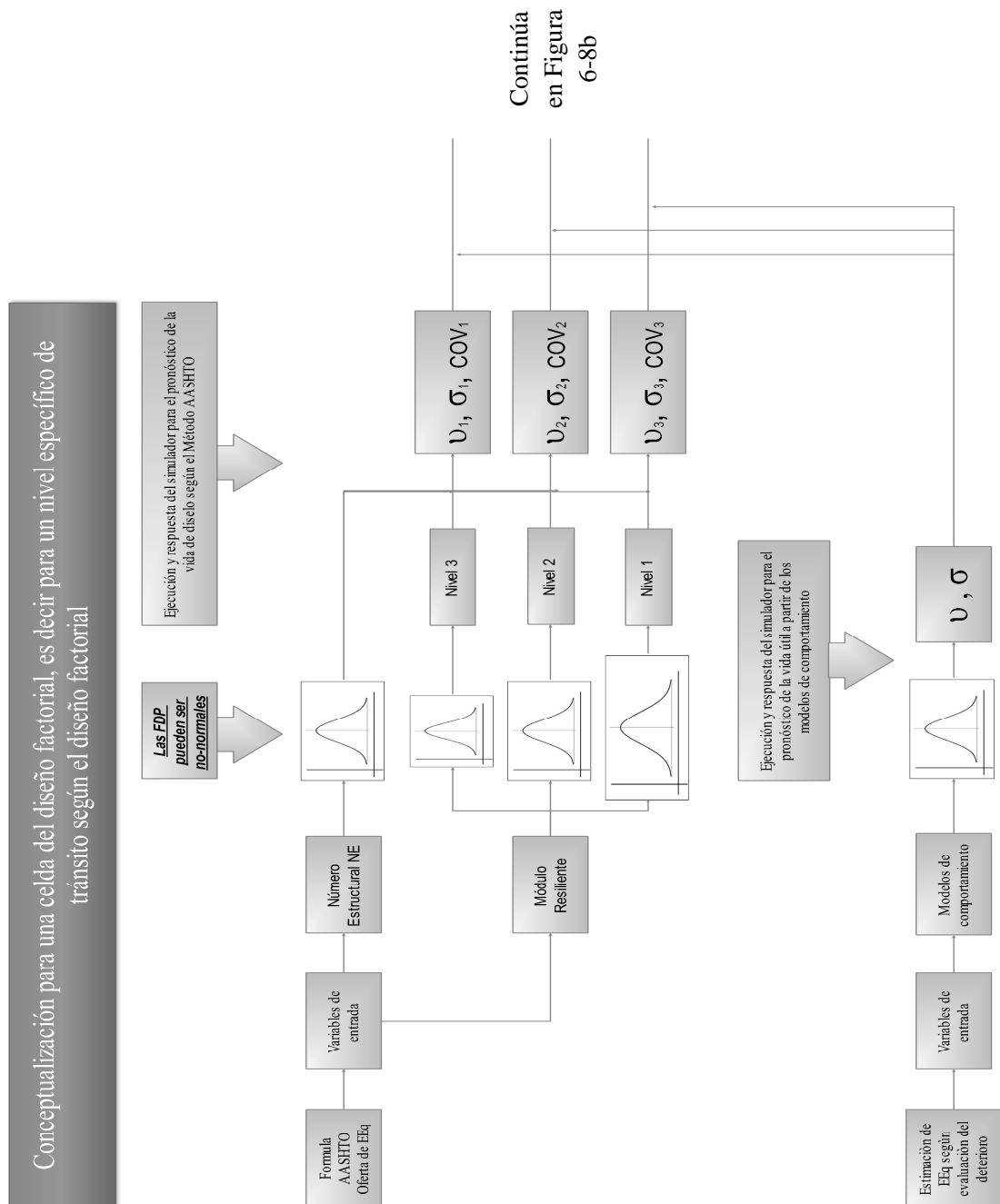


Figura 6-7a Modelo conceptual para la implementación práctica del análisis de confiabilidad.

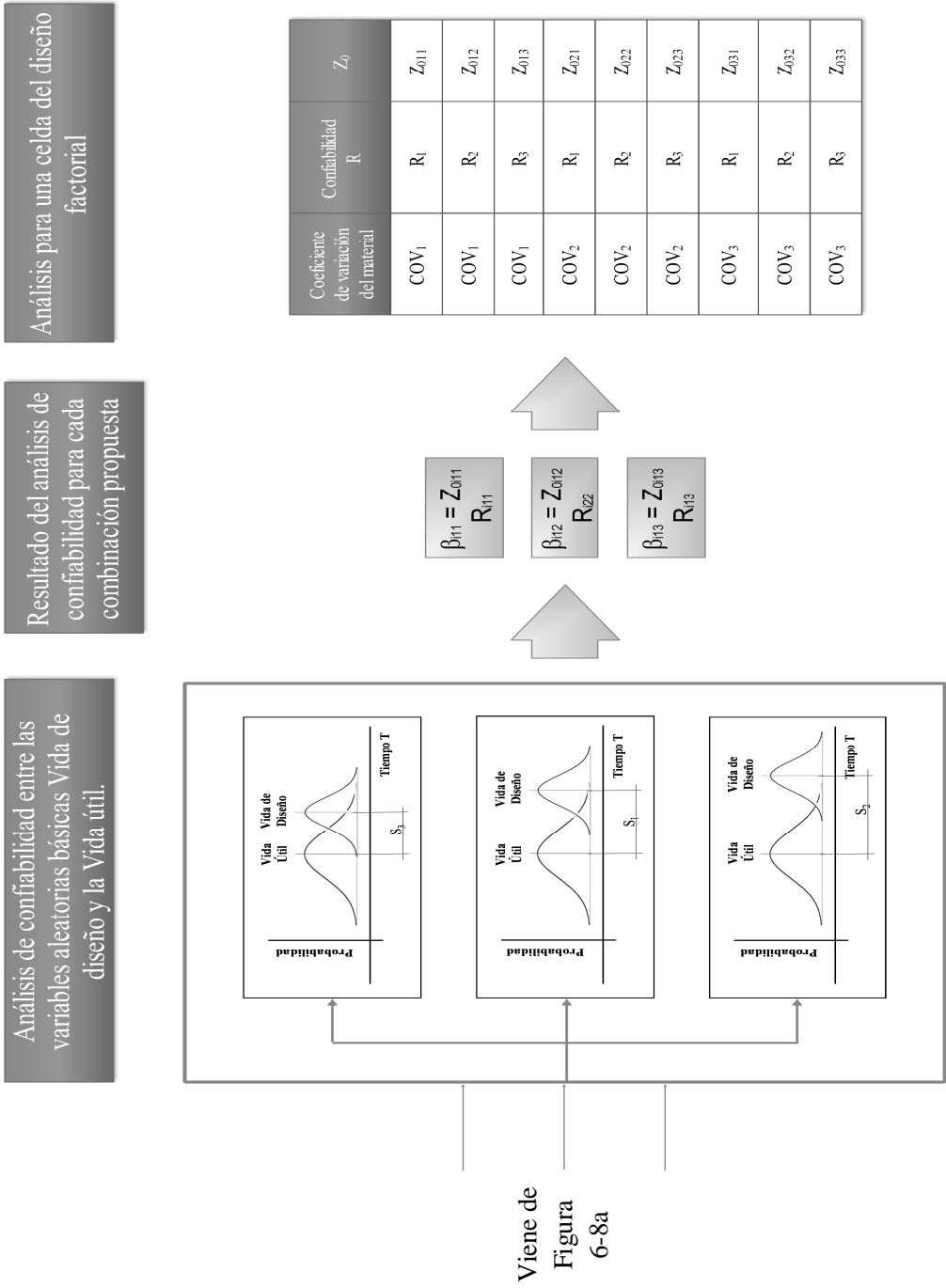


Figura 6-8b Modelo conceptual para la implementación práctica del análisis de confiabilidad.

7. DESARROLLO DE CASO DE ESTUDIO

Este capítulo presenta el desarrollo del caso de estudio que consiste en la aplicación de la metodología propuesta en la tesis sobre un grupo de 68 caminos de la red vial secundaria de Chile. Para tal efecto se utilizó la información contenida en la base de datos del Ministerio de Obras Públicas de Chile, con los cuales se elaboró la base de datos requerida para la aplicación. Se utilizó el método de diseño AASHTO-93 y los modelos de comportamiento propuestos por Morosiuk (1996, 1998, 1999), que son los utilizados por el programa HDM-4.

El objetivo que se persigue en este capítulo es realizar un caso de aplicación de la metodología para obtener valores de confiabilidad que puedan ser aplicados al diseño de caminos según características de localización geográfica, tránsito, capacidad estructural.

7.1. Alcance

La aplicación se desarrolla tomando en cuenta las siguientes condiciones:

- Las estructuras estudiadas corresponden a pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, que no han sido sometidos a actividades de mantenimiento que modifiquen el desarrollo normal del deterioro.
- Se excluye del análisis estructuras de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente con capas granulares estabilizadas o estructuras recapadas.
- La información utilizada fue suministrada por el Ministerio de Obras Públicas de Chile, basada en datos de terreno recolectados sobre la red vial nacional chilena.
- El impacto climático sobre la estructura del pavimento se toma en cuenta al definir los factores del diseño factorial de la aplicación.

7.2. Metodología para el desarrollo de la aplicación

La Figura 7-1 representa las etapas y secuencia de ejecución de la aplicación. La etapa 1 contempla el contexto metodológico que fue establecido con base en los capítulos precedentes y especialmente en el capítulo 6. En la etapa 2 se define la matriz factorial, se establece el catastro de información requerida y los cálculos para establecer los datos de entrada de la aplicación. En la etapa 3 se desarrolla y aplica el modelo de simulación que permite caracterizar la vida útil y la vida de diseño por medio de funciones de probabilidad. En la etapa 4 se desarrolla el análisis de confiabilidad.

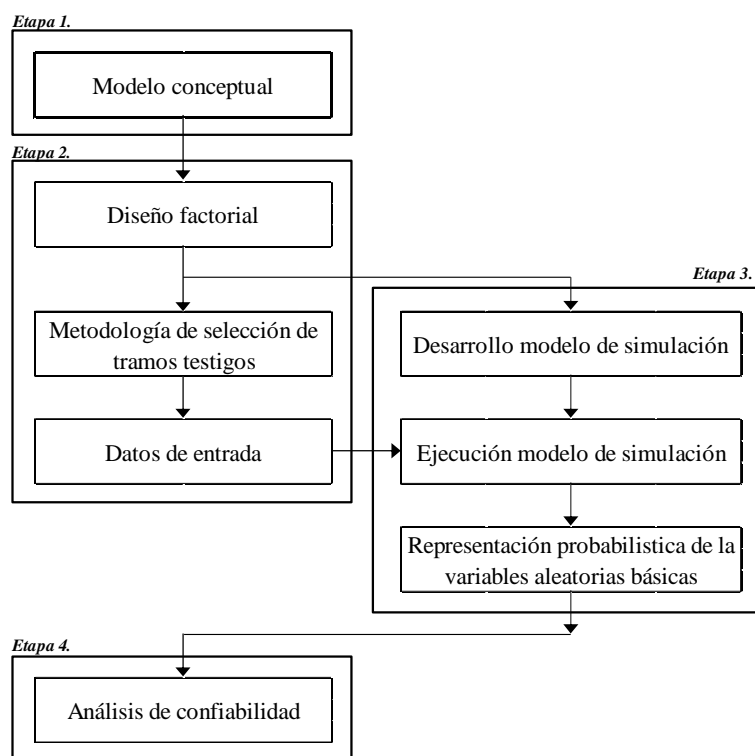


Figura 7-1 Modelo conceptual para el desarrollo del caso de estudio.

7.2.1. Etapa 1 Modelo conceptual

Se basó en la teoría expuesta en los capítulos precedentes, en los cuales se definió el alcance y el marco conceptual de la investigación y que fue precisado en el capítulo 6.

7.2.2. Etapa 2 Arquitectura de la información

Comprendió tres fases: definición la matriz factorial, selección de los caminos que se utilizan en la aplicación y estructuración de la información de acuerdo a los datos de entrada requeridos.

a) Fase No 1. Diseño del Factorial de la Investigación

Del análisis del método de diseño y de los modelos de comportamiento se estableció que la forma en que evolucionan los pavimentos asfálticos en el tiempo dependen fundamentalmente de cuatro variables globales: condiciones climáticas imperantes, tránsito, capacidad estructural y edad del pavimento. Estas variables definen el inicio y la progresión del deterioro, además de la interacción entre las diferentes manifestaciones de daño y desgaste (Videla et al., 1996). Junto a ellas, se decidió tomar una quinta variable encargada de diferenciar las estructuras originales de las recapadas. Estas cinco variables independientes representan los factores de la matriz del caso de estudio.

Con el fin de limitar el error en la predicción causada por la variedad de valores que puede tomar cada factor y evaluar el impacto en la respuesta, se estableció un número de niveles que subdividió cada variable en tres. La combinación de las variables independientes y de los tres niveles define los escenarios que simulan condiciones específicas de caminos a lo largo de Chile.

Los niveles de los factores o variables de la investigación se definieron de la siguiente manera:

- **Clima**

Las variables características que representan el clima en los modelos comportamiento son la temperatura y las precipitaciones (Paterson, 1987), a fin de considerar las condiciones climáticas se dividió el país en tres zonas globales (Videla et al., 1995). La Tabla 7-1 muestra la forma en que se clasificó el clima en Chile según lo definió Thenoux et al. (2006), en donde:

- Zona Norte (clima cálido y seco): Desde XV Región de Arica y Parinacota hasta Los Vilos (IV Región de Coquimbo) aproximadamente.
- Zona Central (clima templado): Entre Los Vilos (IV Región de Coquimbo) y Chillán (VIII Región del Biobío), incluyendo la Región Metropolitana.
- Zona Sur (clima frío y húmedo): Desde Chillán (VIII Región del Biobío) hasta X Región de Los Lagos.

Tabla 7-1 Clasificación del clima aplicado a Chile.

(Videla et al., 1995)

Zona Climática	Norte	Centro	Sur
Clasificación por humedad	Árida	Sub-húmeda	Húmeda
Índice de humedad en %	-80	0	0,6
Porcentaje de duración anual estación seca	0,9	0,5	0,25
Precipitación media mensual en mm	5	70	200
Clasificación por temperatura en °C	Sub-tropical cálido	Sub-tropical frío	Moderadamente frío
Temperatura media en °C	20	16	10
Rango de temperatura media en °C	17	13	15

Zona Climática	Norte	Centro	Sur
Número de días al año con temperatura > 32 °C	60	30	15
Índice de heladas	0	0	55
Porcentaje de tiempo al año con nieve	0	0	10
Porcentaje de tiempo al año con agua	0	10	15

- Tránsito

La variable tránsito se dividió en tres niveles, bajo, medio y alto. Un número inferior de niveles no reflejaría la amplia gama de valores que presenta la variable y un número mayor de niveles implicaría necesariamente contar con más datos de campo, lo cual reduce el número de tramos disponibles dentro de algunas categorías del factorial a lo largo de la red vial nacional (Videla et al., 1995).

- Capacidad estructural

Se seleccionó al Número Estructural que se dividió en tres niveles, bajo, medio y alto.

La Tabla 7-2 presenta la matriz factorial de la investigación que comprendió 27 celdas a partir de la combinación de las variables independientes y los tres niveles correspondientes.

Con el objeto de darle la mayor representatividad a los resultados de la aplicación, se buscó que cada celda fuera ocupada por el mayor número posible de caminos y que los pavimentos agrupados en una celda tuvieran características similares de estructura, geometría, clima, tránsito, capacidad estructural, etc.

Tabla 7-2 Diseño factorial.

Factores a Considerar	Niveles	Clases de Niveles																	
Ubicación Geográfica	3	Norte (N), Centro (C), Sur (S)																	
Tránsito	3	Bajo, Medio, Alto																	
Tipo de Estructura	1	Asphaltic Concrete (AC)																	
Capacidad Estructural	3	Baja, Media, Alta																	
Mezcla Asfáltica en caliente (AC)	Clima	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
Número de celda del factorial																			

Adicionalmente, para efecto de describir de la forma más precisa posible la curva de deterioro a lo largo del ciclo de vida de los caminos reunidos en cada celda, se estableció al interior de cada grupo de caminos que estos representaran edades heterogéneas. En general se definieron tres etapas en la vida de un camino (Videla et al., 1995):

- Etapa inicial: Desde su construcción (o rehabilitación estructural) hasta el inicio del deterioro; el camino presenta buen estado general. Se considera una edad de hasta 4 años.
- Etapa media: Desarrollo del deterioro que se acelera con el tiempo. Se considera una edad de entre 5 y 11 años
- Etapa terminal: El camino se ha deteriorado considerablemente y su nivel de servicio se ha reducido significativamente. Se considera una edad de 12 años o más.

Para limitar y definir el nivel de las variables tránsito y capacidad estructural, cada nivel debió definirse en base a una longitud del intervalo (límite superior e inferior), que se configura siguiendo la metodología propuesta por Videla et al. (1996), MOP (2001-2010), Thenoux et al. (2006). Al definir los rangos de los niveles del factorial

se buscó llegar a una solución que compatibilice en forma simultánea los siguientes criterios:

- Número adecuado de tramos por categoría: Se debe incluir el mayor número de tramos posible a fin de contar con suficientes datos para la realización del estudio.
- Minimizar el error en la predicción: El rango debe ser lo más cercano posible a la media, para no introducir excesiva variabilidad en las variables que provoque una disminución en la confiabilidad de la predicción.

b) Fase No 2. Metodología de selección de tramos testigos.

Como se mencionó antes, para cumplir los requerimientos de información que requería cada celda del factorial, se debió tratar de encontrar la mayor cantidad de caminos que no hubiesen sido intervenidos y cuya capa de rodadura estuviera construida en mezcla asfáltica en caliente. Estos caminos se seleccionaron desde la base de datos suministrada por el Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP) y de los estudios desarrollados por Videla et al. (1996), MOP (2001-2010).

Para la selección de los caminos se aplicó la metodología descrita en la Figura 7-2, que consistió de los siguientes desarrollos:

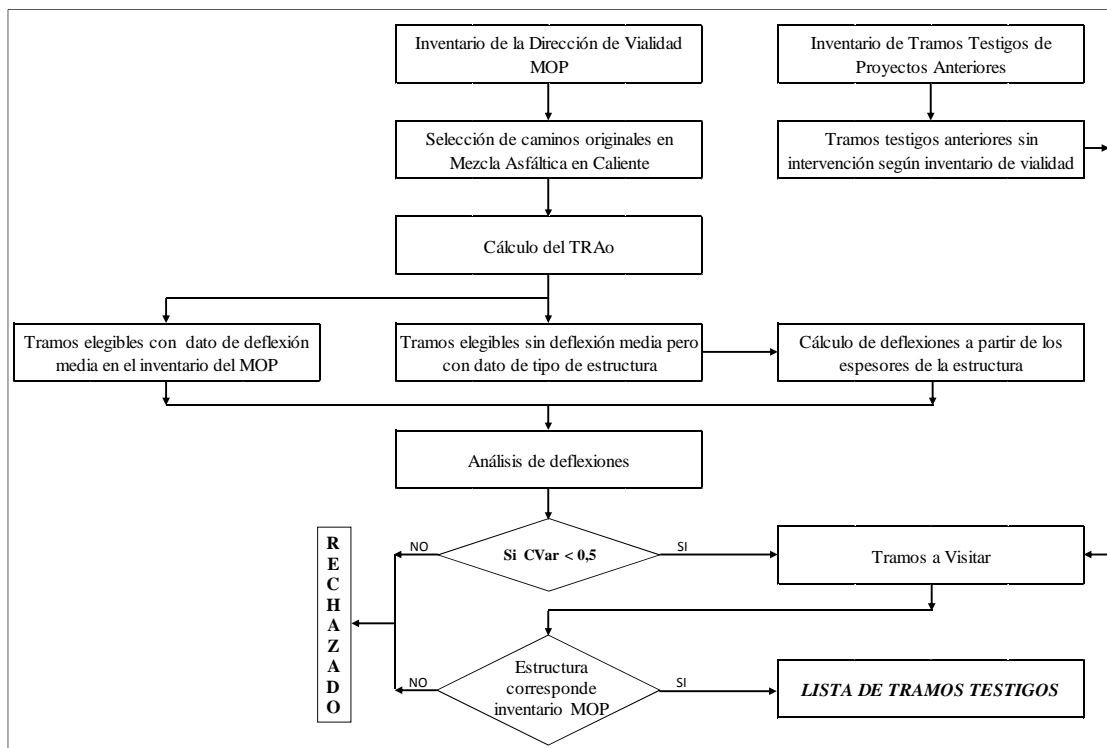


Figura 7-2 Metodología de selección de tramos testigos

- Con la ayuda de la base de datos del MOP se seleccionaron los caminos con capa de rodadura en mezcla asfáltica en caliente y que no hubiesen sido intervenidos. También se verificó que los tramos tuvieran características estructurales similares (espesores, tipo de materiales de base y sub-base).
- A los caminos seleccionados se les calcularon los tránsitos para el año cero (TRAo) expresados en ejes equivalentes, a partir de la información de conteos vehiculares de la misma base de datos. Las tasas de crecimiento vehicular utilizadas fueron las definidas por el estudio “Second Road Sector Project 1990 – 1993” (Armijo et al., 1989). Los valores de los factores de eje equivalente (FEE) fueron los definidos en el estudio “Análisis de información de las plazas fijas de pesaje para estratigrafías anuales de buses y camiones” (MOP, 1994). Ambos

datos también se utilizados en los estudios desarrollados por Videla et al. (1992-1996a), MOP (2001-2010), Thenoux et al. (2006). Posteriormente los caminos fueron relacionados con datos de deflexión. Algunos contaban con datos la deflexión medida en campo al interior de la base de datos, pero otros no contaban con esta información, por lo cual se calculó la deflexión con la información de espesores y tipo de material. Para el cálculo se usó la ecuación teórico-empírica desarrollada por Echeverría et al. (1991).

- Luego fueron sectorizados los tramos a fin de obtener secciones homogéneas con valores de deflexión media representativa. Para lo cual se realizó un análisis estadístico que exigió que el promedio de los datos analizados presente la menor dispersión y variabilidad posible. Para evaluar si se cumple con este requisito se calculó la deflexión media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los tramos elegidos. Si el coeficiente de variación resulta ser menor o igual a 0.5, el tramo se considera homogéneo.
- Además de los caminos seleccionados según se indicó, se incorporaron los caminos con tramos testigos utilizados en las investigaciones de Videla et al. (1992 -1996), MOP (2001-2010), Thenoux et al. (2006) que no hubiesen sido objeto de algún tipo de intervención.
- El total de caminos seleccionados fueron visitados para comprobar en campo que no hubiesen sido intervenidos, además de corroborar la información indicada en la base de datos del MOP.
- Los caminos que luego de la visita a terreno mantuvieron las características que les habían permitido ser seleccionados inicialmente, consolidaron la base de datos definitiva utilizada en la aplicación. La lista completa de los 68 caminos seleccionados para la aplicación puede consultarse en el Anexo 1.

- Definida la lista definitiva caminos se calculó la longitud y límites de los intervalos para cada celda del factorial, definiéndose de esta manera los caminos para cada celda del factorial.

Definido los caminos que serían utilizados en la investigación y los niveles de las variables de la matriz factorial, se procedió a asignar la mayor cantidad de caminos a cada nivel de la matriz factorial. Como era de esperarse el número de caminos seleccionados no fueron suficientes para llenar todos los niveles con la suficiente muestra, por lo cual algunas de las 27 celdas no pudieron ser analizadas. La 7-3 presenta la matriz factorial con los niveles que efectivamente pudieron ser utilizados en la investigación, en ella se indican el número de caminos que pudieron asignarse, desde la lista de caminos seleccionados siguiendo la metodología propuesta en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3 Diseño factorial definitivo del caso de estudio.

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)																										
Mezcla Asfáltica en caliente	Clima	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	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

Cada camino se identificó con tres grupos de letras. El primer grupo está compuesto por un caracter 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.

c) Fase No 3. Arquitectura de Datos

Definido el diseño factorial y los caminos del caso de estudio, se realizó la selección de la información desde la base de datos del MOP, con la cual se construyó los datos de entrada necesarios para correr los modelos de vida de diseño y vida útil. Un análisis inicial de la etapa 3 permitió establecer el catastro de la información que se requería, clasificándola como variables, parámetros, factores de calibración y coeficientes. Las variables de entrada de ambos modelos debieron representarse como variables aleatorias y no como valores deterministas, esto se logró asociando las variables a funciones de densidad de probabilidad a partir de datos previamente seleccionados tomados en campo.

- ***Datos de entrada para el modelo vida de diseño:***

Como se indicó en la Tabla 6-1 y la Figura 6-4, las variables de entrada requeridas para definir la variable aleatoria básica vida de diseño fueron el Número Estructural y el Módulo Resiliente.

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 seleccionados, además del valor del CBR de la subrasante, estos datos fueron obtenidos desde la base de datos del MOP. Para el cálculo del Número Estructural se utilizó las Ecuaciones 7-1 (Huang, 1993) y 7-2 (Hodges, Rolt, Jones, 1975). Los valores de los coeficientes estructurales y de drenaje utilizados fueron los recomendados por el MOP (2014), los cuales se mostraran más adelante.

$$NE = a_{11}D_{11} + a_{12}D_{12} + a_{13}D_{13} + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 + R \quad 7-1$$

$$R = (3,51 \log CBR) - [0,85 (\log CBR)^2] - 1,43 \quad 7-2$$

Dónde:

NE: Número Estructural (Pul).

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

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

a_2 : Coeficiente estructural para la capa de base granular.

D_2 : Espesor de la capa de base granular (Pul).

m_2 : Coeficiente de drenaje de la capa de base granular.

a_3 : Coeficiente estructural para la capa de sub-base granular.

D_3 : Espesor de la capa de sub-base granular (Pul).

m_3 : Coeficiente de drenaje de la capa de sub-base granular.

R: Aporte al cálculo del Número Estructural de la subrasante.

CBR: Valor de la capacidad de soporte de la subrasante (%).

Los datos y el cálculo utilizado para establecer el Número Estructural pueden encontrarse en el Anexo 2 para cada camino seleccionado. Las funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable aleatoria NE para cada celda del factorial, se obtuvo a través de un test de ajuste de los datos deterministas calculados según se indicó antes, un resumen de estas funciones puede encontrarse en el Tabla 7-4.

Tabla 7-4 Funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable aleatoria
Número Estructural NE en pulgadas

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
CTANB	Lognormal Valor-P - 0,28888	media = 2,94597
		desviación estándar = 0,791358
NTANM	Weibull Valor-P - 0,0325421	forma = 8,62361
		escala = 4,31642
CTANM	Lognormal Valor-P - 0,000480088	media = 3,90306
		desviación estándar = 0,840906
STANM	Weibull Valor-P - 0,139464	forma = 4,64919
		escala = 3,73243
NTANA	Lognormal Valor-P - 0,000823999	media = 3,06016
		desviación estándar = 0,170635
CTANA	Normal Valor-P - 0,00595083	media = 5,33933
		desviación estándar = 0,30506
STANA	Normal Valor-P - 0,00273579	media = 5,01
		desviación estándar = 1,39569
CTMNB	Weibull Valor-P - 0,0538993	forma = 2,74444
		escala = 3,18146
NTMNM	Normal Valor-P - 0,0212215	media = 4,33167
		desviación estándar = 0,114598
STMNM	Lognormal Valor-P - 0,00479236	media = 3,62092
		desviación estándar = 0,884917
NTMNA	Normal Valor-P - 0,0000031676	media = 4,97
		desviación estándar = 2,63284
STMNA	Normal Valor-P - 0,00880689	media = 5,41
		desviación estándar = 0,245162
CTBNM	Weibull Valor-P - 0,0270925	forma = 11,6919
		escala = 4,1921
STBNM	Normal Valor-P - 0,022379	media = 3,37
		desviación estándar = 0,666886

La determinación de la variable aleatoria módulo resiliente se estableció con base en el valor del CBR de la subrasante contenido en la base de datos del MOP y se calculó con la ayuda de las Ecuaciones 7-3 y 7-4 (MOP, 2014).

$$M_R = 17,6 * (CBR^{0,64}) \text{ para } CBR < 12 \% \quad 7-3$$

$$M_R = 22,1 * (CBR^{0,55}) \text{ para } 12 \leq CBR < 12 \% \quad 7-4$$

Dónde:

– M_R : Módulo resiliente de la subrasante (MPpa).

–CBR: Valor de la capacidad de soporte de la subrasante.

Las funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron el Modulo Resiliente pueden consultarse en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5 Funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable
Módulo Resiliente M_R

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
CTANB	Lognormal Valor-P - 0,0125173	media = 9502,35
		desviación estándar = 3769,91
NTANM	Weibull Valor-P - 0,0185034	forma = 6,62308
		escala = 17197,8
CTANM	Lognormal Valor-P - 0,00000157636	media = 21419,6
		desviación estándar = 5186,47
STANM	Lognormal Valor-P - 0,000361062	media = 12749,3
		desviación estándar = 2021,67
NTANA	El valor del Módulo Resiliente de la subrasante es constante	
CTANA	Lognormal Valor-P - 0,00190634	media = 16475,0
		desviación estándar = 3056,1
STANA	Lognormal Valor-P - 0,000311974	media = 19236,4
		desviación estándar = 12659,2
CTMNB	Lognormal Valor-P - 0,00468931	media = 16491,5
		desviación estándar = 5206,57
NTMNM	Normal Valor-P - 0,00000417546	media = 19109,2
		desviación estándar = 2068,98

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
STMNM	Lognormal Valor-P - 0,0000122598	media = 15766,8
		desviación estándar = 1882,09
NTMNA	Normal Valor-P - 0,00000199918	media = 18731,0
		desviación estándar = 2097,55
STMNA	Normal Valor-P - 0,00880689	media = 15432,5
		desviación estándar = 1244,71
CTBNM	Lognormal Valor-P - 0,0284617	media = 17673,7
		desviación estándar = 2823,47
STBNM	El valor del Módulo Resiliente de la subrasante es constante	

Los parámetros requeridos para la simulación de la vida de diseño fueron los recomendados por Huang (1993) y MOP (2014). En Tabla 7-6 pueden consultarse sus valores.

Tabla 7-6 Valores de serviciabilidad inicial y final utilizadas en el caso de estudio para ejecutar el modelo de vida de diseño

Identificación de celda Factorial	P_i	P_f
Para todas las celdas	4,2	2

- Datos de entrada para el modelo vida útil:***

Como se indicó en la Tabla 6-2 y la Figura 6-5, las variables de entrada requeridas para definir la variable aleatoria básica vida útil fueron:

- Modelos de Agrietamiento: Tránsito (Ejes equivalentes de 80 kN en millones por pista), Número Estructural (Pul).

- Ahuellamiento: Tránsito (Ejes equivalentes de 80 kN en millones por pista), Número Estructural (Pul), deflexión (mm), espesor de la capa asfáltica (mm) y los resultados del modelo de agrietamiento (% de área total de la calzada).
- Modelo de Rugosidad: Tránsito (Ejes equivalentes de 80 kN en millones por pista), Número Estructural (Pul) y los resultados de los modelos de agrietamiento (% del área total de la calzada) y ahuellamiento (mm).
- Modelo de Serviciabilidad: Resultados del modelo de rugosidad (m/km).

Todas las variables de entrada fueron caracterizadas por funciones de densidad de probabilidad, definidas mediante un test de bondad de ajuste aplicado a datos deterministas obtenidos desde la base de datos del MOP o mediante una simulación, utilizando el programa STATGRAFICS® versión XVI.

A continuación se presenta en forma detallada la forma en que se obtuvieron las fdp que caracterizaron las variables aleatorias de entrada para el modelo de vida útil.

Para definir la variable aleatoria tránsito se realizó una proyección a 25 años a partir del año cero, de los datos informados por el MOP para cada camino. El valor de las tasas de crecimiento vehicular y los valores de los factores de eje equivalente (FEE) fueron definidos como se mencionó antes. La Tabla 7-7 presenta los valores utilizados.

Tabla 7-7 Tasas de crecimiento para el cálculo de la variable tránsito.

Tipo de Información	Bus	Camión de dos ejes C2E	Camión de más dos ejes C2E
Tasa de crecimiento Vehicular (Armijo et al., 1989)	6,5%	2,5%	6,0%
Factores de Eje Equivalente (MOP, 1994)	1,98	2,00	3,55

En el Anexo 3 se presenta la totalidad de datos y los calculados realizados para obtener los valores deterministas del tránsito en el año cero. Posteriormente, con estos datos se procedió a realizar la proyección del tránsito hasta el año 25 para cada uno de las celdas seleccionadas del factorial.

A continuación se presenta el resultado de la proyección vehicular para el año 14 y 15 en todas las celdas del factorial, representadas por fdp que las caracteriza. En el Anexo 4 se presenta un resumen de las funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron el tránsito para cada año de la proyección y celda del diseño factorial.

Tabla 7-8 Funciones de densidad de probabilidad para los años 14 y 15 que caracterizan la variable tránsito para cada nivel del factorial

Identificación de celda Factorial	Año No 14		Año No 15	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0326266	media = 1,1666	Exponencial P-Value 0,0329377	media = 1,2302
NTANM	Weibull P-Value 0,00836153	forma = 4,7634	Weibull P-Value 0,00837434	forma = 4,72705
		escala = 0,8048		escala = 0,850157
CTANM	Normal P-Value 0,000398054	media = 0,639084	Normal P-Value 0,000403506	media = 0,671842
		desviación estándar = 0,0526773		desviación estándar = 0,0574224
STANM	Lognormal P-Value 0,00802738	media = 0,726232	Lognormal P-Value 0,00870465	media = 0,766076
		desviación estándar = 0,359293		desviación estándar = 0,380172
NTANA	Weibull P-Value 0,00000204526	forma = 8,51532	Weibull P-Value 0,00000202774	forma = 8,4934
		escala = 0,500376		escala = 0,529925
CTANA	Lognormal P-Value 0,0166511	media = 0,892259	Lognormal P-Value 0,0159438	media = 0,940703
		desviación estándar = 0,620757		desviación estándar = 0,655649
STANA	Lognormal P-Value 0,192948	media = 0,775256	Lognormal P-Value 0,1933	media = 0,818271
		desviación estándar = 0,34298		desviación estándar = 0,36285

Identificación de celda Factorial	Año No 14		Año No 15	
CTMNB	Lognormal P-Value 0,0084833	media = 0,233737	Lognormal P-Value 0,00919045	media = 0,245364
		desviación estándar = 0,0751518		desviación estándar = 0,0792267
NTMNM	Lognormal P-Value 0,00210395	media = 0,266395	Lognormal P-Value 0,00320544	media = 0,280567
		desviación estándar = 0,0747832		desviación estándar = 0,0791526
STMNM	Lognormal P-Value 0,00190961	media = 0,205223	Lognormal P-Value 0,00208811	media = 0,216108
		desviación estándar = 0,0527927		desviación estándar = 0,0555521
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000159821	media = 0,393437	Lognormal P-Value 0,0000156345	media = 0,416085
		desviación estándar = 0,105169		desviación estándar = 0,111984
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,25505	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,26865
		desviación estándar = 0,0529652		desviación estándar = 0,0558254
CTBNM	Weibull P-Value 0,0173816	forma = 3,69276	Weibull P-Value 0,0182372	forma = 3,6685
		escala = 0,118596		escala = 0,124792
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,103818	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,109337
		desviación estándar = 0,0305575		desviación estándar = 0,032412

Para el cálculo de la deflexión se utilizó la Ecuación 7-5 propuesta por Echeverría (1991).

$$DEF = 14.84 \text{ NE} - 1,45$$

7-5

Dónde:

- DEF = Deflexión (mm/100)
- NE: Número Estructural (Pul)

El resumen de las funciones de densidad de probabilidad que caracterizan la deflexión para cada celda del factorial se encuentran en la Tabla 7-9.

Tabla 7-9 Funciones de densidad de probabilidad que caracterizan la deflexión (mm) del pavimento para cada celda del factorial

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
CTANB	Normal Valor-P - 0,209137	media = 0,6225
		desviación estándar = 0,00866025
NTANM	Normal Valor-P - 0,00269243	media = 0,453333
		desviación estándar = 0,0589174
CTANM	Normal Valor-P - 0,00128648	media = 0,39375
		desviación estándar = 0,0137802
STANM	Weibull Valor-P - 0,00690031	forma = 20,4546
		escala = 0,519406
NTANA	El valor de la deflexión para la capa es constante	
CTANA	Normal Valor-P 0,00933872	media = 0,338
		desviación estándar = 0,0290541
STANA	Normal Valor-P - 0,000221174	media = 0,3225
		desviación estándar = 0,0431901
CTMNB	Normal Valor-P - 0,00503019	media = 0,6036
		desviación estándar = 0,117834
NTMNM	Weibull Valor-P - 0,00461962	forma = 20,6621
		escala = 0,465492
STMNM	Normal Valor-P - 0,00583098	media = 0,443571
		desviación estándar = 0,0468432
NTMNA	Normal Valor-P - 0,000226481	media = 0,105
		desviación estándar = 0,0727545
STMNA	Normal Valor-P - 0,00880689	media = 0,33
		desviación estándar = 0,0204302
CTBNM	Normal Valor-P - 0,0717699	media = 0,462667
		desviación estándar = 0,0299348
STBNM	Normal Valor-P - 0,022379	media = 0,49
		desviación estándar = 0,0205196

Para definir la función de densidad de probabilidad que caracterizó el espesor de la capa de rodadura se debió contar con información detallada de los espesores de las capas de los caminos seleccionados que se encuentra en la base de datos del MOP. Un resumen de las funciones de densidad de probabilidad que caracterizan el espesor de la capa de asfalto para cada celda del factorial se encuentra en la Tabla 7-10.

Tabla 7-10 Funciones de densidad de probabilidad que caracterizan el espesor (mm) de la capa de asfalto para cada celda del factorial

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
CTANB	Weibull Valor-P - 0,0166422	forma = 5,85452
		escala = 82,6364
NTANM	Lognormal Valor-P - 0,00582712	media = 83,3931
		desviación estándar = 33,7717
CTANM	Weibull Valor-P - 9,94907E-7	forma = 16,3659
		escala = 75,7299
STANM	Lognormal Valor-P - 0,0795721	media = 78,577
		desviación estándar = 22,7577
NTANA	Lognormal Valor-P - 0,00096499	media = 62,0422
		desviación estándar = 8,74777
CTANA	Lognormal Valor-P - 0,000430221	media = 102,137
		desviación estándar = 22,8305
STANA	Lognormal Valor-P - 0,000276963	media = 86,9594
		desviación estándar = 24,2345
CTMNB	Lognormal Valor-P - 0,00000643855	media = 70,0644
		desviación estándar = 23,0944
NTMNM	Lognormal Valor-P - 0,00000199918	media = 54,5742
		desviación estándar = 5,02669
STMNM	Weibull Valor-P - 0,00582712	forma = 3,50713
		escala = 76,9009
NTMNA	Weibull	forma = 7,58856

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
	Valor-P - 0,0000772141	escala = 60,0595
STMNA	Lognormal Valor-P - 0,00880689	media = 129,049
		desviación estándar = 20,5748
CTBNM	El valor del espesor de la capa es constante	
STBNM	El valor del espesor de la capa es constante	

Definidas las variables de entrada Número Estructural, Modulo Resiliente, Tránsito, deflexión y espesor de la capa asfáltica, se deben ejecutar los modelos de agrietamiento, ahuellamiento y rugosidad.

Para ejecutar estos modelos es necesario definir los valores de las constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local. Los valores de las constantes y los parámetros son definidos para cada modelo de acuerdo a Morosiuk (1996, 1998, 1999). Los Factores de calibración son el resultado del “Estudio Básico Seguimiento de Pavimentos Asfálticos” (MOP, 2010) y del estudio “Seguimiento para la Calibración de Modelos de Deterioro de Pavimentos Asfálticos” (MOP, 2001).

La Tabla 7-11 presenta los valores de las constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local para el modelo de agrietamiento. La Tabla 7-12a y 7-12b los valores para el modelo de ahuellamiento y la Tabla 7-13 para el modelo de rugosidad.

Tabla 7-11 Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de agrietamiento.

Identificación de celda del factorial	Iniciación de todas las grietas						Iniciación de grietas anchas				Progresión de todas las grietas				Progresión de grietas anchas		
	k_{cia}	CDS	a_0	a_1	a_2	CRT	k_{ciw}	a_0	a_1	a_2	k_{cpa}	CRP	a_0	a_1	k_{cpw}	a_0	a_1
CTANB	1,98	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,23	2,46	0,93	0	0,18	1	1,84	0,45	0,53	2,94	0,56
NTANM	2,7	1	4,21	0,14	-17,1	0	1	2,46	0,93	0	0,53	1	1,84	0,45	0,2	2,94	0,56
CTANM	1,98	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,23	2,46	0,93	0	0,18	1	1,84	0,45	0,53	2,94	0,56
STANM	2,1	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,9	2,46	0,93	0	0,26	1	1,84	0,45	0,3	2,94	0,56
NTANA	2,7	1	4,21	0,14	-17,1	0	1	2,46	0,93	0	0,53	1	1,84	0,45	0,2	2,94	0,56
CTANA	1,98	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,23	2,46	0,93	0	0,18	1	1,84	0,45	0,53	2,94	0,56
STANA	2,1	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,9	2,46	0,93	0	0,26	1	1,84	0,45	0,3	2,94	0,56
CTMNB	1,98	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,23	2,46	0,93	0	0,18	1	1,84	0,45	0,53	2,94	0,56
NTMNM	2,7	1	4,21	0,14	-17,1	0	1	2,46	0,93	0	0,53	1	1,84	0,45	0,2	2,94	0,56
STMNM	2,1	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,9	2,46	0,93	0	0,26	1	1,84	0,45	0,3	2,94	0,56
NTMNA	2,7	1	4,21	0,14	-17,1	0	1	2,46	0,93	0	0,53	1	1,84	0,45	0,2	2,94	0,56
STMNA	2,1	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,9	2,46	0,93	0	0,26	1	1,84	0,45	0,3	2,94	0,56
CTBNM	1,98	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,23	2,46	0,93	0	0,18	1	1,84	0,45	0,53	2,94	0,56
STBNM	2,1	1	4,21	0,14	-17,1	0	1,9	2,46	0,93	0	0,26	1	1,84	0,45	0,3	2,94	0,56

Tabla 7-12a Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de ahuellamiento

Identificación de celda del factorial	DENSIFICACIÓN INICIAL							DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL										
	K _{rid}	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	COMP	K _{rst}	Sin agrietamiento				Con agrietamiento					MMP
									a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	
CTANB	0,98	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,87	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	70
NTANM	1,27	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	1,23	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	5
CTANM	0,98	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,87	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	70
STANM	0,59	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,1	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	200
NTANA	1,27	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	1,23	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	5
CTANA	0,98	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,87	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	70
STANA	0,59	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,1	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	200
CTMNB	0,98	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,87	44950	-1,140	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	70
NTMNM	1,27	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	1,23	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	5
STMNM	0,59	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,1	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	200
NTMNA	1,27	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	1,23	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	5
STMNA	0,59	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,1	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	200
CTBNM	0,98	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,87	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	70
STBNM	0,59	51740	0,09	0,038	-0,5	-2,3	95	0,1	44950	-1,14	0,11	-2,3	2E-05	-0,84	0,14	1,07	1,11	200

Tabla 7-12b Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de ahuellamiento

Identificación de celda del factorial	DEFORMACIÓN PLÁSTICA								DESVIACIÓN ESTÁNDAR			
	K _{rpd}	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	CDS	Sh km/h	%HS	K _{rds}	a ₀	a ₁	a ₂
CTANB	1,45	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
NTANM	1,13	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
CTANM	1,45	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
STANM	0,1	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
NTANA	1,13	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
CTANA	1,45	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
STANA	0,1	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
CTMNB	1,45	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
NTMNM	1,13	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
STMNM	0,1	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
NTMNA	1,13	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
STMNA	0,1	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
CTBNM	1,45	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03
STBNM	0,1	0,3	3,27	-0,78	0,71	1	90	1	1	0,2	0,65	0,03

Tabla 7-13 Listado de constantes, parámetros y factores de calibración a nivel local necesarios para ejecutar el modelo de rugosidad.

Identificación de celda del factorial	Componente Estructural				Componente del agrietamiento		Componente del ahuellamiento		Componente ambiental		IRI
	K_{gs}	K_{gm}	a_0	m	K_{gc}	a_0	K_{gr}	a_0	K_{gm}	m	IRIo
CTANB	0,6	1,30	134	0,03	1,66	0,0066	1,08	0,088	1,3	0,03	0,82
NTANM	0,14	0,43	134	0,01	1,47	0,0066	0,17	0,088	0,43	0,01	1,2
CTANM	0,6	1,30	134	0,03	1,66	0,0066	1,08	0,088	1,3	0,03	0,82
STANM	0,45	1,74	134	0,04	1,6	0,0066	0,78	0,088	1,74	0,05	0,94
NTANA	0,14	0,43	134	0,01	1,47	0,0066	0,17	0,088	0,43	0,01	1,2
CTANA	0,6	1,30	134	0,03	1,66	0,0066	1,08	0,088	1,3	0,03	0,82
STANA	0,45	1,74	134	0,04	1,6	0,0066	0,78	0,088	1,74	0,05	0,94
CTMNB	0,6	1,30	134	0,03	1,66	0,0066	1,08	0,088	1,3	0,03	0,82
NTMNM	0,14	0,43	134	0,01	1,47	0,0066	0,17	0,088	0,43	0,01	1,2
STMNM	0,45	1,74	134	0,04	1,6	0,0066	0,78	0,088	1,74	0,05	0,94
NTMNA	0,14	0,43	134	0,01	1,47	0,0066	0,17	0,088	0,43	0,01	1,2
STMNA	0,45	1,74	134	0,04	1,6	0,0066	0,78	0,088	1,74	0,05	0,94
CTBNM	0,6	1,30	134	0,03	1,66	0,0066	1,08	0,088	1,3	0,03	0,82
STBNM	0,45	1,74	134	0,04	1,6	0,0066	0,78	0,088	1,74	0,05	0,94

7.2.3. Etapa 3 Obtención de las variables aleatorias básicas vida de diseño $f_R(r)$ y vida útil $f_S(s)$

La Figura 7-3 describe la metodología seguida para desarrollar y ejecutar el modelo de simulación.

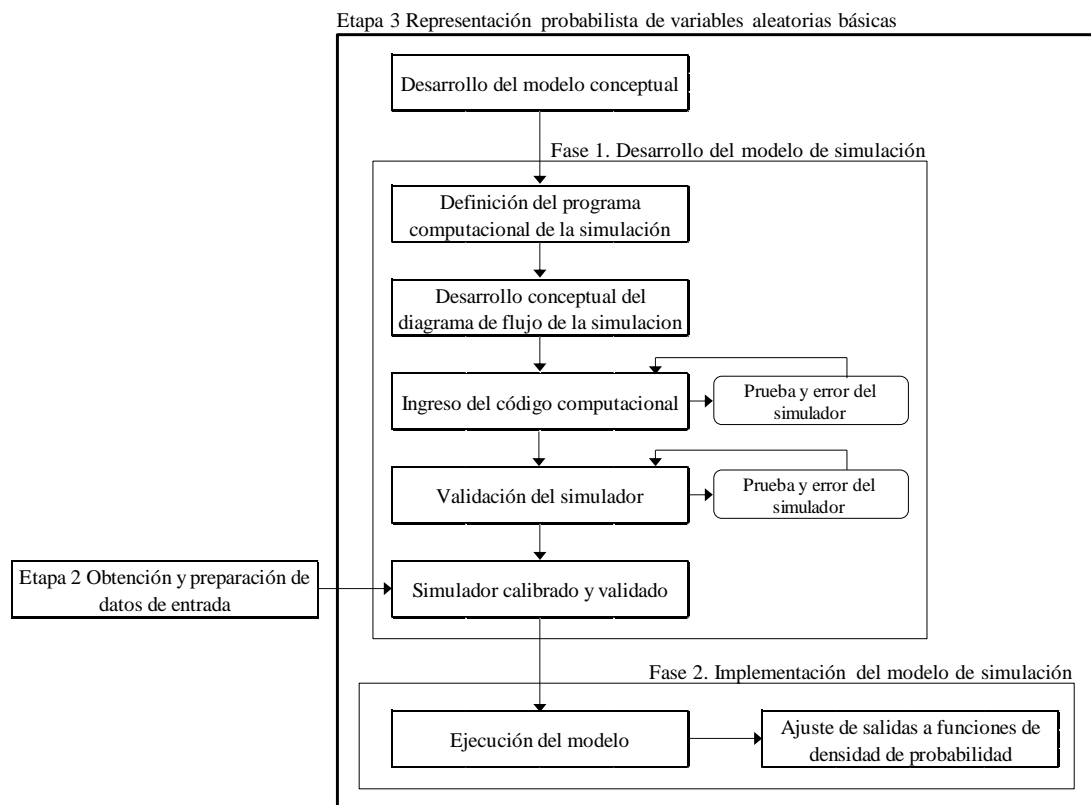


Figura 7-3 Modelo conceptual para el desarrollo del simulador de las variables aleatorias básicas vida útil $f_S(s)$ y vida de diseño $f_R(r)$

Consiste en el desarrollo y aplicación de un modelo de simulación que reproduce la estimación del método de diseño y de los modelos de comportamiento de pavimentos,

según lo expuesto en los capítulos 2, 3 y 6. El simulador se ejecuta de manera reiterada y el conjunto de respuestas serán sometidas a un test bondad para identificar la función de densidad de probabilidad que mejor reproduce las salidas, obteniéndose las variables aleatorias vida de diseño y vida útil

Lo primero que debió definirse fue el modelo conceptual, para luego continuar con dos fases de desarrollo.

a) Modelo conceptual de la simulación

El desarrollo del modelo conceptual requirió la definición de algunos conceptos:

- Problema de simulación
 - Simular la vida útil de un pavimento asfáltico en caliente por medio de los modelos de comportamiento propuestos por Morosiuk (1996, 1998, 1999).
 - Simular la vida diseño de un pavimento asfáltico en caliente por medio del método de diseño AASHTO-93.
- Objetivo del modelo de simulación
 - Caracterizar la estimación anual del deterioro de un pavimento asfáltico en caliente para un ciclo de vida de 25 años, por medio de funciones de densidad de probabilidad. Utilizando datos de campo para cada grupo de caminos que hace parte del diseño factorial.
 - Caracterizar la estimación de vida de diseño de un pavimento asfáltico en caliente, por medio de funciones de densidad de probabilidad. Utilizando datos de campo para cada grupo de caminos que hacen parte del diseño factorial.

- Las entradas y salidas

Los datos de entrada del modelo correspondieron a: variables de entrada, factores calibración, coeficientes y parámetros, que provienen de información que se obtuvo como se indicó en el ítem 7.2.1 al inicio de este capítulo y cuyas expresiones matemáticas se presentan en los capítulos 2, 3 y 6.

Las salidas corresponden a reportes almacenados en bases de datos, a partir de los cuales se pudo calcular indicadores, parámetros estadísticos, gráficos y la representación probabilística de las variables aleatorias básicas $f_R(r)$ y $f_S(s)$.

b) Fase 1: Desarrollo del modelo de simulación.

Elegida la herramienta computacional, se desarrolló el diagrama de flujo y se ingresó el código computacional según el lenguaje de programación.

La estructura principal del modelo de simulación se basó en el método de Montecarlo (Williams, 2002), que permite evaluar el riesgo o la confiabilidad de sistemas complejos en ingeniería utilizando números aleatorios asociados a funciones de densidad de probabilidad (Haldar & Mahadevan, 2000). Una de sus grandes ventajas es que permite determinar la probabilidad conjunta cuando se incorporan más de dos variables aleatorias en un problema como sucede en este caso. El método consiste en elegir números aleatorios que son asociados a una probabilidad, luego se establece en las funciones de densidad que representan las variables de entrada los valores deterministas de la variable, con los cuales se ejecuta el simulador. La salida por lo tanto, representa una respuesta determinista del fenómeno. Este proceso se repite un número de ciclos que se establece mediante la elección de un nivel de confianza que se espera obtener en la respuesta del simulador.

Esta fase finaliza con la calibración y validación del modelo de simulación, que se desarrolló mediante procesos iterativos de ensayo y error de la respuesta.

Para la implementación del simulador se utilizó la herramienta computacional Visual Basic con Aplicaciones (VBA). El código computacional desarrollado puede encontrarse en el Anexo 5.

c) Fase 2: Implementación del modelo de simulación.

Con el modelo de simulación desarrollado y definidos los datos de entrada, se inició la ejecución del simulador utilizando la información correspondiente de cada celda del diseño factorial.

Las salidas que entrega el simulador que ejecuta los modelos de agrietamiento, ahuellamiento y rugosidad, pueden ser ajustadas a fdp por medio de un test de ajuste. A manera de ejemplo, en el Anexo 6 se presentan las fdp que representan las salidas del modelo de agrietamiento.

Finalmente, con los datos de salida del simulador se definen el fdp que caracterizan la variable aleatoria básica vida útil (Tabla 7-14) y la vida de diseño (Tabla 7-15) para cada celda del diseño factorial.

Para el estudio del caso propuesto, las variables aleatorias se evaluaron para una condición de serviciabilidad final (P_f) de 2,0, con lo cual se estima la vida correspondiente del pavimento.

Analizando la Tabla 7-14, puede observarse que no todas las celdas del factorial tienen asociada un fdp correspondiente a la vida útil, esto se debe a que luego de realizar la simulación durante un tiempo de 25 años, algunos pavimentos no alcanzaron el nivel de deterioro correspondiente a una serviciabilidad de 2,0.

Por lo anterior el análisis de confiabilidad solo pudo realizarse para 7 de las 14 celdas factorial.

Tabla 7-14 Listado de funciones de densidad de probabilidad que describe la variable aleatoria básica vida útil $f_S(s)$ con $P_f = 2,0$.

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros	Medía	Desviación estándar
CTANB	Weibull Valor-P - 0,00224136	forma = 3,23484	15,787	5,3626
		escala = 17,6169		
NTANM				
CTANM	Normal Valor-P - 0,00529752	media = 13,5815	13,582	1,9311
		desviación estándar = 1,93114		
STANM	Weibull Valor-P - 0,0197068	forma = 3,67627	23,957	7,253
		escala = 26,5556		
NTANA				
CTANA	Lognormal Valor-P - 0,782578	media = 49,696	49,696	2,68331
		desviación estándar = 2,68331		
STANA	Weibull Valor-P - 0,0157797	forma = 4,70203	31,992	7,7503
		escala = 34,9677		
CTMNB	Weibull Valor-P - 0,000281651	forma = 1,99922	9,8188	5,1343
		escala = 11,0793		
NTMNM				
STMNM	Weibull Valor-P - 0,00062051	forma = 8,01535	12,398	1,8362
		escala = 13,1635		
NTMNA				
STMNA				
CTBNM				
STBNM				

Tabla 7-15 Listado de funciones de densidad de probabilidad que describe la variable aleatoria básica vida de diseño $f_R(\mathbf{r})$ con $P_f = 2,0$.

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros	Medía	Desviación estándar
CTANB	Weibull Valor-P - 0,360813	forma = 0,974783	5,0555	5,1868
		escala = 4,99943		
NTANM	Weibull Valor-P - 0,177449	forma = 1,39273	135,23	98,347
		escala = 148,248		
CTANM	Weibull Valor-P - 0,0138634	forma = 1,1869	149,12	126,12
		escala = 158,077		
STANM	Weibull Valor-P - 0,0129864	forma = 0,943589	24,208	25,668
		escala = 23,5765		
NTANA	Weibull Valor-P - 1,22872E-7	forma = 15,8869	20,905	1,6179
		escala = 21,6097		
CTANA	Lognormal Valor-P - 0,499862	media = 1218,39	1218,39	719,816
		desviación estándar = 719,816		
STANA	Weibull Valor-P - 0,131095	forma = 0,62814	1257,3	2089,3
		escala = 884,764		
CTMNB	Weibull Valor-P - 0,249786	forma = 0,461553	45,937	115,27
		escala = 19,5896		
NTMNM	Lognormal Valor-P - 0,19811	media = 203,453	203,453	45,807
		desviación estándar = 45,807		
STMNM	Weibull Valor-P - 0,0842702	forma = 1,05011	145,09	138,22
		escala = 147,94		
NTMNA	Weibull Valor-P - 0,0376803	forma = 0,488178	3507,1	8111,6
		escala = 1676,13		
STMNA	Lognormal Valor-P - 0,227313	media = 658,879	658,879	161,074
		desviación estándar = 161,074		
CTBNM	Weibull Valor-P - 0,314002	forma = 1,76468	102,81	60,171
		escala = 115,487		
STBNM	Lognormal Valor-P - 0,00026122	media = 23,6787	23,6787	22,4331
		desviación estándar = 22,4331		

7.2.4. Etapa 4 Análisis de confiabilidad

El procedimiento desarrollado en el caso de estudio se describe en el Capítulo 6, e inicia con la definición de tres niveles de variación para la variable módulo resiliente (M_R) que era requerido para realizar la simulación de la vida de diseño.

El estudio supuso un valor de serviciabilidad final (P_f) de 2 para evaluar la vida de diseño y la vida útil. El tiempo de simulación correspondió a 25 años. Luego de desarrollada la simulación se encontró que solo 7 de las 14 celdas del factorial habían alcanzado el valor propuesto de serviciabilidad final (P_f).

Definidas las celdas con las cuales se podría desarrollar el análisis de confiabilidad, se procedió con la variación de la desviación estándar del Modulo Resiliente (MR), que se requería para ejecutar el modelo de vida de diseño y darle mayor o menor variación a la respuesta de la variable.

La variación de la desviación estándar se desarrollo bajo el criterio de no superar el coeficiente de variación (COV) mas alla de 50 % y tratando de mantener un valor mayor y otro menor del COV de la variable M_R original.

La Tabla 7-16 presenta el resumen de las variables aleatorias M_R utilizadas, con las correspondientes variaciones de la desviación estándar, manteniendo el valor de la media. También se especifica la variable original y la celda del factorial a la cual se asocia.

Tabla 7-16 Variaciones de la desviación estándar de la variable aleatoria Módulo Resiliente (M_R)

Código de Grupo	Tipo de Distribución	Media	Desv. Est.	Coeficiente de correlación COV	
CTANB	Lognormal	9.502,35	1.769,91	0,19	Nivel 1
		9.502,35	3.769,91	0,40	Función Original
		9.502,35	4.769,91	0,50	Nivel 3
CTANM	Lognormal	21.419,60	2.186,47	0,10	Nivel 1
		21.419,60	5.186,47	0,24	Función Original
		21.419,60	9.186,47	0,43	Nivel 3
STANM	Lognormal	12.749,30	1.021,67	0,08	Nivel 1
		12.749,30	2.021,67	0,16	Función Original
		12.749,30	6.021,67	0,47	Nivel 3
CTANA	Lognormal	16.475,00	2.056,10	0,12	Nivel 1
		16.475,00	3.056,10	0,19	Función Original
		16.475,00	7.056,10	0,43	Nivel 3
STANA	Lognormal	19.236,40	4.659,20	0,24	Nivel 1
		19.236,40	12.659,20	0,66	Función Original
		19.236,40	7.659,20	0,40	Nivel 3
CTMNB	Lognormal	16.491,50	2.206,57	0,13	Nivel 1
		16.491,50	5.206,57	0,32	Función Original
		16.491,50	7.206,57	0,44	Nivel 3
STMNM	Lognormal	15.766,80	882,09	0,06	Nivel 1
		15.766,80	1.882,09	0,12	Función Original
		15.766,80	6.882,09	0,44	Nivel 3

Posteriormente se desarrolla la simulación de la vida de diseño y se obtienen las funciones de densidad de probabilidad (fdp) que la caracterizan, de acuerdo a los tres niveles de variación del M_R . Las fdp que caracterizan la variable aleatoria vida útil, se obtiene a partir del procedimiento descrito en 6.2.2. En la Tabla 7-17 se presenta el resumen de las fdp que representan la vida útil y las tres que caracterizan la vida de diseño según el nivel de variación, para cada celda del factorial utilizado en el caso de estudio.

Tabla 7-17 Listado de funciones de densidad de probabilidad de las variables aleatorias básicas vida útil y vida de diseño requeridas para el análisis de confiabilidad del caso de estudio

Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO ORIGINAL CON Pf = 2,0		VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros	Tipo de Distribución	Parámetros	Tipo de Distribución	Parámetros	Tipo de Distribución	Parámetros
CTANB	Weibull Valor-P 0,00224136	forma = 3,23484	Lognormal Valor-P 0,00161479	media = 5,87105E6	Lognormal Valor-P 0,00748064	media = 6,25407E6	Lognormal Valor-P 0,168538	media = 4,70301E6
		escala = 17,6169		desviación estándar = 1,0803E7		desviación estándar = 1,18763E7		desviación estándar = 1,13363E7
CTANM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 13,5815	Lognormal Valor-P 0,0000133656	media = 1,6369E8	Lognormal Valor-P 0,0000134668	media = 1,63724E8	Lognormal Valor-P 0,0603493	media = 2,0276E8
		desviación estándar = 1,93114		desviación estándar = 2,20153E8		desviación estándar = 2,20199E8		desviación estándar = 3,27179E8
STANM	Weibull Valor-P 0,0197068	forma = 3,67627	Lognormal Valor-P 0,0134679	media = 2,71801E7	Lognormal Valor-P 0,0134186	media = 2,71873E7	Lognormal Valor-P 0,153334	media = 3,0085E7
		escala = 26,5556		desviación estándar = 4,94001E7		desviación estándar = 4,94133E7		desviación estándar = 6,98079E7
CTANA	Lognormal Valor-P 0,782578	media = 49,696	Lognormal Valor-P 0,499862	media = 1,21839E9	Lognormal Valor-P 0,496644	media = 1,21861E9	Lognormal Valor-P 0,0356208	media = 8,91614E8
		desviación estándar = 2,68331		desviación estándar = 7,19816E8		desviación estándar = 7,19946E8		desviación estándar = 8,28609E8
STANA	Weibull Valor-P 0,0157797	forma = 4,70203	Lognormal Valor-P 0,0877472	media = 1,85162E9	Lognormal Valor-P 0,0872977	media = 1,85226E9	Lognormal Valor-P 0,0876251	media = 1,85179E9
		escala = 34,9677		desviación estándar = 9,05479E9		desviación estándar = 9,0579E9		desviación estándar = 9,05563E9
CTMNB	Weibull Valor-P 0,000281651	forma = 1,99922	Lognormal Valor-P 0,00261009	media = 1,19743E8	Lognormal Valor-P 0,137916	media = 1,19781E8	Lognormal Valor-P 0,00741629	media = 1,04533E8
		escala = 11,0793		desviación estándar = 2,40309E9		desviación estándar = 2,40383E9		desviación estándar = 2,26175E9
STMNM	Weibull Valor-P 0,00062051	forma = 8,01535	Lognormal Valor-P 0,00000848425	media = 1,72344E8	Lognormal Valor-P 3,27814E-7	media = 1,79806E8	Lognormal Valor-P 0,00712625	media = 1,41622E8
		escala = 13,1635		desviación estándar = 3,06401E8		desviación estándar = 3,22315E8		desviación estándar = 3,1111E8

Una vez definidas las variables aleatorias básicas vida de diseño y vida útil se realiza el análisis de confiabilidad utilizando el Método de Confiabilidad de Primer Orden (First-Order Reliability Methods FORM), que entrega el índice de confiabilidad β_{HL} y la probabilidad de falla a través del uso del programa Comrel-8 ®.

El análisis de confiabilidad se realizó para cada nivel de covarianza COV de la variable M_R , que ahora se encuentra implícito en la respuesta de la variable aleatoria básica vida de diseño $f_R(r)$.

Posteriormente se modificó el valor de la media de las nuevas variables aleatorias básicas $f_R(r)$ obtenida según se mencionó antes y se realizó un nuevo análisis de confiabilidad, definiéndose una serie de valores de probabilidad de falla e índice de confiabilidad β_{HL} , para cada nivel de COV y para cada una de las celdas del factorial. Un ejemplo de este análisis puede encontrarse en la Figura 7-4 y la totalidad de ellos para cada celda del factorial en el Anexo 7.

El anterior procedimiento busco desplazar la fdp vida de diseño, de tal manera que se acerque y/o aleje de la fdp vida útil, de esta manera se definieron valores de probabilidad de falla para cada desplazamiento que pueden ser utilizados en el método de diseño. Las iteraciones pueden observarse en la Figura 7-4 y en el Anexo 7.

Adicionalmente, la Figura 7-4 contiene dos graficos, en el primero se representa la variación de la confiabilidad contra el β_{HL} y en el segundo la vida de diseño (ejes equivalentes de 80 kN) vs la probabilidad de éxito, para cada nivel del factorial. Ambos análisis bajo la misma fdp que representa la vida útil. Estas gráficas permiten elegir el valor de confiabilidad en términos de la vida de diseño.



Figura 7-4 Iteraciones en base al análisis de confiabilidad para definir el β_{HL} y la probabilidad de falla

El índice de confiabilidad β_{HL} de acuerdo al Capítulo 5 corresponde al valor en la Función de Distribución Probabilidad Normal asociado a la probabilidad de éxito, que representa el punto de diseño, es decir la distancia mas corta desde el origen de coordenadas a la superficie de falla y por lo tanto el valor Z_R utilizado en la formula de diseño AASHTO-93.

Como producto de las iteraciones se obtiene la Tabla 7-18, en la que se presenta las funciones de densidad probabilidad $f_R(r)$ y $f_S(s)$ utilizadas en el caso de estudio, el valor medio (μ) correspondiente, así como los valores de confiabilidad que están relacionados con el término $\beta_{HL}(Z_R)$, y el coeficiente de relación (COV) para cada una de las celdas del factorial.

Tabla 7-18 Valores de Z_R y S_o para caminos localizados en Chile

No Grupo	Identificación de celda Factorial	Confiabilidad %	Nivel			
			$COV_1 = \delta_o/v$	$COV_2 = \delta_o/v$	$COV_3 = \delta_o/v$	
1	CTANB		0,40	0,19	0,50	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,899	0,829	0,786	
		0,900	1,080	1,031	0,917	
		0,950	1,260	1,277	1,049	
		0,975	1,435	1,639	1,182	
3	CTANM		0,24	0,10	0,43	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,851	0,825	0,830	
		0,900	1,028	1,032	1,039	
		0,950	1,254	1,309	1,273	
		0,975	1,634	1,697	1,629	
4	STANM		0,16	0,08	0,47	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,858	0,858	0,849	
		0,900	1,056	1,056	1,058	
		0,950	1,282	1,282	1,297	
		0,975	1,650	1,650	1,556	
6	CTANA		0,19	0,12	0,43	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,851	0,851	0,858	
		0,900	1,051	1,052	1,053	
		0,950	1,689	1,803	1,416	
		0,975	2,050	2,191	1,570	
7	STANA		0,66	0,24	0,40	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,833	0,833	0,836	
		0,900	1,028	1,029	1,029	
		0,950	1,283	1,283	1,283	
		0,975	1,618	1,610	1,634	
8	CTMNB		0,32	0,13	0,44	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,848	0,848	0,850	
		0,900	1,040	1,041	1,055	
		0,950	1,269	1,269	1,285	
		0,975	1,659	1,660	1,648	
10	STMNM		0,12	0,06	0,44	β_{HL} / Z_R
		0,850	0,830	0,840	0,831	
		0,900	1,042	1,049	1,021	
		0,950	1,290	1,309	1,275	
		0,975	1,646	1,636	1,634	

7.3. Análisis de resultado del caso de estudio

En esta parte de la tesis se busca realizar análisis de los desarrollos alcanzados a lo largo de las distintas etapas que se ejecutaron en el caso de estudio.

Inicialmente se hablara de los modelos de comportamiento, luego del modelo de vida útil y posteriormente del análisis de confiabilidad realizado a pavimentos localizados en Chile.

7.3.1. Modelos de comportamiento

A continuación se presenta un análisis de los resultados encontrados en relación al modelo de agrietamiento, sin embargo se hace claridad de que análisis similares al que a continuación se exponen pueden desarrollarse para los modelos de ahuellamiento, rugosidad y serviciabilidad. Este aparte finaliza con la presentación de un caso de aplicación de la evaluación probabilista del modelo agrietamiento.

a) 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 7-5 y 7-6 presentan una muestra de 6 respuestas (funciones de probabilidad fdp) para estos modelos y para los mismos grupos de caminos según la identificación asignada en Tabla 7-2. 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 7-5) y de los modelos iniciación de agrietas estructurales anchas

(ICW) (Figura 7-6) 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.

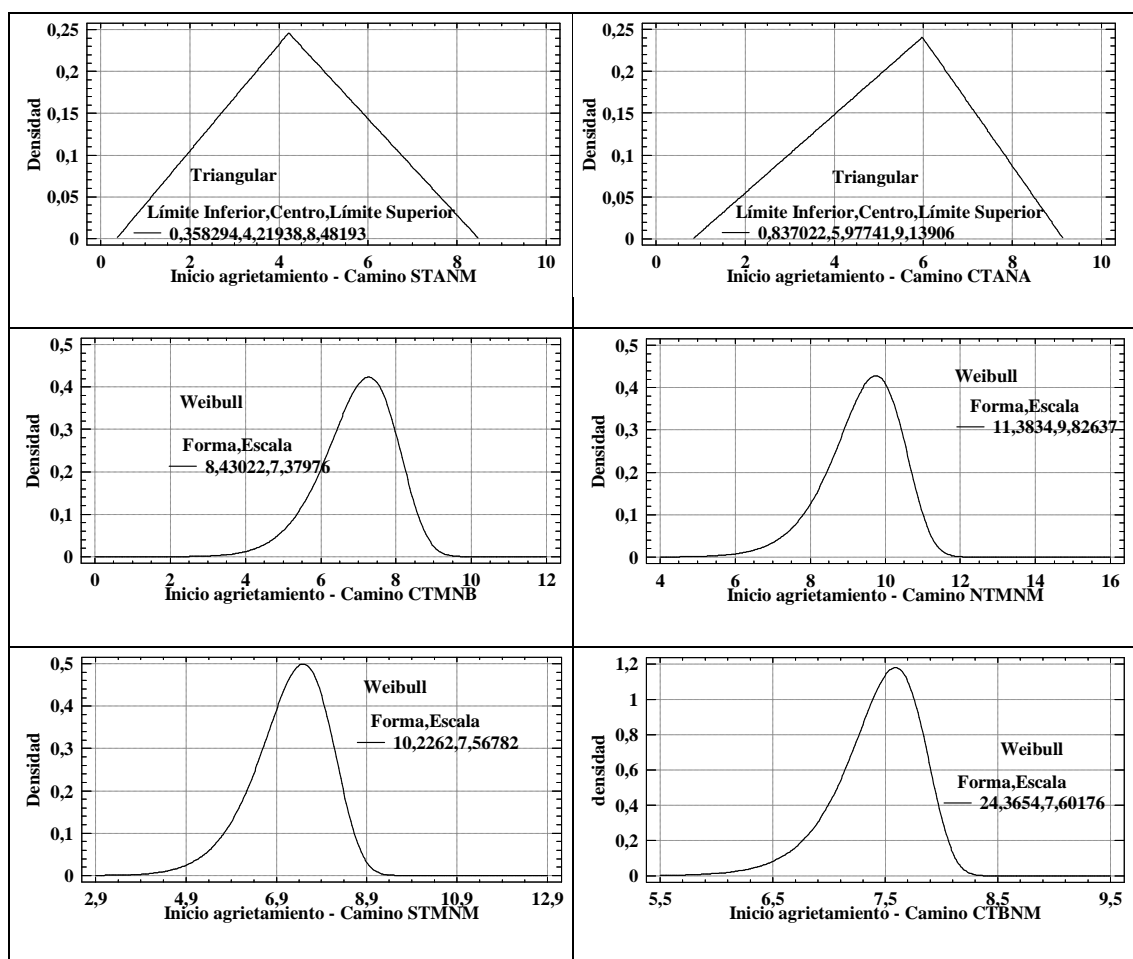


Figura 7-5 Funciones de densidad de probabilidad que representan la respuesta del modelo de iniciación de todas las grietas estructurales ICA, para 6 grupos de caminos.

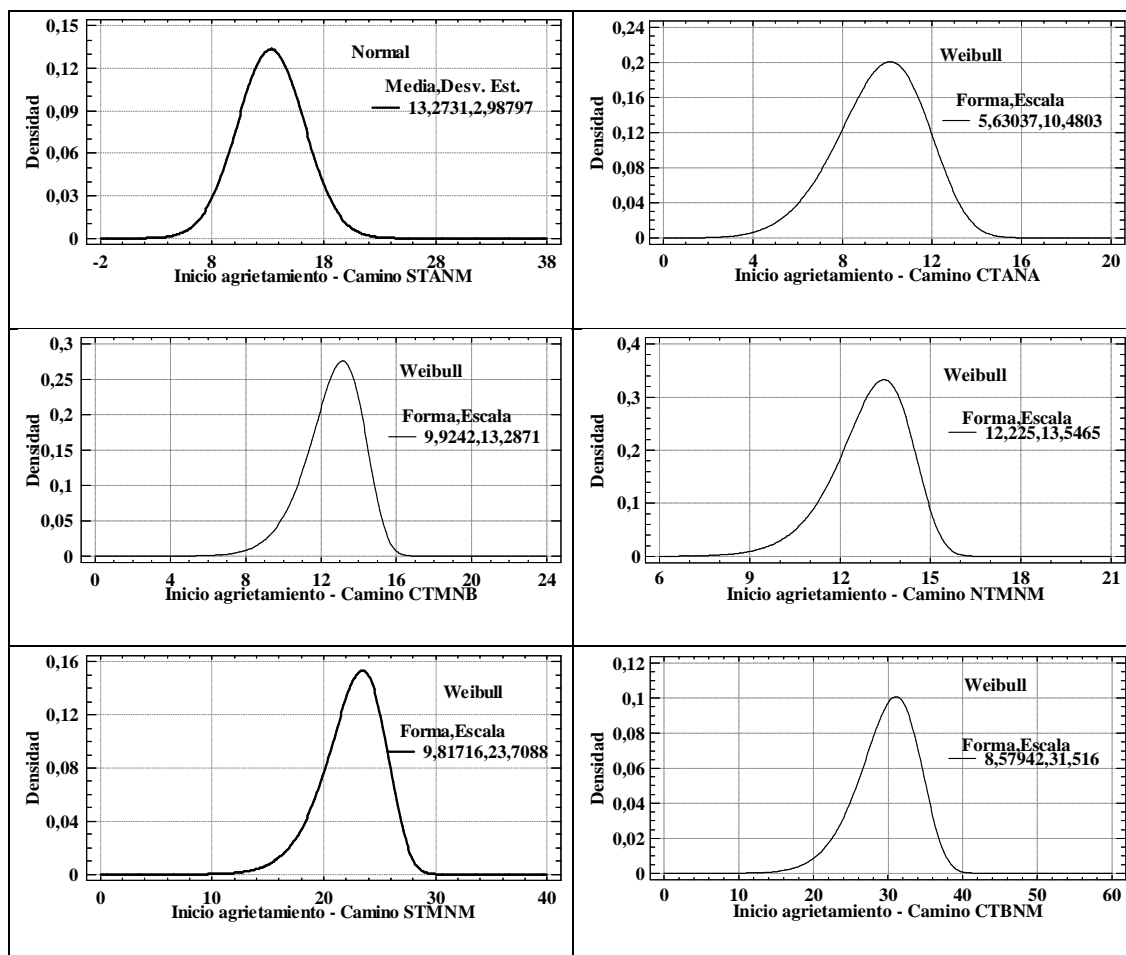


Figura 7-6 Función de densidad de probabilidad, que representa la respuesta del modelo de iniciación de grietas estructurales anchas ICW, para 6 grupos de caminos.

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.

b) Modelos progresión de agrietas

Las respuestas de los modelos de 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.

Por simplicidad en la Figura 7-7 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 progresión de agrietamiento total ACA y progresión de grietas anchas ACW clasificados según la región geográfica para el mismo tipo de tránsito y capacidad estructural.

Para los caminos ubicados en la zona norte se aprecia que el modelo de progresión de todas las grietas estructurales (ACA) presenta mayor pendiente que los modelos de progresión de grietas estructurales anchas (ACW), indicando que el primero posee una tasa de deterioro más acelerada que el segundo, independiente de la intensidad del tránsito y de la capacidad estructural (Figura 7-7a).

Para todos los caminos de la zona norte (Figura 7-7a). Del total de la zona agrietada pronosticada por el modelo de progresión de todas las grietas estructurales (ACA), la mayor parte del área agrietada corresponde a grietas angostas (menores a 3 mm), con una menor participación de grietas anchas (grietas mayores a 3 mm). Independiente de la intensidad del tránsito y la capacidad estructural del pavimento.

Si se evalúa el modelo de progresión de todas las grietas estructurales ACA (Figura 7-7a, 7-7b, 7-7c), los caminos ubicados en la zona norte sufren mayores porcentajes de deterioro al final del ciclo de vida, si se comparan con caminos ubicados en otras zonas del país, independientemente de la intensidad del tránsito y de la capacidad estructural del pavimento.

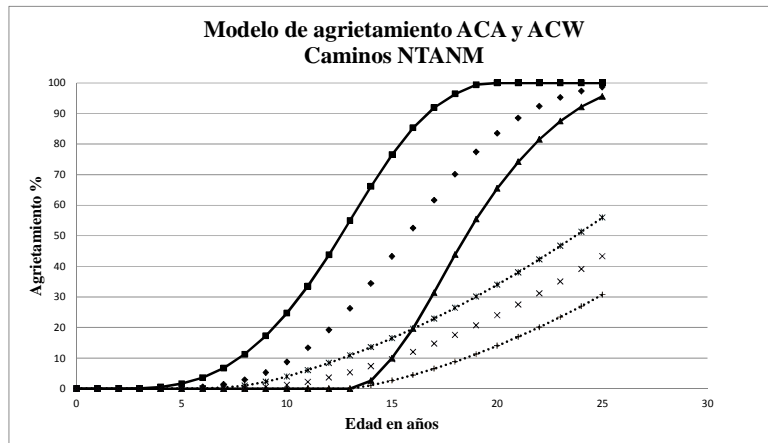
En general se encontró que bajo cualquier condición de tránsito y de capacidad estructural, los caminos localizados en la zona norte postergar por más tiempo el inicio de todas las grietas y de grietas anchas estructurales, en comparación con caminos ubicados en el centro y sur del país.

De los tres grupos geográficos de caminos analizados, los caminos ubicados en la zona centro del país, son los que presentan menores valores de deterioro alcanzado durante el ciclo de vida analizado, independiente de la condición de tránsito y de la capacidad estructural del pavimento (Figura 7-7a, 7-7b, 7-7c) y se cumple para los modelos de progresión de todas las grietas y grietas anchas estructurales.

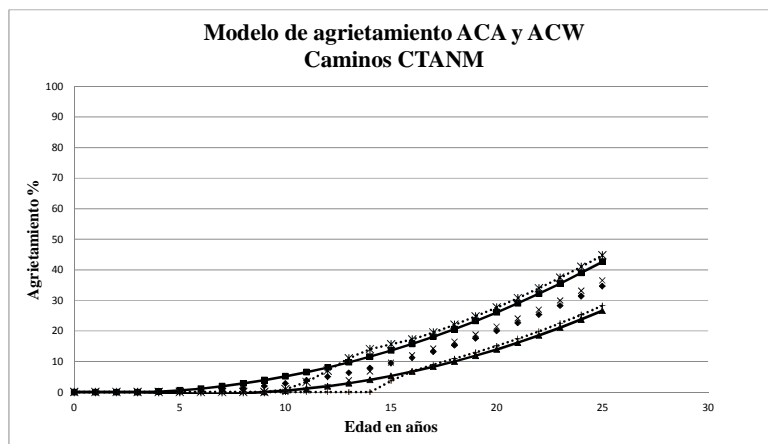
Los caminos de la zona centro presentaron los menores valores de deterioro en comparación con caminos localizados en otras zonas geográficas, con porcentajes de agrietamiento que rondan el 50% del área del pavimento al final del ciclo de vida analizado (Figura 7-7a, 7-7b, 7-7c).

Los caminos de la zona sur presentaron los mayores valores de agrietamiento ancho en comparación con caminos localizados en otras zonas geográficas.

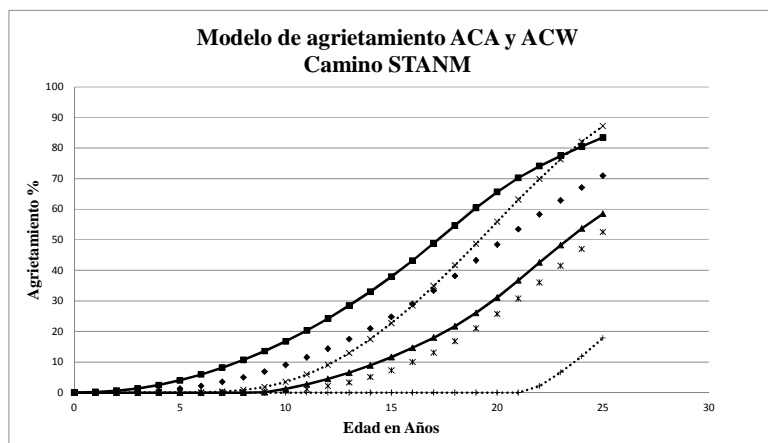
El modelo ICA entrega 14 respuestas, una para cada grupo de caminos, representada por una función de densidad de probabilidad, donde el 57% de las celdas del factorial fueron mejor representados por funciones triangulares y el 36% por funciones de densidad Weibull.



(a)



(b)



(b)

Figura 7-7 Valores medios e intervalo de confianza del 95%, de las funciones de densidad de probabilidad, modelo de agrietamiento ACA y ACW.

El modelo ICW entrega 14 respuestas una para cada grupo de caminos, representada por una función de densidad de probabilidad, donde el 21% de las celdas del factorial fueron mejor representados por funciones triangulares y el 50% por funciones de densidad Weibull.

El modelo ACA entrega como respuesta una función de densidad de probabilidad para cada año del periodo de análisis, donde, el 23% de las respuestas para cada año fueron mejor representadas por funciones exponenciales, el 39% por funciones de densidad triangular y el 24% por funciones de densidad de probabilidad lognormal.

El modelo ACW entrega como respuesta una función de densidad de probabilidad para cada año del periodo de análisis, donde el 33% de las respuestas para cada año fueron mejor representados por funciones exponenciales, el 28% por funciones de densidad triangular y el 18% por funciones de densidad de probabilidad lognormal.

c) Caso de aplicación

Una Agencia vial desea realizar el pronóstico de un diseño estructural para un camino localizado en la zona sur del país, con tránsito alto y un número estructural medio (STANM). La Agencia esta interesada en saber cual sería el año en el que se iniciarían las grietas anchas estructurales para realizar la programación de un tratamiento superficial, orientado a sellar este deterioro. Además desea conocer en el año 10 de estar en servicio el pavimento, el valor de agrietamiento para realizar comparaciones con los valores máximos aceptados (15%), con el fin de evaluar las posibilidades de mantenimiento. La Agencia desea que estos análisis se realicen con una probabilidad de ocurrencia de 60%.

Para realizar el análisis del camino como lo desea la Agencia, se presenta la Figura 7-8, en la cual se presentan las graficas de las funciones densidad de probabilidad y densidad acumulada, para los modelos de iniciación y progresión de todas las grietas estructurales y grietas anchas estructurales, para el camino denominado STANM.

Analizando las graficas que se presentan en la Figura 7-8, se puede concluir que:

Si se observa en detalle la parte A, se puede establecer del grafico de probabilidad acumulada, que para una probabilidad del 60%, la iniciación de todas las grietas estructurales se originará a 4,76 años de puesto en servicio el pavimento. Además, evaluando la parte B, para el caso del modelo iniciación de grietas anchas, el inicio del modelo se estima a una edad de 14,03 años, establecido con la misma probabilidad.

Evaluando la parte C, se puede calcular con una probabilidad del 60% que el porcentaje de área afectada con grietas totales para el año 10 de estar en servicio la carretera, se estima en 10%. Además, analizando la parte D, se establece que el porcentaje de área afectada con grietas anchas será de 1,05%.

Con los anteriores datos la agencia podrá programar y definir con mayor criterio sus intervenciones, además de poder establecer con mayor seguridad el flujo de dinero de su inversión. De esta manera se concluye que se debe programar un sello asfaltico al final del año 4 y que para el año 10 no se han alcanzado los umbrales mínimos de intervención del corredor, según los datos establecidos por la Agencia.

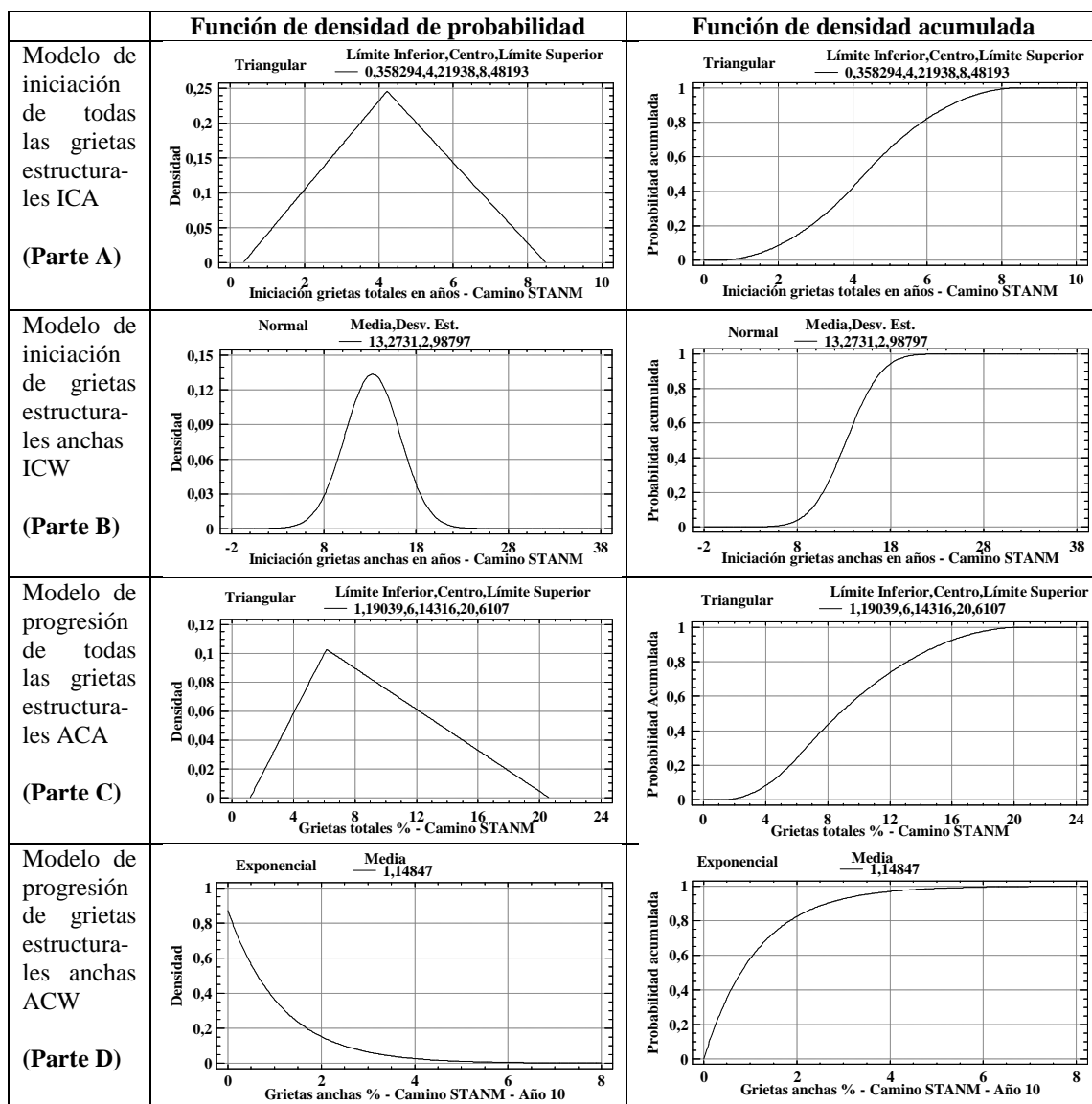


Figura 7-8 Gráficos de funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada para los modelos ICA, ICW, ACA y ACW del camino NTANM.

7.3.2. Modelo de vida de diseño

La respuesta del modelo entrega una función de densidad de probabilidad que establece el pronóstico de ejes equivalentes de 80 kN que representa la vida de diseño para cada grupo de caminos que hicieron parte de la matriz factorial (Tabla 7-15).

La Figura 7-9 presenta una muestra de 6 de las 14 respuestas (funciones de probabilidad fdp) de la simulación de la formula de diseño AASHTO-93 para los diferentes grupos de caminos estudiados.

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

Todas las respuestas del modelo son asimétricas, trece 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.

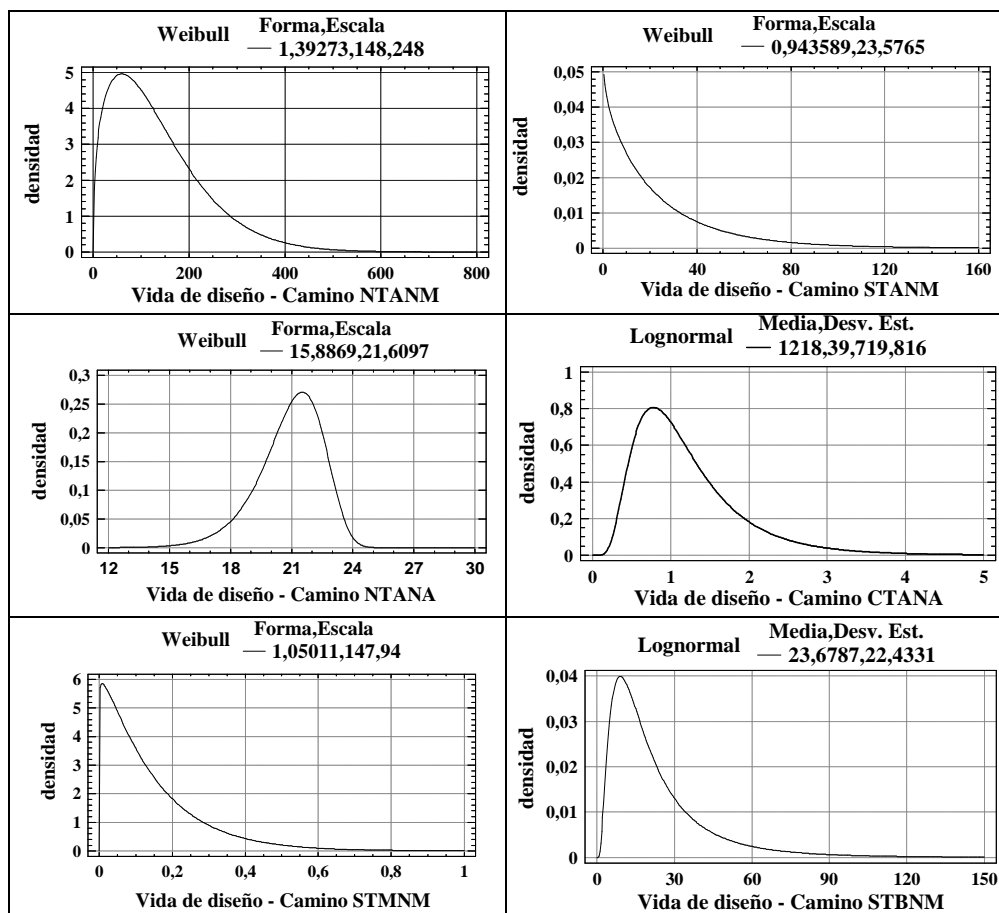


Figura 7-9 Funciones de densidad de probabilidad que describen la variable aleatoria básica vida de diseño establecida mediante la simulación de la formula de diseño AASHTO-93.

Trece 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 presentaron 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.

De las respuestas entregadas por el método de diseño AASHTO-93, diez grupos del factorial son representados por funciones de probabilidad del tipo Weibull y las cuatro restantes por Lognormal (Tabla 7-15). Todas las distribuciones de probabilidad, corresponden a funciones distribución de vida (life distribution), que son un modelo de probabilidad asociado a una variable de vida (Marshall, Olkin, 2007), que se caracterizan por ser asimétricas, sesgadas positivamente, que evalúan y predicen adecuadamente la vida de diseño.

La Tabla 7-19 presenta el valor determinista promedio del número de ejes equivalentes que circulará durante la operación, estimado mediante la proyección del tránsito a 25 años con la ayuda de la información del censo vehicular contenido en la base de datos del MOP.

Tabla 7-19 Valores determinista de los ejes equivalentes en millones por pista

	Número de aplicaciones de ejes equivalentes de 80 kN para el tiempo de diseño en millones													
	34,2	39,1	15,7	18,6	12,0	22,6	19,8	7,0	6,9	4,5	11,7	6,5	3,0	1,0
Identificación celda del Factorial	CTANB	NTANM	CTANM	STANM	NTANA	CTANA	STANA	CTMNB	NTMNM	STMNM	NTMNA	STMNA	CTBNM	STBNM
Probabilidad de alcanzar la vida de diseño	0,002	0,851	1,000	0,456	1,000	1,000	1,000	0,541	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Al realizar una comparación entre los resultados probabilistas entregados por fdp encontradas en esta investigación y los valores deterministas del número de ejes equivalentes (Tabla 7-18), se puede decir que la mayoría de grupos de pavimentos tienen el 100% de probabilidad de alcanzar olgadamente la vida de diseño, salvo los grupos de pavimentos CTANB (0,2%), STANM (0,4556 %) y CTMNB (0,541%) presentan

probabilidades diferentes de alcanzar la vida de diseño, lo que indicando que la mayoría de la estructuras analizadas se encuentran sobredimensionadas.

7.3.3. Análisis de confiabilidad

En relación a los resultados alcanzados en el análisis de confiabilidad se presenta la Tabla 7-20, en ella se encuentran resumidas las fdp que representan la vida útil y la vida de diseño en su condición original (sin modificar la desviación estándar de la variable M_R en la simulación de $f_s(s)$), para los grupos de pavimentos utilizados en la investigación. También se encuentran los resultados de Z_R , COV, probabilidad de falla y probabilidad de éxito.

Observando en detalle estos resultados, se puede decir que:

- a) En el conjunto de pavimentos con los cuales se realizó el análisis de confiabilidad, no hay participación de estructuras localizadas en la zona norte del país, situación que se debe como se mencionó antes, a que apesar de que el tiempo de simulación fue de 25 años, durante el cual se tomó en cuenta los ejes equivalentes que según el estudio de tránsito circularían, el deterioro de la estructuras no alcanzó la serviciabilidad final propuesta para el estudio.
- b) Los pavimentos localizados en la zona central del país, con capacidad estructural baja, tránsito medio y alto no poseen la confiabilidad suficiente para garantizar que cuando sean puestos en servicio alcancen la vida útil estimada por el diseño. El pavimento CTANB, muestra la menor confiabilidad, lo que concuerda con el análisis planteado en el ítem anterior en relación a fdp vida de diseño para estos pavimentos.

Tabla 7-20 Análisis de confiabilidad para la condición de fdp vida de diseño original

Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL		VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		β_{HL} / Z_R	$COV_1 = \delta_o / \bar{v}$	P_F	P_{Exito}
	Tipo de Distribución	Parámetros	Tipo de Distribución	Parámetros				
CTANB	Normal Valor-P 0,00247765	media = 1,54525E7 desviación estándar = 5,48753E6	Lognormal Valor-P 0,00161479	media = 5,87105E6 desviación estándar = 1,0803E7	-1,34	0,40	0,91	0,09
CTANM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 1,35815E7 desviación estándar = 1,93114E6	Lognormal Valor-P 0,0000133656	media = 1,6369E8 desviación estándar = 2,20153E8	1,93	0,24	0,03	0,97
STANM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 2,39019E7 desviación estándar = 7,32926E6	Lognormal Valor-P 0,0134679	media = 2,71801E7 desviación estándar = 4,94001E7	-0,48	0,16	0,69	0,31
CTANA	Normal Valor-P 0,716972	media = 4,96958E7 desviación estándar = 2,68226E6	Lognormal Valor-P 0,499862	media = 1,21839E9 desviación estándar = 7,19816E8	5,55	0,19	0,00	1,00
STANA	Normal Valor-P 0,000820063	media = 3,1886E7 desviación estándar = 8,14732E6	Lognormal Valor-P 0,0877472	media = 1,85162E9 desviación estándar = 9,05479E9	1,36	0,66	0,09	0,91
CTMNB	Normal Valor-P 0,0000248787	media = 9,79766E6 desviación estándar = 5,17491E6	Lognormal Valor-P 0,00261009	media = 1,19743E8 desviación estándar = 2,40309E9	-0,20	0,32	0,58	0,42
STMNM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 1,22622E7 desviación estándar = 1,92545E6	Lognormal Valor-P 0,000000848425	media = 1,72344E8 desviación estándar = 3,06401E8	1,60	0,12	0,05	0,95

- c) Los pavimentos localizados en el centro del país, con tránsito alto y número estructural medio, presentan confiabilidad suficientes para garantizar que cuando sean puestos en servicio alcancen la vida útil estimada por el diseño.
- d) Los pavimentos localizados al sur del país, presentan confiabilidades suficientes para garantizar que cuando sean puestos en servicio alcancen la vida útil estimado por el

diseño, con excepción del pavimentos STANM, que presenta una confiabilidad deficiente.

- e) La mayoría de pavimentos que fueron diseñados usando el método de diseño AASHTO-93, cuantan con probabilidades de éxito satisfactorias para alcanzan la vida útil.
- f) Independiente de la localización del pavimento, solo los tránsitos altos y medios, generaron el suficiente deterioro sobre las estructuras, para alcanzar la serviciabilidad final y ser considerados dentro del análisis de confiabilidad.
- g) Tomando en cuenta que las estructuras con tránsito bajo no produjeron el suficiente deterioro para ser contempladas dentro del análisis de confiabilidad, a pesar de haberse simulado tránsitos por un periodo superior a 25 años, poede considerarse entonces de que las estructuras estan sobredimensionadas.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- Se determinaron los valores Z_R y S_o , a través de la relación entre el método de diseño estructural de pavimento flexibles AASHTO-93 y los modelos de deterioro de los programas de seguimiento de pavimento.
- Se desarrolló un modelo conceptual que relacionó el método de diseño AASHTO-93 y los modelos de deterioro de HDM-4; ahuellamiento, fisuración y rugosidad.
- Se desarrollo una herramienta teórica que permitió calcular sobre la base del modelo conceptual desarrollado, los valores de Z_R y S_o utilizando métodos estadísticos.
- Se caracterizaron, mediante funciones de densidad de probabilidad, la vida de diseño estimada a través del método AASHTO-93 y la vida útil a través de los modelos de deterioro.
- Se desarrolló en forma probabilista el modelo de agrietamiento de pavimentos flexibles, utilizando datos de campo. La aplicación entrega funciones de densidad que predicen el agrietamiento, dependiendo de la severidad del deterioro para redes 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.

- Es posible establecer modelos probabilistas de comportamiento para ahuellamiento, rugosidad y serviciabilidad; con el fin de desarrollar análisis similares a los realizados para el deterioro por agrietamiento.
- Se desarrolló un modelo probabilista del método de diseño AASHTO-93, usando datos de campo, que entrega funciones de densidad que predicen la duración del ciclo de vida de pavimentos para carreteras clasificadas según su localización geográfica, tipo de tránsito y capacidad estructural.
- En base al análisis del modelo probabilístico del método de diseño AASHTO-93, puede concluirse que en la mayoría de los casos la estimación hecha por el método de diseño sobre estima las cargas evaluada en ejes equivalentes.

8.2. Recomendaciones

- Se recomienda evaluar el desempeño de una estructura de pavimento a través de los modelos de comportamiento calibrados a partir de datos tomados de campo, de este modo se puede obtener la varianza del desempeño del pavimento, que involucra no solo la variabilidad del proceso constructivo sino también la relacionada con el tránsito, el clima, calidad y desempeño de los materiales utilizados para la construcción cuando el pavimento es puesto en servicio.
- La variabilidad en el desarrollo del proceso constructivo de obras viales no ha sido analizada. Esta impacta en forma importante la evaluación del desempeño de un pavimento cuando se utilizan modelos de comportamiento. Se recomienda desarrollar investigaciones que puedan cuantificar esta variabilidad de tal manera que la estimación de vida útil pueda establecerse con menor incertidumbre. Se requiere calibrar los modelos de comportamiento a nivel regional, para desarrollar análisis con mayor especificidad. Además avanzar al nivel 3 de calibración.

- Se requiere continuar el desarrollo de campañas de recolección de información y seguimiento de caminos, que permitan ampliar la base de datos utilizada para calibrar la metodología propuesta.
- Se requiere calibrar los modelos de comportamiento a nivel regional, para desarrollar análisis con mayor especificidad. Además avanzar al nivel 3 de calibración del modelo HDM-4.
- Se requiere desarrollar normatividad que permita implementar análisis de riesgo en los métodos de diseño estructural.
- Se recomienda utilizar la presente metodología, basada en el análisis de riesgo para el diseño estructural de pavimentos en otras latitudes, pero utilizando modelos de comportamiento calibrados para la condición local.

BIBLIOGRAFÍA

American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO. (1962). *The AASHO Road Test; American Association of State Highway Officials Report 5 Pavement Research*. Highway Research Board.

American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO. (1986). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C., Estados Unidos.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C., Estados Unidos.

American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO (Ed.) (1998). *Guide for design of pavement structures*. (4a. ed. Vol. 2). Washington, Estados Unidos: [s.n].

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008). *Mechanistic-empirical pavement design guide – interim edition. A manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Highway Research Board. Washington, D.C., Estados Unidos.

Abaza, K. & Abu-Eisheh, S. (2003). An Optimum Design Approach for Flexible Pavement. *The International Journal of Pavement Engineering*, 4 (1), 1-11.

Aguiar-Moya, J., Prozzi, J. & de Fortier Smit, A. (2011). Mechanistic-Empirical IRI Model Accounting for Potential Bias. *Journal Transportation Engineering*, 137 (5), 297-304.

Ali, O. (2005). *Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A)*. Research Report 216, National Research Council Canada.

Al-Omari, B. & Darter, M. I. (1994). Relationships between international roughness index and present serviceability rating. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1435(1), 130 - 36.

Arliansyash, J., Maruyama, T. & Takahashi, O. (2004). A Pavement Deterioration Model Using Radial Basis Function Neural Networks. *Journal of Materials, Concrete, Structures and Pavement*, 62 (753), 165-177.

Armijo, R. & Correa, C. (1989). *Second Road Sector Project 1990-1993*. Informe para el Banco Mundial. Ministerio de Obras Públicas MOP. Dirección Nacional de Vialidad. Santiago, Chile.

Asphalt Institute A. I. (Ed.) (1999). *Thickness Design – Asphalt Pavements for Highway and Stress*. (9a. ed.). Lexington, KY, Estados Unidos.: [s.n].

Austrroads. (2004). *Pavement design*. Sydney, Australia.

Austrroads (Ed.) (2010). *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*. Sydney, Australia: [s.n].

Bailey R., Patrick J. & Jackett R. (2006). Relationship between design and predicted performance of New Zealand pavements. *Land Transport New Zealand Research Report*, 259, 33 pp.

Banco Mundial B.M. (2014). HMIII (Versión 3.0) [Software] Recuperado de Banco Mundial: <http://www.worldbank.org/transport/roads/tools.htm>.

Barros, M., Paula, G. A. & Leiva, V. (2009). An R implementation for generalized Birnbaum-Saunders distributions. *Computational Statistics and Data Analysis*, 53 (5), 1511-1528.

Brown, J. L. (1994). Reliability in Pavement Design? Who's Kidding Whom?. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1449, 26-29.

Carrey, W.N. & Irick, P.E. (1960). *The Pavement Serviceability Performance Concept*. National Research Council. Bulletin 250, HRB.

Carvalho, R. & Schwartz, C. (2006). Comparisons of Flexible Pavement Design AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1947, 167-174.

Chen, X. & Lind, N.C. (1983). Fast Probability Integration by Thee-Parameter Normal Tail Approximation. *Structural Safety*, 1, 269-276.

Choun, J. S. & Le, T. S. (2011). Reliability-based performance simulation for optimized pavement maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 1402-1410.

Cornell, C. A. (1969). A probability-based structural code. *Journal of the American Concrete Institute*, 66 (12), 974-985.

Corté, J. F., & Goux, M. T. (1996). Design of pavement structures: the French technical guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1539(1), 116-124.

De Solminihaç, H. (2001). *Gestión de la Infraestructura vial*. Santiago, Chile: Ediciones Pontificia Universidad Católica de Chile.

De Solminihaç, H., Hidalgo P. y Salgado M. (2003). Calibration of Performance Models for Surface Treatment to Chilean Conditions: the HDM-4 Case. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1819 (2), 285-293.

Delgadillo, R., Wahr, C. & Alarcón, J. P. (2011). Toward Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide in Latin America - Preliminary Work in Chile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2226, 142–148.

Echeverría, G. & Videla, C. (1991). *Evaluación de la Capacidad Estructural Efectiva de un Pavimento a partir de medidas de Deflexión*. VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Tomo II, Trabajo T3-19, Santiago, Chile, 1991.

Federal Highway Administration (FHWA). (1994). *AASHTO Design Procedures for New Pavements: Participant's Manual*. Washington, Estados Unidos: U.S. Department of Transportation.

Federal Highway Administration (FHWA). (2006). *Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual*. Publication No. FHWA NHI-05-037. U.S. Department of Transportation.

FICEM. (1996). *Evaluación técnica y económica de pavimentos basada en HDM*. Grupo de estudio latinoamericano. Federación Interamericana del Cemento.

French Design Manual for Pavement Structures. (1997). *Guide technique*. LCPC and SETRA. Union des Syndicates de L'industrie Routiere.

Gao, L., Aguiar-Moya, J. P. & Zhang, Z. (2012). Bayesian Analysis of Heterogeneity in Modeling of Pavement Fatigue Cracking. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26 (1), 37- 43.

Haider, S. W., Harichandran, R. S. & Dwaikat, M. B. (2012). Effect of Axle Load Measurement Errors on Pavement Performance and Design Reliability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2160, 107 – 117.

Haldar, A., Mahadevan, S. (2000). *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*. New York: John Willey & Sons, Inc.

Hall, K.T. & Correa Muñoz, C.E. (1999). Estimation of Pavement Serviceability Index from International Roughness Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1655, 93-99

Hasofer, A.M. & Lind, N.C. (1974). Exact and invariant second moment code format, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 100(EM1), 111-121.

Hodges, J. W., Rolt, J. & Jones, T.E. (1975). *The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Road Deterioration, TRRL Laboratory Report 673*. Crowthorne, England: Transport Research Laboratory.

Hohenbichler, M., Gollwitzer, S., Kruse, W., & Rackwitz, R. (1987). New light on first- and second-order reliability methods. *Structural Safety*, 4(4), 267-284.

Hong, F. & Prozzi, J. (2006). Estimation of Pavement Performance Deterioration Using Bayesian Approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 12 (2), 77 - 86.

Hong, H. P. & 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, Estados Unidos: Prentice Hall.

Indian Roads Congress (IRC). (2001). *Guidelines for the Design of Flexible Pavement*. IRC: 37-2001. Second Edition.

Irick, P., Hudson, W.R. & McCullough, B. F. (1987). Application of reliability concepts to pavement design. *Proceedings, 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, I*, 163-179.

Jain, S., Aggarwal, S. & Parida, M. (2005). HDM-4 Pavement Deterioration Models for Indian National Highway Network. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (8), 623-631.

Keralli, H. (2000). *Highway Development and Management, Overview of HDM-4*. Association Mondiale de la Route and World Road Association.

Kulkarni, R.B. (1994). Rational approach in applying reliability theory to pavement structural design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1449, 13 – 17.

Luo, Z. & Chou, E. Y. J. (2006). Pavement Condition Prediction Using Clusterwise Regression. *Journal of Transportation Research Record*, 1974(1), 70 -77.

Maji, A., & Das, A. (2008). Reliability considerations of bituminous pavement design by mechanistic–empirical approach. *International Journal of Pavement Engineering*, 9 (1), 19-31.

Marshall, A. & Olkin, I. (2007). *Life Distributions: Structure of Nonparametric, Semiparametric, and Parametric Families*. New York, Springer.

McInvale, H. D., Retherford, J. Q. & McDonald, M. P. (2012). Load and Resistance Factors and Design Parameter Offsets for Mechanistic–Empirical Pavement Design

Guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2305, 162-169.

Ministerio de Obras Públicas de Chile (1994). *Análisis de información de las plazas fijas de pesaje para estratigrafías anuales de buses y camiones*. Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2001). Seguimiento para la Calibración de Modelos de Deterioro de Pavimentos Asfálticos. Pontificia Universidad Católica de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2010) *Estudio Básico Seguimiento de Pavimentos Asfálticos*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 152 - 165.

Ministerio de Obras Públicas (2014). *Manual de Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Chile.

Montgomery, D.C. & Runger, G. C. (2002). *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*. Limusa Willey, Madrid.

Morosiuk, G., (1996, 1998, 1999). *Specifications for the HDM-4 Road Deterioration Model – Fourth, Fifth, Sixth, Seventh and Eighth Drafts*. ISOHDM, Reino Unido.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) & ARA, Inc. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design: Of New and Rehabilitated Pavement Structures: Final Report*. Washington, D.C.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2006). *Independent review of the mechanistic –empirical pavement design guide and software*. Research Result Digest 307. Washington, D.C.

NDLI. (1995). *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4. Final Report Asian Development Bank Project RETA 5549*. N. D. Lea International, Vancouver.

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

Patrick, J. & Bailey, R. (2003). Use of Pavement Deterioration Models in Pavement Design. *Proceedings - Conference of the Australian Road Research Board, Proceedings - 21st ARRB and 11th REAAA Conference v 21*, 1581-1595.

Pendleton, O. J. (1994). Reliability in Pavement Design: Issues, Concepts, and Significance. *Transportation Research Record*, 1449, 8 – 12.

Portland Cement Association PCA (Ed.) (1984). *Thickness Design for Concrete Pavements*. Chicago, EE.UU.: [s.n].

Prozzi, J. A. (2001). *Modeling pavement performance by combining field and experimental data*. (Tesis doctoral inédita). Universidad de California, Berkeley, EE.UU.

Quiroz, C. A. V. *Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil*. PhD thesis, University of Texas at Austin, Austin, 1981.

Rackwitz, R. & Fiessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computers and Structures*, 9 (5), 484 – 494.

Rajbongshi, P. & Das, A. (2008). Optimal Asphalt Pavement Design Considering Cost and Reliability. *Journal of Transportation Engineering*, 134 (6), 255 – 261.

Retherford, J. Q. & McDonald, M. (2010). Reliability Methods Applicable to Mechanistic–Empirical Pavement Design Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2154, 130 – 137.

Riddell, R. & Hidalgo, P. (2002). *Diseño Estructural*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.

Riley, M. J. & Bennett, C. R. (1995 y 1996). *Specifications for the HDM-4 Road Deterioration Model – Preliminary, Second and Third Drafts*, ISOHDM, UK.

Rosenblatt, M. (1952). Remarks on a Multivariate Transformation. *Annals of Mathematical Statistics*, 23 (3), 470 – 472.

Rosenblatt, M. (1957). Remarks on a Multivariate Transformation. *Annals of Mathematical Statistics*, 1 (3), 470 -472.

Saldaña Marulanda, D. (2013). *Estudio comparativo de la sensibilidad de la metodología de diseño estructural de pavimentos flexibles: método AASHTO 93 y ME-PDG V 1.1*. (Tesis de maestría inédita). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Sánchez-Silva, M., Arroyo, O., Junca, M., Caro, S. & Caicedo, B. (2005). Reliability based design optimization of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 6 (4), 281 - 294.

Sayers, M. (1985). Development, implementation, and application of the reference quarter-car simulation. *ASTM Special Technical Publication*, 25-47.

Shahin, M. (1994). *Pavement management for airports, roads, and parking lots*. New York, Estados Unidos: Chapman & Hall.

Shararf, E. A., Arafah, A. M., Noureldin, A. S. & Al-Sugair, F. H. (1995). Estimation of the Standard Deviation of Traffic in Saudi Arabia Using the AASHTO Model. *Fourth Saudi Engineering Conference*, 531-539, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia.

Shekharan, A. (2000). Solution of pavement deterioration equations by genetic algorithms. *Journal of Transportation Research Board*, 1699, 101-106.

SHELL International Petroleum Company Ltda. (Ed.) (1978). SHELL Pavement Design Manual: Asphalt Pavement and Overlays for Road Traffic. Londres, Reino Unido.: [s.n].

Solorio, R., Hernández, R. & Gómez, A. (2004). *Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 253.

Sun, L., & Deng, X. (1998). Predicting vertical dynamic loads caused by vehicle-pavement interaction. *Journal of Transportation Engineering*, 124 (5), 470-478.

Tarefder, R. A., Saha, N. & Stormont, J. C. (2010). Evaluation of Subgrade Strength and Pavement Designs for Reliability. *Journal of Transportation Engineering*, 136, 379–391.

Thenoux, G., Carrillo, H. & Halles, F. (2003). Filosofía y conceptos para la gestión de mantenimiento de pavimentos asfálticos. *Boletín Técnico No 6 Instituto Chileno del Asfalto*.

Thenoux, G., de Solminihac, H., Halles, F., Chamorro, A., Hidalgo, P., Encina, C. & Márquez, W. (2006). *Análisis de Sensibilidad de Parámetros del Modelo HDM-4 y Actualización de Metodología para la Determinación del Estado de Caminos*

Pavimentados. Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Theyse, H., de Beer, M. & Rust, F. (1996). Overlays of the South African mechanistic pavement design analysis method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1539 (1), 6–17.

Thyagarajan, S., Muhunthan, B., Sivanewaran, N. & Petros, K. (2011). Efficient Simulation Techniques for Reliability Analysis of Flexible Pavements Using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *Journal of Transportation Engineering*, 137, 796 – 804.

Tighe, S., Huen, K. & Haas, R. (2007). Environmental and Traffic Deterioration with Mechanistic Empirical Pavement Design Model. *Journal of Transportation Research Board*, 1989 (2), 336-343.

Tu, J., Choi, K. K., & Park, Y. H. (1999). A new study on reliability-based design optimization. *Journal of Mechanical Design*, 121 (4), 557-564.

Videla, C., de Solminihac, H., Gaete, R. & Bustos, M. (1995). Metodología Estadística de Selección de Tramos Muestrales para Calibrar Modelos de Deterioro de Pavimentos Asfálticos. *VII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 129 – 143. Santiago, Chile.

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

Videla, C., Echeverría, H., Gaete, R. & Caroca, A. (1992). *Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos. Vol. 4: Sistema de Gestión*

de Pavimentos GIMP. Ministerio de Obras Públicas, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Wardle, L. J. & McNabb, K. (2014). CICLY (Versión 5.0) [Software] Recuperado de Mincad Systems: <http://www.mincad.com.au/>

Watanatada, T., Harral, C. G., Paterson, W. D. O., Dhareshwar, A. M., Bhandari, A. & Tsunokawa, K. (1987). *The Highway Design and Maintenance Standards Model Volume 1: Description of the HDM-III Model*. World Bank Publications, Washington, D.C.

Williams, T. (2002). *Modelling Complex Projects*. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Inc.

Yang, J., Gunaratne, M., Lu, J. & Dietrich, B. (2005). Use of Recurrent Markov Chains for Modeling the Crack Performance of Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (11), 861 - 872.

Zhang, Z. & Damnjanović, I. (2006). Applying Method of Moments to Model Reliability of Pavements Infrastructure. *Journal of Transportation Engineering*, 132 (5), 416 – 424.

Zhou, G. & Wang, L. (2008). Analysis of Flexible Pavement Distresses on IRI Model. *Pavements and Materials*, 150-160.

ANEXOS

Anexo 1. Listado de caminos seleccionados

CÓDIGO		REGIÓN	LOCALIZACIÓN		CARACTERÍSTICAS	
investigación	MOP	Nombre	K _I	K _F	Año construcción	Calificación por edad
CTANB	73A066	Metropolitana	93,56	100,35	1998	Inicial
	73C150	Metropolitana	0,00	13,90	1998	Inicial
	73C150	Metropolitana	0,00	13,90	1998	Terminal
NTANM	64B043	Coquimbo	7,00	27,90	1988	Terminal
	62B001	Antofagasta	11,05	21,86	1987	Terminal
	62C021	Antofagasta	14,00	35,00	1996	Terminal
	63B035	Atacama	56,66	70,00	1999	Media
CTANM	65A066	Valparaíso	118,38	124,50	1996	Inicial
			124,50	126,00		
	73B060	Metropolitana	4,05	7,17	1991	Media
			7,17	9,20		
			9,20	10,25		
			10,25	14,44		
	73B060	Metropolitana	4,05	7,17	1991	Terminal
			7,17	9,20	1991	
STANM	68B060	Bio-Bio	7,10	21,30	1995	Media
	68D965	Bio-Bio	0	13,7	1998	Inicial
	68C049	Bio-Bio	0,87	8,60	1992	Terminal
	68B020	Bio-Bio	0,00	6,45	1992	Terminal
	68C070	Bio-Bio	0,00	23,40	1994	Terminal
	70B055	Los Lagos	15,20	15,67	1999	Media
			15,67	21,64	1999	

CÓDIGO		REGIÓN	LOCALIZACIÓN		CARACTERÍSTICAS	
investigación	MOP	Nombre	K _I	K _F	Año construcción	Calificación por edad
NTANA	61A005	Tarapacá	1768,2	1808,8	1989	Media
	62A005	Antofagasta	1234,8	1262,17	1988	Terminal
	62A005	Antofagasta	1262,17	1268,8	1988	Terminal
	62A005	Antofagasta	1268,8	1282	1989	Media
CTANA	73A066	Metropolitana	100,35	103,84	1998	Terminal
	65B085	Valparaíso	4,70	6,70	2002	Media
			6,70	7,80	2002	
			7,80	8,30	2002	
	67A115	Maule	2,50	18,70	1996	Terminal
			2,50	18,70	1996	
	67A126	Maule	17,34	21,00	2002	Media
			21,00	22,00		
			22,00	23,20		
			23,20	25,84		
			25,84	26,66		
			26,66	27,92		
	73B074	Metropolitana	0,00	7,09	2001	Media
STANA	68C049	Bio-Bio	0,5	9,74	1992	Media
	68B060	Bio-Bio	7,10	21,30	1995	Terminal
	69B180	Araucanía	44,55	53,70	1998	Terminal
	74D712	Los Ríos	0,20	3,60	2003	Media
			3,60	4,60		
CTMNB	73A071	Metropolitana	0	2,8	1993	Media
			2,8	6,5		
	73C535	Metropolitana	3,86	9,8	1997	Inicial
	73D148	Metropolitana	0	1,8	2000	Inicial

CÓDIGO		REGIÓN	LOCALIZACIÓN		CARACTERÍSTICAS	
investigación	MOP	Nombre	K _I	K _F	Año construcción	Calificación por edad
			1,8	5,97		
	65C050	Valparaíso	0,00	12,76	1994	Terminal
	65C050	Valparaíso	13,95	30,65	1994	Terminal
	73A071	Metropolitana	0,00	2,80	1993	Terminal
			2,80	6,50	1993	
	67D031	Maule	0,00	10,36	2001	Media
NTMNM	61A005	Tarapacá	1655	1665	1991	Inicial
	64A047	Coquimbo	0,00	6,60	1997	Terminal
			6,60	21,70		
	61A005	Tarapacá	1675,00	1676,00	1981	Inicial
			1676,00	1677,00		
			1677,00	1678,00		
			1678,00	1679,00		
			1679,00	1680,00		
			1680,00	1681,00		
			1681,00	1682,00		
			1682,00	1683,00		
			1683,00	1684,00		
			1684,00	1685,00		
	62A005	Antofagasta	1585,60	1635,00	1989	Terminal
	64A041	Coquimbo	38,30	43,10	1997	Media
STMNM	68C031	Bio-Bio	23,29	25,98	1998	Inicial
	68C780	Bio-Bio	6,62	16,73	1998	Inicial
	69B181	Araucanía			1998	Inicial

CÓDIGO		REGIÓN	LOCALIZACIÓN		CARACTERÍSTICAS	
investigación	MOP	Nombre	K _I	K _F	Año construcción	Calificación por edad
	69C060	Araucanía	12,2	16,22	1998	Inicial
			16,22	26,18		
	68C031	Bio-Bio	21,59	23,29	1998	Terminal
			23,29	25,93		
	69B181	Araucanía	20,50	21,90	1998	Terminal
			21,90	25,70	1998	
			25,70	29,80	1998	
			25,70	29,80	1998	
	69B181	Araucanía	52,30	55,90	1998	Terminal
			52,30	55,90	1998,00	
	69B181					Terminal
	69C060	Araucanía	12,20	16,22	1998	Terminal
			16,22	26,18	1998	
	68C022	Bio-Bio	6,54	10,60	1997	Terminal
	68C031	Bio-Bio	18,00	19,46	1998	Terminal
	69C060	Araucanía	16,22	26,18	1998	Terminal
NTMNA	62A005	Antofagasta	1234,8	1262,17	1988	Media
	62A006	Antofagasta	1262,17	1268,8	1988	Media
	62A005	Antofagasta	1268,8	1282	1989	Media
	62A005	Antofagasta	1282	1302	1989	Media
	64B085	Coquimbo	0	6,6	1997	Inicial
			6,6	21,7		
	62A005	Antofagasta	1461,80	1472,02	2000	Media
STMNA	68C022	Bio-Bio	0,00	6,54	1995	Terminal
	68C055	Bio-Bio	13,45	17,15	2000	Media
CTBNM	66D451	Libertador General Bernardo O'Higgins	0	6,4	1998	Inicial

CÓDIGO		REGIÓN	LOCALIZACIÓN		CARACTERÍSTICAS	
investigación	MOP	Nombre	K _I	K _F	Año construcción	Calificación por edad
	67C850	Maule	0	9,63	1998	Inicial
	66D451	Libertador General Bernardo O'Higgins	0,00	6,40	1998	Terminal
	67C011	Maule	21,80	27,30	1980	Terminal
			27,30	28,90		
			28,90	29,45		
	67D049	Maule	0,00	13,87	2002	Media
	67D055	Maule	0,00	12,41	2008	Inicial
STBNM	70D016	Los Lagos	0	5,5	1996	Inicial
	70D016	Los Lagos	0,00	5,52	1996	Terminal

Anexo 2. Cálculo del tránsito

Código Investigación	Código MOP	TMDA	Autos		Camionetas		Bus		C2E		C+2E		Bus		C2E		C+2E		EEq Diarios Buses	EEq Diarios C2E	EEq Diarios C+2E	TRAo (EEq día)	EE anuales (millones /pista)
			%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Año 0	%	Año 0	%	Año 0					
CTANB	73A066	3966	26	1045,0	24	937,6	2	88,4	11	430,3	37	1463,5	7	100,3	3	452,1	3	1644,3	198,6	908,7	5837,4	6944,7	2,535
	73C150	1942	34	651,5	30	587,5	15	295,8	16	307,2	5	99,4	7	335,5	3	322,8	3	111,7	664,2	648,8	396,6	1709,6	0,624
	73C150	3265	41	1338,7	23	751,0	13	424,5	16	522,4	7	228,6	7	256,5	3	428,8	3	143,4	507,8	861,8	509,1	1878,7	0,686
NTANM	64B043	2801	40	1107,2	32	908,1	9	244,5	14	379,5	6	160,5	7	147,8	3	311,5	3	100,7	292,5	626,1	357,5	1276,1	0,466
	62B001	5217	47	2452,0	27	1408,6	10	521,7	6	313,0	10	521,7	7	157,7	3	195,8	3	172,4	312,2	393,6	612,1	1317,9	0,481
		3096	33	1021,7	30	928,8	13	402,5	8	247,7	18	557,3	7	121,6	3	154,9	3	184,2	240,9	311,4	653,9	1206,1	0,440
	62C021	4418	26	1148,7	43	1899,7	15	662,7	7	309,3	8	353,4	7	400,4	3	253,8	3	221,8	792,8	510,2	787,2	2090,2	0,763
	63B035	2911	26	756,9	30	873,3	18	524,0	9	262,0	17	494,9	7	337,2	3	220,4	3	329,1	667,6	443,0	1168,4	2279,0	0,832
CTANM	65A066	1495	39	577,4	24	364,8	2	28,6	11	170,9	24	353,4	7	32,4	3	179,5	3	397,1	64,1	360,9	1409,7	1834,7	0,670
	73B060	2967	36	1082,7	34	996,6	6	167,0	11	338,2	13	381,6	7	121,9	3	299,0	3	285,1	241,4	600,9	1012,2	1854,5	0,677
	73B060	4592	42	1928,6	29	1331,7	6	275,5	13	597,0	10	459,2	7	107,1	3	412,2	3	191,6	212,1	828,5	680,2	1720,8	0,628
		4592	42	1928,6	29	1331,7	6	275,5	13	597,0	10	459,2	7	107,1	3	412,2	3	191,6	212,1	828,5	680,2	1720,8	0,628
STANM	68B060	2224	28	614,0	28	614,5	3	60,5	14	315,8	28	618,3	7	56,8	3	308,1	3	583,3	112,5	619,3	2070,6	2802,4	1,023
	68D965	676	18	122,9	26	173,2	10	64,3	14	93,2	33	222,1	7	72,9	3	97,9	3	249,6	144,4	196,9	886,0	1227,3	0,448

Código Investigación	Código MOP	TMDA	Autos		Camionetas		Bus		C2E		C+2E		Bus		C2E		C+2E		EEq Diarios Buses	EEq Diarios C2E	EEq Diarios C+2E	TRAo (EEq día)	EE anuales (millones /pista)
			%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Año 0	%	Año 0	%	Año 0					
STANA	68C049	3854	41	1578,2	38	1454,9	6	228,5	9	334,5	7	256,3	7	177,7	3	303,1	3	203,0	351,7	609,2	720,7	1681,6	0,614
	68B060	2213	27	597,5	22	486,9	12	265,6	9	199,2	30	663,9	7	150,7	3	159,5	3	393,0	298,3	320,6	1395,0	2013,9	0,735
	69B180	4223	34	1435,8	25	1055,8	7	295,6	9	380,1	25	1055,8	7	178,6	3	311,9	3	662,4	353,7	627,0	2351,5	3332,1	1,216
	74D712	625	16	100,0	22	137,5	1	6,3	18	112,5	44	275,0	7	7,5	3	121,2	3	327,5	14,9	243,5	1162,7	1421,2	0,519
CTMNB	73A071	1000	32	320,0	41	410,0	7	70,0	15	150,0	5	50,0	7	57,9	3	139,3	3	42,0	114,7	280,0	149,0	543,7	0,198
	73C535	1260	43	538,4	35	438,4	7	82,9	11	134,9	5	64,8	7	88,3	3	138,3	3	68,6	174,8	278,0	243,7	696,6	0,254
	73D148	788	42	330,5	31	246,5	8	63,6	15	114,9	4	32,2	7	81,8	3	126,8	3	40,6	162,0	254,9	144,1	561,0	0,205
	65C050	2405	44	1058,2	21	505,1	7	168,4	14	336,7	14	336,7	7	79,1	3	250,4	3	167,3	156,6	503,2	594,0	1253,8	0,458
	65C050	2405	44	1058,2	21	505,1	7	168,4	14	336,7	14	336,7	7	79,1	3	250,4	3	167,3	156,6	503,2	594,0	1253,8	0,458
	73A071	1000	32	320,0	41	410,0	7	70,0	15	150,0	5	50,0	7	30,9	3	108,8	3	23,4	61,1	218,7	83,2	363,1	0,133
		1000	32	320,0	41	410,0	7	70,0	15	150,0	5	50,0	7	30,9	3	108,8	3	23,4	61,1	218,7	83,2	363,1	0,133
	67D031	1762	43	757,7	38	669,6	6	105,7	9	158,6	4	70,5	7	77,2	3	140,2	3	52,7	152,8	281,7	187,0	621,5	0,227
NTMNM	61A005	624	13	81,4	15	91,0	11	67,0	7	44,7	54	339,8	7	48,9	3	39,5	3	253,9	96,9	79,4	901,3	1077,5	0,393
	64A047	1090	41	446,9	30	327,0	9	98,1	11	119,9	9	98,1	7	63,1	3	100,9	3	65,2	125,0	202,7	231,6	559,3	0,204
	61A005	340	14	47,6	23	78,2	7	23,8	8	27,2	48	163,2	7	23,8	3	27,2	3	163,2	47,1	54,7	579,4	681,2	0,249
	62A005	624	18	112,3	20	124,8	12	74,9	6	37,4	44	274,6	7	25,7	3	24,6	3	102,0	50,8	49,5	362,0	462,2	0,169
	64A041	3310	62	2052,2	24	794,4	4	132,4	8	264,8	1	33,1	7	102,9	3	239,9	3	26,2	203,8	482,2	93,1	779,0	0,284

Código Investigación	Código MOP	TMDA	Autos		Camionetas		Bus		C2E		C+2E		Bus		C2E		C+2E		EEq Diarios Buses	EEq Diarios C2E	EEq Diarios C+2E	TRAo (EEq día)	EE anuales (millones /pista)
			%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Año 0	%	Año 0	%	Año 0					
STMNM	68C031	707	34	242,1	40	283,8	7	46,0	10	70,3	9	64,5	7	52,1	3	73,9	3	72,5	103,2	148,6	257,5	509,2	0,186
	68C780	474	26	125,3	31	147,7	19	92,0	16	74,3	7	34,6	7	104,3	3	78,1	3	38,9	206,5	157,0	138,0	501,5	0,183
	69B181	766	29	223,0	32	247,6	6	48,6	14	110,3	18	136,3	7	55,2	3	115,9	3	153,1	109,2	232,9	543,6	885,7	0,323
	69C060	616	25	153,7	38	233,4	6	39,0	20	124,7	11	64,9	7	44,2	3	131,0	3	73,0	87,6	263,3	259,0	609,8	0,223
	68C031	1436	51	732,4	31	445,2	4	57,4	6	86,2	8	114,9	7	34,7	3	70,7	3	72,1	68,7	142,1	255,9	466,7	0,170
	69B181	706	45	317,7	31	218,9	7	49,4	6	42,4	11	77,7	7	29,9	3	34,8	3	48,7	59,1	69,9	173,0	302,0	0,110
		706	45	317,7	31	218,9	7	49,4	6	42,4	11	77,7	7	29,9	3	34,8	3	48,7	59,1	69,9	173,0	302,0	0,110
		706	45	317,7	31	218,9	7	49,4	6	42,4	11	77,7	7	29,9	3	34,8	3	48,7	59,1	69,9	173,0	302,0	0,110
		605	46	278,3	29	175,5	7	42,4	7	42,4	11	66,6	7	25,6	3	34,8	3	41,8	50,7	69,9	148,2	268,8	0,098
	69B181	550	45	247,5	29	159,5	7	38,5	10	55,0	9	49,5	7	23,3	3	45,1	3	31,1	46,1	90,7	110,3	247,0	0,090
		1168	39	455,5	32	373,8	3	35,0	9	105,1	17	198,6	7	21,2	3	86,3	3	124,6	41,9	173,4	442,3	657,6	0,240
	69C060	1393	40	557,2	36	501,5	6	83,6	11	153,2	6	83,6	7	50,5	3	125,8	3	52,4	100,0	252,8	186,2	538,9	0,197
		1393	40	557,2	36	501,5	6	83,6	11	153,2	6	83,6	7	50,5	3	125,8	3	52,4	100,0	252,8	186,2	538,9	0,197
	68C022	765	28	214,2	35	267,8	10	76,5	11	84,2	16	122,4	7	43,4	3	67,4	3	72,4	85,9	135,4	257,2	478,6	0,175
	68C031	1436	51	732,4	31	445,2	4	57,4	6	86,2	8	114,9	7	34,7	3	70,7	3	72,1	68,7	142,1	255,9	466,7	0,170
	69C060	1393	40	557,2	36	501,5	6	83,6	11	153,2	6	83,6	7	50,5	3	125,8	3	52,4	100,0	252,8	186,2	538,9	0,197
NTMNA	62A005	1072	27	285,2	14	146,9	13	141,6	5	53,9	41	444,0	7	85,6	3	44,3	3	278,6	169,4	89,0	989,0	1247,4	0,455

Código Investigación	Código MOP	TMDA	Autos		Camionetas		Bus		C2E		C+2E		Bus		C2E		C+2E		EEq Diarios Buses	EEq Diarios C2E	EEq Diarios C+2E	TRAo (EEq día)	EE anuales (millones /pista)
			%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Autos Total	%	Año 0	%	Año 0	%	Año 0					
	62A006	1072	27	285,2	14	146,9	13	141,6	5	53,9	41	444,0	7	85,6	3	44,3	3	278,6	169,4	89,0	989,0	1247,4	0,455
	62A005	1072	27	285,2	14	146,9	13	141,6	5	53,9	41	444,0	7	91,1	3	45,4	3	295,3	180,4	91,2	1048,3	1319,9	0,482
	62A005	1072	27	285,2	14	146,9	13	141,6	5	53,9	41	444,0	7	91,1	3	45,4	3	295,3	180,4	91,2	1048,3	1319,9	0,482
	64B085	984	35	345,0	34	338,6	9	91,6	11	105,6	10	102,9	7	97,6	3	108,2	3	109,1	193,2	217,5	387,3	798,0	0,291
	62A005	734	20	146,8	26	190,8	9	66,1	6	44,0	38	278,9	7	45,3	3	38,0	3	196,6	89,6	76,3	698,0	864,0	0,315
STMNA	68C022	967	25	241,8	37	357,8	9	87,0	12	116,0	16	154,7	7	43,5	3	88,4	3	81,5	86,2	177,8	289,3	553,3	0,202
	68C055	2085	45	938,3	32	667,2	10	208,5	8	166,8	5	104,3	7	142,9	3	143,8	3	73,5	282,9	289,1	260,9	832,9	0,304
CTBNM	66D451	494	26	128,3	38	186,3	21	104,3	11	55,6	4	19,2	7	118,3	3	58,4	3	21,6	234,3	117,5	76,7	428,4	0,156
	67C850	667	38	255,2	44	296,5	4	23,9	9	59,3	5	31,8	7	27,2	3	62,3	3	35,7	53,8	125,2	126,9	305,9	0,112
	66D451	549	53	291,0	25	137,3	7	38,4	10	54,9	6	32,9	7	23,2	3	45,1	3	20,7	46,0	90,6	73,4	209,9	0,077
	67C011	1545	39	602,6	29	448,1	11	170,0	10	154,5	11	170,0	7	33,1	3	81,3	3	37,4	65,4	163,4	132,6	361,5	0,132
	67D049	519	32	166,1	43	223,2	11	57,1	10	51,9	3	15,6	7	44,4	3	47,0	3	12,3	87,9	94,5	43,8	226,2	0,083
	67D055	523	24	125,5	44	230,1	14	73,2	13	68,0	5	26,2	7	83,0	3	71,4	3	29,4	164,4	143,6	104,3	412,3	0,150
STBNM	70D016	247	24	59,1	41	102,5	6	15,3	17	43,1	11	27,0	7	15,3	3	43,1	3	27,0	30,4	86,5	95,8	212,7	0,078
	70D016	449	23	103,3	33	148,2	7	31,4	12	53,9	26	116,7	7	16,7	3	42,1	3	65,2	33,2	84,6	231,4	349,2	0,127

Anexo 3. Cálculo del número estructural

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
CTANB	73A066	93,56	100,35	1,97			1,97		2,76				5,91						20	1,70	1,10	1,00	3,41	5,11
	73C150	0,00	13,90	2,76							0,98		5,91			5,91			5	0,61	1,10	1,00	2,94	3,54
	73C150	0,00	13,90	2,76							0,98		5,91			5,91			5	0,61	1,10	1,00	2,94	3,54
NTANM	64B043	7,00	27,90	1,57				1,97					5,91			5,91			30	1,90	1,20	1,05	2,34	4,24
	62B001	11,05	21,86	2,36									7,09			7,87			20	1,70	1,20	1,05	3,11	4,81
	62C021	14,00	35,00	2,76									7,87			7,87			20	1,70	1,20	1,05	3,41	5,10
	63B035	56,66	70,00	1,97			2,36						5,91			5,91			15	1,52	1,20	1,05	3,48	5,00
CTANM	65A066	118,38	124,50	3,15					3,94				11,81			0,00			15	1,52	1,10	1,00	4,34	5,86
		124,50	126,00	3,15					3,94				8,66			0,00			15	1,52	1,10	1,00	3,89	5,41
	73B060	4,05	7,17	2,76									5,91			5,91			40	2,01	1,10	1,00	2,74	4,75
		7,17	9,20	2,76									5,91			5,91			40	2,01	1,10	1,00	2,74	4,75
		9,20	10,25	2,76									5,91			5,91			20	1,70	1,10	1,00	2,74	4,44
		10,25	14,44	1,57			1,57						5,91			5,91			20	1,70	1,10	1,00	2,88	4,57
	73B060	4,05	7,17	2,76									5,91			5,91			40	2,01	1,10	1,00	2,74	4,75
		7,17	9,20	2,76									5,91			5,91			40	2,01	1,10	1,00	2,74	4,75

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
STANM	68B060	7,10	21,30	2,76								4,33		5,91		5,91			8	1,05	1,00	0,80	3,95	5,00
	68D965	0	13,7	2,36									4,72			4,72			15	1,52	1,00	0,80	2,08	3,61
	68C049	0,87	8,60	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
	68B020	0,00	6,45	1,97			2,36						5,91			5,91			10	1,23	1,00	0,80	3,15	4,38
	68C070	0,00	23,40	2,36			2,76							4,72		4,72			10	1,23	1,00	0,80	3,21	4,44
	70B055	15,20	15,67	3,15									7,87						15	1,52	0,90	0,70	2,28	3,80
		15,67	21,64	3,15									7,87						15	1,52	0,90	0,70	2,28	3,80
NTANA	61A005	1768,2	1808,8	1,97									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	2,82	4,52
	62A005	1234,8	1262,2	2,76									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	3,16	4,86
	62A005	1262,2	1268,8	2,76									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	3,16	4,86
	62A005	1268,8	1282	2,36									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	2,99	4,69
CTANA	73A066	100,35	103,84	1,97			1,97		2,76				5,91						20	1,70	1,10	1,00	3,41	5,11
	65B085	4,70	6,70	1,97			1,97		1,97				5,91			4,72			40	2,01	1,10	1,00	3,71	5,73
		6,70	7,80	1,97			1,97		1,97				5,91			4,72			50	2,08	1,10	1,00	3,71	5,79
		7,80	8,30	1,97			1,97		1,97				5,91			4,72			37	1,98	1,10	1,00	3,71	5,70
	67A115	2,50	18,70	3,15		3,15							5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,98	5,50
		2,50	18,70	3,15		3,15							5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,98	5,50

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
	67A126	17,34	21,00	3,15									7,09			10,24			15	1,52	1,00	0,80	3,26	4,78
		21,00	22,00	3,15									7,09			10,24			15	1,52	1,00	0,80	3,26	4,78
		22,00	23,20	3,15									7,09			10,24			15	1,52	1,00	0,80	3,26	4,78
		23,20	25,84	3,15									7,09			10,24			15	1,52	1,00	0,80	3,26	4,78
		25,84	26,66	3,15									7,09			10,24			15	1,52	1,00	0,80	3,26	4,78
		26,66	27,92	3,15									7,09			10,24			15	1,52	1,00	0,80	3,26	4,78
	73B074	0,00	7,09	2,76					3,54				5,91			4,72			20	1,70	1,10	1,00	3,77	5,46
STANA	68C049	0,5	9,74	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
	68B060	7,10	21,30	2,76								4,33		5,91		5,91			8	1,05	1,00	0,80	3,95	5,00
	69B180	44,55	53,70	1,97		2,36						3,94	4,72			9,06			10	1,23	1,00	0,80	4,60	5,83
	74D712	0,20	3,60	1,97			2,36		2,36				5,91			4,72			115	2,19	1,00	0,90	3,87	6,07
		3,60	4,60	1,97			2,36		2,36				5,91			4,72			115	2,19	1,00	0,90	3,87	6,07
CTMNB	73A071	0	2,8	1,97			2,36		2,76					5,91					12	1,37	1,10	1,00	3,57	4,94
		2,8	6,5	1,97			2,36		2,76					7,87					12	1,37	1,10	1,00	3,85	5,22
	73C535	3,86	9,8	1,97							0,98		5,91			5,91			40	2,01	1,10	1,00	2,60	4,61
	73D148	0	1,8		2,36	0,00								5,91		5,91			30	1,90	1,10	1,00	2,57	4,47
		1,8	5,97		2,36	0,00								5,91		5,91			30	1,90	1,10	1,00	2,57	4,47

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
	65C050	0,00	12,76	1,97									5,91			5,91			15	1,52	1,10	1,00	2,40	3,92
	65C050	13,95	30,65	1,97											5,91	5,91			15	1,52	1,10	1,00	1,56	3,08
	73A071	0,00	2,80	1,97			2,36		2,76					5,91					12	1,37	1,10	1,00	3,57	4,94
		2,80	6,50	1,97			2,36		2,76					7,87					12	1,37	1,10	1,00	3,85	5,22
	67D031	0,00	10,36	2,36									5,91			5,91			10	1,23	1,00	0,80	2,35	3,58
NTMNM	61A005	1655	1665	1,97									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	2,82	4,52
	64A047	0,00	6,60	1,97									5,91			5,91			30	1,90	1,20	1,05	2,51	4,41
		6,60	21,70	1,97									5,91			5,91			30	1,90	1,20	1,05	2,51	4,41
	61A005	1675,00	1676,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1676,00	1677,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1677,00	1678,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1678,00	1679,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1679,00	1680,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1680,00	1681,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1681,00	1682,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1682,00	1683,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
		1683,00	1684,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
		1684,00	1685,00	2,36									5,91				5,91		20	1,70	1,20	1,05	2,68	4,38
	62A005	1585,60	1635,00	1,97									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	2,82	4,52
	64A041	38,30	43,10	2,36									5,91			5,91			30	1,90	1,20	1,05	2,68	4,58
STMNM	68C031	23,29	25,98	2,36									5,91			9,06			20	1,70	1,00	0,80	2,65	4,35
	68C780	6,62	16,73	2,36									5,91			5,91			28	1,87	1,00	0,80	2,35	4,22
	69B181			2,36									5,91			0,98			15	1,52	1,00	0,80	1,88	3,40
				2,36									5,91			0,98			15	1,52	1,00	0,80	1,88	3,40
				2,36									5,91			0,98			15	1,52	1,00	0,80	1,88	3,40
	69C060	12,2	16,22	2,36									7,87			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,61	4,13
		16,22	26,18	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
	68C031	21,59	23,29	2,36									5,91			9,06			20	1,70	1,00	0,80	2,65	4,35
		23,29	25,93	2,36									5,91			9,06			20	1,70	1,00	0,80	2,65	4,35
	69B181	20,50	21,90	2,36			2,36						5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,32	4,84
		21,90	25,70	2,36			2,36						5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,32	4,84
		25,70	29,80	2,36			2,36						5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,32	4,84
		25,70	29,80	2,36			2,36						5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,32	4,84
	69B181	52,30	55,90	1,97			1,97						4,72				0,98		15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
		52,30	55,90	1,97			1,97						4,72					0,98	15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
	69B181			0,00									0,00								1,00	0,80	0,00	
	69C060	12,20	16,22	2,36									7,87			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,61	4,13
		16,22	26,18	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
	68C022	6,54	10,60	1,97			1,97						5,91			5,91			20	1,70	1,00	0,80	2,99	4,69
	68C031	18,00	19,46	2,36									5,91			9,06			20	1,70	1,00	0,80	2,65	4,35
	69C060	16,22	26,18	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
NTMNA	62A005	1234,8	1262,2	2,76									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	3,16	4,86
	62A006	1262,2	1268,8	2,76									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	3,16	4,86
	62A005	1268,8	1282	2,36									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	2,99	4,69
	62A005	1282	1302	2,36									7,87			5,91			20	1,70	1,20	1,05	2,99	4,69
	64B085	0	6,6	1,97						2,36			5,91			5,91			30	1,90	1,20	1,05	3,29	5,19
		6,6	21,7	1,97									5,91			5,91			30	1,90	1,20	1,05	0,00	1,90
	62A005	1461,80	1472,02	2,36						2,36			13,78			5,91			20	1,70	1,20	1,05	4,69	6,39
STMNA	68C022	0,00	6,54	2,36		3,54								5,91		5,91			20	1,70	1,00	0,80	3,80	5,50
	68C055	13,45	17,15	1,97		2,36							8,66			5,91			15	1,52	1,00	0,80	3,51	5,03
CTBNM	66D451	0	6,4	2,36									5,91			5,91			30	1,90	1,00	0,80	2,35	4,25

Código Investigación	Código MOP	K _I	K _F	Tipo de capa de rodadura		Tipo de Capa Intermedia		Tipo de Base Negra					Tipo de Base			Tipo de Sub Base			CBR	SNSG (inch)	m Bases	m Sub-bases	a _i *h _i (inch)	SN _(inch)
				ACC	ACD	ACG	ACD	AFD	ACG	ACD	DTA	ACA	GRE	GRA	DTA	GRA	GRE	DTA						
	67C850	0	9,63	2,36									7,09			7,87			15	1,52	1,00	0,80	2,69	4,22
	66D451	0,00	6,40	2,36									5,91			5,91			30	1,90	1,00	0,80	2,35	4,25
	67C011	21,80	27,30	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
		27,30	28,90	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
		28,90	29,45	2,36									5,91			5,91			15	1,52	1,00	0,80	2,35	3,87
	67D049	0,00	13,87	2,36									5,91			7,09			20	1,70	1,00	0,80	2,46	4,16
	67D055	0,00	12,41	2,36									5,91			3,94			30	1,90	1,00	0,80	2,16	4,06
STBNM	70D016	0	5,5	2,36									5,91			5,91			15	1,52	0,90	0,70	2,20	3,73
	70D016	0,00	5,52	2,36									5,91			5,91			15	1,52	0,90	0,70	2,20	3,73

Anexo 4. Funciones de densidad de probabilidad que representan el tránsito

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 0		Año No 1	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0216533	media = 0,5663	Exponencial P-Value 0,0274246	media = 0,59545
NTANM	Weibull P-Value 0,0269644	forma = 5,4427	Weibull P-Value 0,00833095	forma = 5,38022
		escala = 0,38068		escala = 0,4011
CTANM	Normal P-Value 0,000364062	media = 0,325347	Normal P-Value 0,000345848	media = 0,340882
		desviación estándar = 0,0115716		desviación estándar = 0,013285
STANM	Lognormal P-Value 0,00650473	media = 0,350818	Lognormal P-Value 0,00598622	media = 0,369036
		desviación estándar = 0,165696		desviación estándar = 0,174911
NTANA	Weibull P-Value 0,00000240023	forma = 8,86751	Weibull P-Value 0,00000229574	forma = 8,84398
		escala = 0,225466		escala = 0,238586
CTANA	Lognormal P-Value 0,0355547	media = 0,436601	Lognormal P-Value 0,0333388	media = 0,458688
		desviación estándar = 0,299408		desviación estándar = 0,314599
STANA	Lognormal P-Value 0,162991	media = 0,370637	Lognormal P-Value 0,174699	media = 0,3902
		desviación estándar = 0,158299		desviación estándar = 0,167146
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00223562	media = 0,121858	Lognormal P-Value 0,0024793	media = 0,127412
		desviación estándar = 0,0368241		desviación estándar = 0,0386992
NTMNM	Lognormal P-Value 0,0510787	media = 0,132071	Lognormal P-Value 0,0287891	media = 0,138614
		desviación estándar = 0,0364006		desviación estándar = 0,0380726
STMNM	Lognormal P-Value 0,0147591	media = 0,102171	Lognormal P-Value 0,015011	media = 0,107219
		desviación estándar = 0,0266255		desviación estándar = 0,0279175
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000276897	media = 0,182246	Lognormal P-Value 0,0000264026	media = 0,192404
		desviación estándar = 0,042486		desviación estándar = 0,0453701
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,1265	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,13275
		desviación estándar = 0,0260484		desviación estándar = 0,0273253
CTBNM	Weibull P-Value 0,00896547	forma = 4,06651	Weibull P-Value 0,00920997	forma = 4,03896
		escala = 0,05974		escala = 0,062581
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0513488	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0539063
		desviación estándar = 0,0132732		desviación estándar = 0,0140841

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 2		Año No 3	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0278958	media = 0,626225	Exponencial P-Value 0,0283788	media = 0,658825
NTANM	Weibull P-Value 0,00830718	forma = 5,32298 escala = 0,422637	Weibull P-Value 0,00838639	forma = 5,2657 escala = 0,445472
CTANM	Normal P-Value 00,000338651	media = 0,357166 desviación estándar = 0,0151728	Normal P-Value 0,000337005	media = 0,374397 desviación estándar = 0,0172257
STANM	Lognormal P-Value 0,00551767	media = 0,388263 desviación estándar = 0,184619	Lognormal P-Value 0,00508289	media = 0,40862 desviación estándar = 0,194957
NTANA	Weibull P-Value 0,00000232477	forma = 8,81408 escala = 0,252458	Weibull P-Value 0,0000023015	forma = 8,78239 escala = 0,267193
CTANA	Lognormal P-Value 0,0314465	media = 0,482028 desviación estándar = 0,330764	Lognormal P-Value 0,0295265	media = 0,506673 desviación estándar = 0,347859
STANA	Lognormal P-Value 0,186024	media = 0,410938 desviación estándar = 0,176446	Lognormal P-Value 0,19102	media = 0,432805 desviación estándar = 0,186363
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00280724	media = 0,133285 desviación estándar = 0,04065	Lognormal P-Value 0,00317997	media = 0,139414 desviación estándar = 0,0427483
NTMNM	Lognormal P-Value 0,0155788	media = 0,145522 desviación estándar = 0,039923	Lognormal P-Value 0,00791918	media = 0,15286 desviación estándar = 0,0418684
STMNM	Lognormal P-Value 0,0145169	media = 0,112509 desviación estándar = 0,0292367	Lognormal P-Value 0,0141272	media = 0,118161 desviación estándar = 0,0306457
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000249364	media = 0,203093 desviación estándar = 0,0484915	Lognormal P-Value 0,0000236543	media = 0,214451 desviación estándar = 0,0518058
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,1394 desviación estándar = 0,0287044	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,14635 desviación estándar = 0,0301856
CTBNM	Weibull P-Value 0,00976203	forma = 4,01203 escala = 0,0656384	Weibull P-Value 0,0103092	forma = 3,98561 escala = 0,0688492
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0566143 desviación estándar = 0,0149499	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,059473 desviación estándar = 0,0158706

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 4		Año No 5	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0288076	media = 0,6932	Exponencial P-Value 0,0292362	media = 0,72955
NTANM	Weibull P-Value 0,00836112	forma = 5,21191 escala = 0,469642	Weibull P-Value 0,00833885	forma = 5,1581 escala = 0,495212
CTANM	Normal P-Value 0,0003388	media = 0,392529 desviación estándar = 0,0193942	Normal P-Value 0,000342815	media = 0,411658 desviación estándar = 0,0217761
STANM	Lognormal P-Value 0,00468309	media = 0,430092 desviación estándar = 0,205909	Lognormal P-Value 0,00435017	media = 0,452836 desviación estándar = 0,217528
NTANA	Weibull P-Value 0,00000223606	forma = 8,74949 escala = 0,282792	Weibull P-Value 0,00000222023	forma = 8,72693 escala = 0,29931
CTANA	Lognormal P-Value 0,0277863	media = 0,532756 desviación estándar = 0,365938	Lognormal P-Value 0,0262888	media = 0,560313 desviación estándar = 0,385179
STANA	Lognormal P-Value 0,190968	media = 0,455922 desviación estándar = 0,196822	Lognormal P-Value 0,191044	media = 0,480419 desviación estándar = 0,207933
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00343507	media = 0,14591 desviación estándar = 0,044921	Lognormal P-Value 0,00379855	media = 0,15271 desviación estándar = 0,0472265
NTMNM	Lognormal P-Value 0,00385122	media = 0,160596 desviación estándar = 0,0439258	Lognormal P-Value 0,00385122	media = 0,168728 desviación estándar = 0,0461566
STMNM	Lognormal P-Value 0,010933	media = 0,124088 desviación estándar = 0,0321652	Lognormal P-Value 0,00775701	media = 0,130365 desviación estándar = 0,0337346
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000226653	media = 0,22647 desviación estándar = 0,055316	Lognormal P-Value 0,0000215623	media = 0,239199 desviación estándar = 0,0590387
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,15375 desviación estándar = 0,0317178	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,16155 desviación estándar = 0,0333522
CTBNM	Weibull P-Value 00,0109009	forma = 3,95653 escala = 0,0722221	Weibull P-Value 0,0113495	forma = 3,92664 escala = 0,0757966
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0624822 desviación estándar = 0,0168463	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0657418 desviación estándar = 0,0178747

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 6		Año No 7	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0296537	media = 0,768025	Exponencial P-Value 0,0300702	media = 0,808675
NTANM	Weibull P-Value 0,00834338	forma = 5,10969 escala = 0,522255	Weibull P-Value 0,00833926	forma = 5,06004 escala = 0,550946
CTANM	Normal P-Value 0,000348029	media = 0,431861 desviación estándar = 0,0243454	Normal P-Value 0,000353809	media = 0,453137 desviación estándar = 0,0271006
STANM	Lognormal P-Value 0,00401264	media = 0,476854 desviación estándar = 0,229854	Lognormal P-Value 0,00416792	media = 0,502252 desviación estándar = 0,242894
NTANA	Weibull P-Value 0,00000215726	forma = 8,69766 escala = 0,316781	Weibull P-Value 0,00000218845	forma = 8,67482 escala = 0,335307
CTANA	Lognormal P-Value 0,0248827	media = 0,589433 desviación estándar = 0,405566	Lognormal P-Value 0,0234806	media = 0,620248 desviación estándar = 0,427193
STANA	Lognormal P-Value 0,191175	media = 0,506294 desviación estándar = 0,219677	Lognormal P-Value 0,19133	media = 0,533697 desviación estándar = 0,232152
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00422563	media = 0,159941 desviación estándar = 0,0497032	Lognormal P-Value 0,00464219	media = 0,167556 desviación estándar = 0,0523003
NTMNM	Lognormal P-Value 0,000818043	media = 0,177357 desviación estándar = 0,0485414	Lognormal P-Value 0,00035098	media = 0,186449 desviación estándar = 0,0510882
STMNM	Lognormal P-Value 0,00536994	media = 0,136946 desviación estándar = 0,0354218	Lognormal P-Value 0,00384146	media = 0,143929 desviación estándar = 0,0371893
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000207212	media = 0,252627 desviación estándar = 0,0630062	Lognormal P-Value 0,000019999	media = 0,266926 desviación estándar = 0,0671678
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,1698 desviación estándar = 0,0350377	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,17845 desviación estándar = 0,0368254
CTBNM	Weibull P-Value 0,01174	forma = 3,89595 escala = 0,0795536	Weibull P-Value 0,0123754	forma = 3,86632 escala = 0,0835442
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0690523 desviación estándar = 0,0189604	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,072664 desviación estándar = 0,020156

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 8		Año No 9	
CTANB	Exponencial P-Value 0,030506	media = 0,8516	Exponencial P-Value 0,0308789	media = 0,897
NTANM	Weibull P-Value 0,0083345	forma = 5,014	Weibull P-Value 0,00832594	forma = 4,96748
		escala = 0,581246		escala = 0,613376
CTANM	Normal P-Value 0,000360864	media = 0,475584	Normal P-Value 0,000366766	media = 0,499308
		desviación estándar = 0,0300454		desviación estándar = 0,0331701
STANM	Lognormal P-Value 0,00460638	media = 0,529129	Lognormal P-Value 0,00509138	media = 0,557546
		desviación estándar = 0,256758		desviación estándar = 0,271466
NTANA	Weibull P-Value 0,00000216422	forma = 8,64493	Weibull P-Value 0,000002114	forma = 8,6234
		escala = 0,354977		escala = 0,375812
CTANA	Lognormal P-Value 0,0222818	media = 0,652835	Lognormal P-Value 0,0212237	media = 0,687299
		desviación estándar = 0,450138		desviación estándar = 0,474522
STANA	Lognormal P-Value 0,191457	media = 0,562628	Lognormal P-Value 0,191631	media = 0,593239
		desviación estándar = 0,245341		desviación estándar = 0,259369
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00506009	media = 0,175543	Lognormal P-Value 0,00553024	media = 0,183967
		desviación estándar = 0,0550321		desviación estándar = 0,0579124
NTMNM	Lognormal P-Value 0,000147453	media = 0,196054	Lognormal P-Value 0,000175478	media = 0,206222
		desviación estándar = 0,0538585		desviación estándar = 0,0567977
STMNM	Lognormal P-Value 0,00268091	media = 0,151316	Lognormal P-Value 0,00183613	media = 0,159103
		desviación estándar = 0,0390556		desviación estándar = 0,0410192
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000192187	media = 0,282034	Lognormal P-Value 0,0000184821	media = 0,298003
		desviación estándar = 0,0716646		desviación estándar = 0,07645
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,18765	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,1974
		desviación estándar = 0,0387662		desviación estándar = 0,0407582
CTBNM	Weibull P-Value 0,0129766	forma = 3,84652	Weibull P-Value 0,0135487	forma = 3,81898
		escala = 0,0877676		escala = 0,092223
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0763754	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0803393
		desviación estándar = 0,0213495		desviación estándar = 0,0227129

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 10		Año No 11	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0312738	media = 0,945075	Exponencial P-Value 0,0316213	media = 0,995875
NTANM	Weibull P-Value 0,00833437	forma = 4,92376	Weibull P-Value 0,0083473	forma = 4,88224
		escala = 0,647399		escala = 0,683384
CTANM	Normal P-Value 0,000373368	media = 0,524303	Normal P-Value 0,000380127	media = 0,550695
		desviación estándar = 0,0365847		desviación estándar = 0,0402115
STANM	Lognormal P-Value 0,00559352	media = 0,587572	Lognormal P-Value 0,00615604	media = 0,619386
		desviación estándar = 0,286997		desviación estándar = 0,303509
NTANA	Weibull P-Value 0,00000212434	forma = 8,59916	Weibull P-Value 0,0000021011	forma = 8,58088
		escala = 0,397881		escala = 0,421307
CTANA	Lognormal P-Value 0,0201239	media = 0,723765	Lognormal P-Value 0,0191728	media = 0,76237
		desviación estándar = 0,500403		desviación estándar = 0,527841
STANA	Lognormal P-Value 0,191791	media = 0,625651	Lognormal P-Value 0,192156	media = 0,659948
		desviación estándar = 0,2742		desviación estándar = 0,289933
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00613234	media = 0,192877	Lognormal P-Value 0,00666178	media = 0,202292
		desviación estándar = 0,0610042		desviación estándar = 0,0642455
NTMNM	Lognormal P-Value 0,000175478	media = 0,216986	Lognormal P-Value 0,000515921	media = 0,228329
		desviación estándar = 0,0599004		desviación estándar = 0,0632592
STMNM	Lognormal P-Value 0,0012912	media = 0,167333	Lognormal P-Value 0,00142192	media = 0,176025
		desviación estándar = 0,0431226		desviación estándar = 0,0453289
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000179367	media = 0,314972	Lognormal P-Value 0,0000173659	media = 0,33289
		desviación estándar = 0,0814802		desviación estándar = 0,0868954
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,20765	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,21855
		desviación estándar = 0,0429544		desviación estándar = 0,0452017
CTBNM	Weibull P-Value 0,0143417	forma = 3,79204	Weibull P-Value 0,0150618	forma = 3,76838
		escala = 0,0969202		escala = 0,101913
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0845535	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,088967
		desviación estándar = 0,0241291		desviación estándar = 0,02554

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 12		Año No 13	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0319676	media = 1,04963	Exponencial P-Value 0,0322992	media = 1,10645
NTANM	Weibull P-Value 0,0083494	forma = 4,84067 escala = 0,721545	Weibull P-Value 0,00835923	forma = 4,80157 escala = 0,761943
CTANM	Normal P-Value 0,000386317	media = 0,578611 desviación estándar = 0,0440716	Normal P-Value 0,00039227	media = 0,608024 desviación estándar = 0,0482436
STANM	Lognormal P-Value 0,00673523	media = 0,653013 desviación estándar = 0,321019	Lognormal P-Value 0,00736762	media = 0,688608 desviación estándar = 0,339613
NTANA	Weibull P-Value 0,0000021143	forma = 8,55322 escala = 0,446146	Weibull P-Value 0,00000205792	forma = 8,53462 escala = 0,472499
CTANA	Lognormal P-Value 0,0182732	media = 0,803217 desviación estándar = 0,557013	Lognormal P-Value 0,0174593	media = 0,846469 desviación estándar = 0,587917
STANA	Lognormal P-Value 0,192355	media = 0,696218 desviación estándar = 0,306568	Lognormal P-Value 0,19265	media = 0,734598 desviación estándar = 0,324257
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00729384	media = 0,212207 desviación estándar = 0,0676879	Lognormal P-Value 0,00794771	media = 0,222666 desviación estándar = 0,0713237
NTMNM	Lognormal P-Value 0,000863894	media = 0,2403 desviación estándar = 0,0668412	Lognormal P-Value 0,00137309	media = 0,253001 desviación estándar = 0,0706674
STMNM	Lognormal P-Value 0,00156626	media = 0,185244 desviación estándar = 0,0476882	Lognormal P-Value 0,00174104	media = 0,194954 desviación estándar = 0,0501514
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000168989	media = 0,351959 desviación estándar = 0,0926014	Lognormal P-Value 0,0000164161	media = 0,372098 desviación estándar = 0,098716
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,23005 desviación estándar = 0,0476533	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,2422 desviación estándar = 0,0502582
CTBNM	Weibull P-Value 0,0158044	forma = 3,73935 escala = 0,107117	Weibull P-Value 0,0164898	forma = 3,71941 escala = 0,112693
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0936331 desviación estándar = 0,0271215	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,0986005 desviación estándar = 0,0288133

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 14		Año No 15	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0326266	media = 1,1666	Exponencial P-Value 0,0329377	media = 1,2302
NTANM	Weibull P-Value 0,00836153	forma = 4,7634 escala = 0,8048	Weibull P-Value 0,00837434	forma = 4,72705 escala = 0,850157
CTANM	Normal P-Value 0,000398054	media = 0,639084 desviación estándar = 0,0526773	Normal P-Value 0,000403506	media = 0,671842 desviación estándar = 0,0574224
STANM	Lognormal P-Value 0,00802738	media = 0,726232 desviación estándar = 0,359293	Lognormal P-Value 0,00870465	media = 0,766076 desviación estándar = 0,380172
NTANA	Weibull P-Value 0,00000204526	forma = 8,51532 escala = 0,500376	Weibull P-Value 0,00000202774	forma = 8,4934 escala = 0,529925
CTANA	Lognormal P-Value 0,0166511	media = 0,892259 desviación estándar = 0,620757	Lognormal P-Value 0,0159438	media = 0,940703 desviación estándar = 0,655649
STANA	Lognormal P-Value 0,192948	media = 0,775256 desviación estándar = 0,34298	Lognormal P-Value 0,1933	media = 0,818271 desviación estándar = 0,36285
CTMNB	Lognormal P-Value 0,0084833	media = 0,233737 desviación estándar = 0,0751518	Lognormal P-Value 0,00919045	media = 0,245364 desviación estándar = 0,0792267
NTMNM	Lognormal P-Value 0,00210395	media = 0,266395 desviación estándar = 0,0747832	Lognormal P-Value 0,00320544	media = 0,280567 desviación estándar = 0,0791526
STMNM	Lognormal P-Value 0,00190961	media = 0,205223 desviación estándar = 0,0527927	Lognormal P-Value 0,00208811	media = 0,216108 desviación estándar = 0,0555521
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000159821	media = 0,393437 desviación estándar = 0,105169	Lognormal P-Value 0,0000156345	media = 0,416085 desviación estándar = 0,111984
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,25505 desviación estándar = 0,0529652	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,26865 desviación estándar = 0,0558254
CTBNM	Weibull P-Value 0,0173816	forma = 3,69276 escala = 0,118596	Weibull P-Value 0,0182372	forma = 3,6685 escala = 0,124792
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,103818 desviación estándar = 0,0305575	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,109337 desviación estándar = 0,032412

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 16		Año No 17	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0332164	media = 1,29753	Exponencial P-Value 0,0334951	media = 1,36878
NTANM	Weibull P-Value 0,00839026	forma = 4,69202 escala = 0,898175	Weibull P-Value 0,00840379	forma = 4,65776 escala = 0,949098
CTANM	Normal P-Value 0,000409053	media = 0,706521 desviación estándar = 0,0625088	Normal P-Value 0,000413779	media = 0,743174 desviación estándar = 0,0678766
STANM	Lognormal P-Value 0,00945272	media = 0,808249 desviación estándar = 0,402325	Lognormal P-Value 0,0102302	media = 0,85286 desviación estándar = 0,425776
NTANA	Weibull P-Value 0,00000201273	forma = 8,47587 escala = 0,561257	Weibull P-Value 0,00000202035	forma = 8,45643 escala = 0,594495
CTANA	Lognormal P-Value 0,0153065	media = 0,992008 desviación estándar = 0,692703	Lognormal P-Value 0,0147018	media = 1,04633 desviación estándar = 0,732072
STANA	Lognormal P-Value 0,19364	media = 0,863792 desviación estándar = 0,38387	Lognormal P-Value 0,194056	media = 0,911997 desviación estándar = 0,406242
CTMNB	Lognormal P-Value 0,00991044	media = 0,257719 desviación estándar = 0,0835424	Lognormal P-Value 0,0105749	media = 0,27074 desviación estándar = 0,0880897
NTMNM	Lognormal P-Value 0,00469109	media = 0,295534 desviación estándar = 0,0838079	Lognormal P-Value 0,00548245	media = 0,311395 desviación estándar = 0,0887619
STMNM	Lognormal P-Value 0,00229917	media = 0,227604 desviación estándar = 0,0584841	Lognormal P-Value 0,0024976	media = 0,239762 desviación estándar = 0,0616014
NTMNA	Lognormal P-Value 0,000015253	media = 0,440054 desviación estándar = 0,119257	Lognormal P-Value 0,0000148947	media = 0,465453 desviación estándar = 0,127014
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,28305 desviación estándar = 0,0588899	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,29825 desviación estándar = 0,0621588
CTBNM	Weibull P-Value 0,0190085	forma = 3,64123 escala = 0,131365	Weibull P-Value 0,0197534	forma = 3,61983 escala = 0,138326
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,115257 desviación estándar = 0,0343735	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,121429 desviación estándar = 0,0365068

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 18		Año No 19	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0337535	media = 1,4442	Exponencial P-Value 0,0340132	media = 1,52395
NTANM	Weibull P-Value 0,00842265	forma = 4,62514 escala = 1,00305	Weibull P-Value 0,00839332	forma = 4,59305 escala = 1,06026
CTANM	Normal P-Value 0,000418312	media = 0,781847 desviación estándar = 0,0736852	Normal P-Value 0,000422864	media = 0,822742 desviación estándar = 0,079835
STANM	Lognormal P-Value 0,0110105	media = 0,900077 desviación estándar = 0,450709	Lognormal P-Value 0,0118514	media = 0,950113 desviación estándar = 0,477048
NTANA	Weibull P-Value 0,00000196572	forma = 8,43968 escala = 0,629717	Weibull P-Value 0,00000198558	forma = 8,42119 escala = 0,667026
CTANA	Lognormal P-Value 0,0141119	media = 1,10388 desviación estándar = 0,77385	Lognormal P-Value 0,0135609	media = 1,16482 desviación estándar = 0,818217
STANA	Lognormal P-Value 0,194438	media = 0,963006 desviación estándar = 0,429892	Lognormal P-Value 0,194823	media = 1,01702 desviación estándar = 0,454976
CTMNB	Lognormal P-Value 0,0114092	media = 0,284502 desviación estándar = 0,0929141	Lognormal P-Value 0,0121901	media = 0,299016 desviación estándar = 0,0980266
NTMNM	Lognormal P-Value 0,00322087	media = 0,328166 desviación estándar = 0,0941155	Lognormal P-Value 0,00183329	media = 0,345896 desviación estándar = 0,0997668
STMNM	Lognormal P-Value 0,00275201	media = 0,252607 desviación estándar = 0,0648996	Lognormal P-Value 0,00300158	media = 0,266203 desviación estándar = 0,0683873
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000145809	media = 0,492352 desviación estándar = 0,135228	Lognormal P-Value 0,0000143237	media = 0,520871 desviación estándar = 0,143928
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,3144 desviación estándar = 0,0655808	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,33145 desviación estándar = 0,0692072
CTBNM	Weibull P-Value 0,0207503	forma = 3,5971 escala = 0,14569	Weibull P-Value 0,0217905	forma = 3,57407 escala = 0,153505
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,127951 desviación estándar = 0,038689	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,134877 desviación estándar = 0,0410984

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 20		Año No 21	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0342288	media = 1,60845	Exponencial P-Value 0,0344531	media = 1,6979
NTANM	Weibull P-Value 0,00833974	forma = 4,56217	Weibull P-Value 0,00824458	forma = 4,53325
		escala = 1,12091		escala = 1,18514
CTANM	Normal P-Value 0,000427165	media = 0,865958	Normal P-Value 0,000430858	media = 0,911571
		desviación estándar = 0,0864257		desviación estándar = 0,0934266
STANM	Lognormal P-Value 0,0127136	media = 1,00301	Lognormal P-Value 0,0136137	media = 1,05902
		desviación estándar = 0,505061		desviación estándar = 0,534742
NTANA	Weibull P-Value 0,00000196685	forma = 8,40341	Weibull P-Value 0,00000194449	forma = 8,39063
		escala = 0,706645		escala = 0,748629
CTANA	Lognormal P-Value 0,013091	media = 1,22936	Lognormal P-Value 0,0126309	media = 1,29777
		desviación estándar = 0,865429		desviación estándar = 0,915577
STANA	Lognormal P-Value 0,195271	media = 1,07423	Lognormal P-Value 0,195755	media = 1,13476
		desviación estándar = 0,48162		desviación estándar = 0,509849
CTMNB	Lognormal P-Value 0,0131441	media = 0,314356	Lognormal P-Value 0,0140177	media = 0,330644
		desviación estándar = 0,103473		desviación estándar = 0,109223
NTMNM	Lognormal P-Value 0,0010551	media = 0,364686	Lognormal P-Value 0,000614521	media = 0,384534
		desviación estándar = 0,105844		desviación estándar = 0,112308
STMNM	Lognormal P-Value 0,00327739	media = 0,280608	Lognormal P-Value 0,00359648	media = 0,295847
		desviación estándar = 0,0720415		desviación estándar = 0,0759763
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000140581	media = 0,55111	Lognormal P-Value 0,0000137913	media = 0,583149
		desviación estándar = 0,153205		desviación estándar = 0,163037
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,3495	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,3686
		desviación estándar = 0,07314		desviación estándar = 0,077226
CTBNM	Weibull P-Value 0,022798	forma = 3,55253	Weibull P-Value 0,023749	forma = 3,53131
		escala = 0,161766		escala = 0,1705
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,142204	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,149931
		desviación estándar = 0,043615		desviación estándar = 0,0462386

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 22		Año No 23	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0346457	media = 1,79255	Exponencial P-Value 0,0348175	media = 1,89285
NTANM	Weibull P-Value 0,00815305	forma = 4,50451 escala = 1,25324	Weibull P-Value 0,00807011	forma = 4,47734 escala = 1,32541
CTANM	Normal P-Value 0,000434653	media = 0,959829 desviación estándar = 0,100899	Normal P-Value 0,00043819	media = 1,01091 desviación estándar = 0,108812
STANM	Lognormal P-Value 0,0145638	media = 1,11837 desviación estándar = 0,566189	Lognormal P-Value 0,015498	media = 1,18119 desviación estándar = 0,599554
NTANA	Weibull P-Value 0,00000194831	forma = 8,37245 escala = 0,793126	Weibull P-Value 0,00000192321	forma = 8,36007 escala = 0,840336
CTANA	Lognormal P-Value 0,0121974	media = 1,3702 desviación estándar = 0,968854	Lognormal P-Value 0,0117958	media = 1,44698 desviación estándar = 1,02546
STANA	Lognormal P-Value 0,196145	media = 1,19891 desviación estándar = 0,539724	Lognormal P-Value 0,196647	media = 1,26681 desviación estándar = 0,571499
CTMNB	Lognormal P-Value 0,0148015	media = 0,347784 desviación estándar = 0,115299	Lognormal P-Value 0,015768	media = 0,365927 desviación estándar = 0,121738
NTMNM	Lognormal P-Value 0,000352665	media = 0,405559 desviación estándar = 0,119144	Lognormal P-Value 0,000210921	media = 0,427808 desviación estándar = 0,126502
STMNM	Lognormal P-Value 0,00389074	media = 0,31195 desviación estándar = 0,0801091	Lognormal P-Value 0,00419439	media = 0,329001 desviación estándar = 0,0844952
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000135821	media = 0,617108 desviación estándar = 0,173474	Lognormal P-Value 0,000013357	media = 0,653077 desviación estándar = 0,184586
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,3889 desviación estándar = 0,0816185	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,4103 desviación estándar = 0,0862153
CTBNM	Weibull P-Value 0,0249723	forma = 3,50983 escala = 0,179762	Weibull P-Value 0,0259625	forma = 3,48798 escala = 0,18957
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,158161 desviación estándar = 0,0490864	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,166792 desviación estándar = 0,0520412

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL TRÁNSITO EN CADA AÑO Y PARA CADA NIVEL DEL FACTORIAL EN MILLONES DE EJES			
	Año No 24		Año No 25	
CTANB	Exponencial P-Value 0,0349861	media = 1,99895	Exponencial P-Value 0,0351271	media = 2,11137
NTANM	Weibull P-Value 0,00796937	forma = 4,4502 escala = 1,40199	Weibull P-Value 0,00784271	forma = 4,4251 escala = 1,48313
CTANM	Normal P-Value 0,000441173	media = 1,06486 desviación estándar = 0,117314	Normal P-Value 0,000444398	media = 1,12193 desviación estándar = 0,126368
STANM	Lognormal P-Value 0,016483	media = 1,24768 desviación estándar = 0,634953	Lognormal P-Value 0,0174893	media = 1,31813 desviación estándar = 0,672432
NTANA	Weibull P-Value 0,00000191922	forma = 8,3437 escala = 0,89035	Weibull P-Value 0,00000190342	forma = 8,33121 escala = 0,943402
CTANA	Lognormal P-Value 0,0114319	media = 1,52832 desviación estándar = 1,08566	Lognormal P-Value 0,0110737	media = 1,61454 desviación estándar = 1,14959
STANA	Lognormal P-Value 0,197141	media = 1,33873 desviación estándar = 0,605125	Lognormal P-Value 0,197626	media = 1,41496 desviación estándar = 0,640808
CTMNB	Lognormal P-Value 0,0168108	media = 0,385118 desviación estándar = 0,128546	Lognormal P-Value 0,0177709	media = 0,405425 desviación estándar = 0,135798
NTMNM	Lognormal P-Value 0,000123261	media = 0,451331 desviación estándar = 0,134291	Lognormal P-Value 0,0000741015	media = 0,476277 desviación estándar = 0,142639
STMNM	Lognormal P-Value 0,00373623	media = 0,347027 desviación estándar = 0,0891315	Lognormal P-Value 0,00302348	media = 0,366164 desviación estándar = 0,0940533
NTMNA	Lognormal P-Value 0,0000131667	media = 0,691216 desviación estándar = 0,19635	Lognormal P-Value 0,0000129886	media = 0,731675 desviación estándar = 0,208812
STMNA	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,43305 desviación estándar = 0,0911696	Normal P-Value 0,00880689	media = 0,45705 desviación estándar = 0,0963793
CTBNM	Weibull P-Value 0,0270505	forma = 3,46677 escala = 0,199946	Weibull P-Value 0,0283257	forma = 3,44893 escala = 0,210943
STBNM	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,175978 desviación estándar = 0,0552793	Lognormal P-Value 0,022379	media = 0,185663 desviación estándar = 0,0586208

Anexo 5. Código computacional del modelo de simulación

```

Dim rep, asim, ncam As Integer
Dim pa, pb, li, ls As Double 'Variables de entrada
Dim dRDST, dRDPD, RDM, RDS As Double 'Variables

rep = Sheets("Menu").Cells(1, 2) 'Número de replicas a realizar
asim = Sheets("Menu").Cells(2, 2) 'Cantidad de años a simular
ncam = Sheets("Menu").Cells(3, 2) 'Cantidad de caminos a simular
PF = Sheets("Menu").Cells(4, 2) 'Valor del PSI para el cual voy
obtener valor YE4 y Año
carpeta = ActiveWorkbook.Path ' Directorio de trabajo donde se
encuentra el programa

contf = 2
For cam = 1 To ncam
' /***** LECTURA PARÁMETROS DEL MODELO DE AGRIETAMIENTO *****/
' /** Lectura de los ICA Y ICW ***/
kcia = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 2)
CDS = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 3)
ciaa0 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 4)
ciaa1 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 5)
ciaa2 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 6)
CRT = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 7)
kciw = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 8)
ciwa5 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 9)
ciwa6 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 10)
ciwa7 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 11)
' /** Lectura de los ACA Y ACW ***/
kcpa = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 12)
CRP = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 13)
cpaa0 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 14)
cpaa1 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 15)
kcpw = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 16)
cpwa0 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 17)
cpwa1 = Sheets("Agrietamiento").Cells(5 + cam, 18)

' /***** LECTURA PARÁMETROS DEL MODELO DE AHUELLAMIENTO *****/
' /** Lectura de los parámetros de densificación inicial ***/
krid = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 2)
rida0 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 3)
rida1 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 4)
rida2 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 5)
rida3 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 6)
rida4 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 7)
COMP = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 8)

' /** Lectura de los parámetros de deformacion estructural ***/
krst = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 9)
rsta0 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 10)
rsta1 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 11)

```

```

rsta2 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 12)
rsta3 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 13)
rsta00 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 14)
rsta01 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 15)
rsta02 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 16)
rsta03 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 17)
rsta04 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 18)
MMP = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 19)

'/** Lectura de los parámetros de deformacion plástica ***/
krpd = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 20)
rpda0 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 21)
rpda1 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 22)
rpda2 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 23)
rpda3 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 24)
CDS = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 25)
sh = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 26)
phs = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 27)

'/** Lectura de los parámetros de ahuellamiento total y desviación
estandar ***/
krds = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 28)
rdsa0 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 29)
rdsa1 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 30)
rdsa2 = Sheets("Ahuellamiento").Cells(5 + cam, 31)

' / ***** LECTURA DE LOS PARÉMETROS DEL MODELO DE RUGOSIDAD
*****/
' / Componentes de la rugosidad estructural
ksnpk = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 2)
snpka0 = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 3)
snpka1 = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 4)
snpka2 = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 5)
kgs = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 6)
kgm = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 7)
a0 = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 8)
m = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 9)

'/** Componente de Agrietamiento
kgc = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 10)
gca0 = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 11)

'/** Componente de Ahuellamiento
kgr = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 12)
gra0 = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 13)

'/** Componente de Ambietal
kgma = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 14)
ml = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 15)

'**** IRI inicial */
IRIo = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 16)

```

```

PACX = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 17)
HSNEW = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 18)
HSOLD = Sheets("Rugosidad").Cells(5 + cam, 19)

' /**** Definición del nombre del archivo de resultados ****/
nasal1 = Trim(Str(cam)) & "-all.txt" 'Resultados generales
nasal2 = Trim(Str(cam)) & "-ACA.txt" 'Resultados ACA
nasal3 = Trim(Str(cam)) & "-ACW.txt" 'Resultados ACW
nasal4 = Trim(Str(cam)) & "-RDM.txt" 'Resultados RDM
nasal5 = Trim(Str(cam)) & "-IRI.txt" 'Resultados IRI
nasal6 = Trim(Str(cam)) & "-PSI.txt" 'Resultados IRI
nasal7 = Trim(Str(cam)) & "-YE4acum.txt" 'Resultados YE4
nasal8 = Trim(Str(cam)) & "-PF.txt" 'Resultados
correspondientes a PF asignado
ruta1 = carpeta & "\" & nasal1
ruta2 = carpeta & "\" & nasal2
ruta3 = carpeta & "\" & nasal3
ruta4 = carpeta & "\" & nasal4
ruta5 = carpeta & "\" & nasal5
ruta6 = carpeta & "\" & nasal6
ruta7 = carpeta & "\" & nasal7
ruta8 = carpeta & "\" & nasal8
Close #1
Close #2
Close #3
Close #4
Close #5
Close #6
Close #7
Close #8
Open ruta1 For Output As 1 'Abrir archivo de datos generales de la
simulación
'Escritura encabezados archivo
Print #1, "Rep;Año;YE4;ICA;ICW;SNP;HS;DEF;ACA;ACW;RDM;RDS;IRI;PSI"
'Escritura encabezados hoja Res (Resultados primera replica)
Sheets("Res").Cells(1, 1) = "Año"
Sheets("Res").Cells(1, 2) = "YE4"
Sheets("Res").Cells(1, 3) = "ICA"
Sheets("Res").Cells(1, 4) = "ICW"
Sheets("Res").Cells(1, 5) = "SNP"
Sheets("Res").Cells(1, 6) = "HS"
Sheets("Res").Cells(1, 7) = "DEF"
Sheets("Res").Cells(1, 8) = "ACA"
Sheets("Res").Cells(1, 9) = "ACW"
Sheets("Res").Cells(1, 10) = "dRDST"
Sheets("Res").Cells(1, 11) = "dRDPD"
Sheets("Res").Cells(1, 12) = "dRDM"
Sheets("Res").Cells(1, 13) = "RDM"
Sheets("Res").Cells(1, 14) = "dRDS"
Sheets("Res").Cells(1, 15) = "RDS"
Sheets("Res").Cells(1, 16) = "dIRS"
Sheets("Res").Cells(1, 17) = "dIRC"
Sheets("Res").Cells(1, 18) = "dIRR"

```

```

    Sheets("Res").Cells(1, 19) = "dIRE"
    Sheets("Res").Cells(1, 20) = "dIRI"
    Sheets("Res").Cells(1, 21) = "IRI"
    Sheets("Res").Cells(1, 22) = "PSI"
    Sheets("Res").Cells(1, 23) = "Ncam"
    Sheets("Res").Cells(1, 24) = "Rep"

    Open ruta2 For Output As 2 'Abrir datos ACA
    Print #2,
    "Rep;Año1;Año2;Año3;Año4;Año5;Año6;Año7;Año8;Año9;Año10;Año11;Año12;Año
    13;Año14;Año15;Año16;Año17;Año18;Año19;Año20;Año21;Año22;Año23;Año24;Año
    25"
    Open ruta3 For Output As 3 'Abrir datos ACW
    Print #3,
    "Rep;Año1;Año2;Año3;Año4;Año5;Año6;Año7;Año8;Año9;Año10;Año11;Año12;Año
    13;Año14;Año15;Año16;Año17;Año18;Año19;Año20;Año21;Año22;Año23;Año24;Año
    25"
    Open ruta4 For Output As 4 'Abrir datos RDM
    Print #4,
    "Rep;Año1;Año2;Año3;Año4;Año5;Año6;Año7;Año8;Año9;Año10;Año11;Año12;Año
    13;Año14;Año15;Año16;Año17;Año18;Año19;Año20;Año21;Año22;Año23;Año24;Año
    25"
    Open ruta5 For Output As 5 'Abrir datos IRI
    Print #5,
    "Rep;Año1;Año2;Año3;Año4;Año5;Año6;Año7;Año8;Año9;Año10;Año11;Año12;Año
    13;Año14;Año15;Año16;Año17;Año18;Año19;Año20;Año21;Año22;Año23;Año24;Año
    25"
    Open ruta6 For Output As 6 'Abrir datos PSI
    Print #6,
    "Rep;Año1;Año2;Año3;Año4;Año5;Año6;Año7;Año8;Año9;Año10;Año11;Año12;Año
    13;Año14;Año15;Año16;Año17;Año18;Año19;Año20;Año21;Año22;Año23;Año24;Año
    25"
    Open ruta7 For Output As 7 'Abrir datos YE4
    Print #7,
    "Rep;Año1;Año2;Año3;Año4;Año5;Año6;Año7;Año8;Año9;Año10;Año11;Año12;Año
    13;Año14;Año15;Año16;Año17;Año18;Año19;Año20;Año21;Año22;Año23;Año24;Año
    25"
    Open ruta8 For Output As 8 'Abrir datos para PF
    Print #8, "PSI;YE4acum;Año"

    validapf = 0
    For r = 1 To rep
        ' Asignación del número estructural para cada replica
        tipod = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 3)
        pa = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 4)
        pb = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 5)
        li = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 6)
        ls = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 7)
        Select Case tipod
            Case 1:
                SNP = Fnormal(pa, pb, li, ls)
            Case 2:
                SNP = Flognormal(pa, pb, li, ls)

```

```

        Case 3:
            SNP = Fweibull(pa, pb, li, ls)
        Case 4:
            SNP = Fexponencial(pa, li, ls)
    End Select

' Espesor HS
tipod = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 9)
pa = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 10)
pb = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 11)
li = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 12)
ls = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 13)
Select Case tipod
    Case 1:
        HS = Fnormal(pa, pb, li, ls)
    Case 2:
        HS = Flognormal(pa, pb, li, ls)
    Case 3:
        HS = Fweibull(pa, pb, li, ls)
    Case 4:
        HS = Fexponencial(pa, li, ls)
End Select

'XXXX-Debe modificarse para que genere un evento aleatorio
para cada replica y para cada tipo de camino
tipod = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 15)
pa = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 16)
pb = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 17)
li = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 18)
ls = Sheets("SNP").Cells(2 + cam, 19)
Select Case tipod
    Case 1:
        DEF = Fnormal(pa, pb, li, ls)
    Case 2:
        DEF = Flognormal(pa, pb, li, ls)
    Case 3:
        DEF = Fweibull(pa, pb, li, ls)
    Case 4:
        DEF = Fexponencial(pa, li, ls)
End Select

'Elección de una función de tráfico para el camino y cálculo del
ICA y ACW
'Elección del año y distribución
an = Int(asim * Rnd)      'Año
tipod = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 3 + 3 * an)
pa = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 4 + 3 * an)
pb = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 5 + 3 * an)
li = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 78)
ls = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 79)
Select Case tipod
    Case 1:
        trafico = Fnormal(pa, pb, li, ls)

```

```

Case 2:
    trafico = Flognormal(pa, pb, li, ls)
Case 3:
    trafico = Fweibull(pa, pb, li, ls)
Case 4:
    trafico = Fexponencial(pa, li, ls)
End Select
ICA = Int(kcia * ((CDS ^ 2) * ciaa0 * Exp(ciaa1 * SNP + ciaa2 *
(trafico / SNP ^ 2)) + CRT)) + 1
ICW = Int(kciw * WorksheetFunction.Max(ciwa5 + ciwa6 * ICA,
ciwa7 * ICA)) + 1

'Valores iniciales para el año cero
ACAant = 0
ACWant = 0
RDMant = 0
RDSant = 0
SNPKant = SNP
RIant = 0
IRIant = IRIo
PSIant = 5 * Exp(-0.24 * IRIo)
ye4acumant = 0

pospt = 3 'Posición inicial de los datos distribución de tráfico
del primer año
For i = 1 To asim
    'Transito del año de simulación
    tipod = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, pospt)
    pa = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, pospt + 1)
    pb = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, pospt + 2)
    li = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 78)
    ls = Sheets("Ftransito").Cells(2 + cam, 79)
    Select Case tipod
        Case 1:
            YE4 = Fnormal(pa, pb, li, ls)
        Case 2:
            YE4 = Flognormal(pa, pb, li, ls)
        Case 3:
            YE4 = Fweibull(pa, pb, li, ls)
        Case 4:
            YE4 = Fexponencial(pa, li, ls)
    End Select
    ye4acum = ye4acum + YE4
    pospt = pospt + 3

'***** CALCULOS DEL AGRIETAMIENTO *****
'Calculo del ACA
If ACAant <= 100 Then
    ACAa = WorksheetFunction.Max(ACAant, 0.5)
Else
    ACAa = 100
End If
SCA = WorksheetFunction.Min(ACAa, 100 - ACAa)

```

```

If ACAa < 50 Then
    za = 1
Else
    za = -1
End If
If ACAa > 0 Then
    dta = 1
Else
    dta = WorksheetFunction.Max(0, WorksheetFunction.Min(i -
ICA, 1))
End If
y = cpaa0 * cpaa1 * za * dta + SCA ^ cpaa1
If ACAa <= 50 And ACAant > 50 Then
    c1 = WorksheetFunction.Max(2 * (50 ^ cpaa1) - (SCA ^ cpaa1) -
(cpaao * cpaa1 * dta), 0)
    dACA = kcpa * (CRP / CDS) * (100 - c1 ^ (1 / cpaa1) - ACAa)
Else
    If y < 0 Then
        dACA = kcpa * (CRP / CDS) * (100 - ACAa)
    Else
        dACA = kcpa * (CRP / CDS) * za * (y ^ (1 / cpaa1) - SCA)
    End If
End If
If i >= ICA Then
    If ACAant + dACA >= 100 Then
        ACA = 100
    Else
        ACA = ACAant + dACA
    End If
Else
    ACA = 0
End If

'Calculo del ACW
ACWa = WorksheetFunction.Max(ACWant, 0.5)
SCW = WorksheetFunction.Min(ACWa, 100 - ACWa)
If ACWa < 50 Then
    zw = 1
Else
    zw = -1
End If
If ACA <= 5 And ACWant <= 0.5 Then
    dtw = 0
Else
    If ACWa > 0 Then
        dtw = 1
    Else
        dtw = WorksheetFunction.Max(0, WorksheetFunction.Min(i -
ICW, 1))
    End If
End If
y = cpwa0 * cpwa1 * zw * dtw + SCW ^ cpwa1
If ACWa <= 50 And ACWant > 50 Then

```



```

        c1 = WorksheetFunction.Max(2 * (50 ^ cpwal) - (SCW ^ cpwal) -
(cpwao * cpwal * dtw), 0)
        dACW = kcpw * (CRP / CDS) * WorksheetFunction.Min(ACAant +
dACA - ACWa, 100 - c1 ^ (1 / cpwal) - ACWa)
    Else
        If y < 0 Then
            dACW = kcpw * (CRP / CDS) * WorksheetFunction.Min(ACAant +
dACA - ACWa, 100 - ACWa)
        Else
            vmin0 = WorksheetFunction.Min(ACAant + dACA - ACWa, zw *
(y ^ (1 / cpwal) - SCW))
            If vmin0 < 0 Then
                vmin0 = 0
            End If
            dACW = kcpw * (CRP / CDS) * vmin0
        End If
    End If
    If i >= ICW Then
        If (ACWant + dACW) >= 100 Then
            ACW = 100
        Else
            ACW = ACWant + dACW
        End If
    Else
        ACW = 0
    End If

'**** CALCULOS DEL AHUELLAMIENTO
ACXa = ACAant * 0.62 + ACWant * 0.39
drdstuc = krst * (rsta0 * (SNP ^ rstal) * (YE4 ^ rsta2) * (COMP
^ rsta3))
drdstcrik = krst * (rsta00 * (SNP ^ rsta01) * (YE4 ^ rsta02) *
(MMP ^ rsta03) * (ACXa ^ rsta04))
dRDM = drdstuc + drdstcrik
' Delta Deformaciòn estructural
HSLIM = phs * HS
vmin = WorksheetFunction.Min(HS, HSLIM)
dRDPD = krpd * rpda0 * (CDS ^ rpda1) * YE4 * (sh ^ rpda2) *
(vmin ^ rpda3) ' Delta Deformaciòn plàstica

    If i = 1 Then
        RDO = krid * (rida0 * ((YE4 * 10 ^ 6) ^ (rida1 + rida2 *
DEF)) * SNP ^ rida3 * COMP ^ rida4) 'Densificaciòn inicial
        dRDM = RDO + dRDPD 'Delta Ahuellamiento total
    Else
        dRDM = dRDM + dRDPD
    End If

RDM = WorksheetFunction.Min(dRDM + RDMant, 100) 'Ahuellamiento
total
vmax = WorksheetFunction.Max(rdsa0, (rdsa1 - rdsa2 * RDM))
dRDS = krds * vmax * dRDM 'Delta de la desviaciòn estandar
RDS = RDSant + dRDS

```

```

'***** CALCULOS DE LA RUGOSIDAD
'Calculo componente estructural de rugoridad
min1 = WorksheetFunction.Min(snpka1, ACXa)
min2 = WorksheetFunction.Min(ACXa - PACX, snpka2)
max1 = WorksheetFunction.Max(min2, 0)
dSNPK = ksnpk * snpka0 * (min1 * HSNEW + max1 * HSOLD)
SNPK = WorksheetFunction.Max(SNPKant - dSNPK, 1.5)
dIRS = kgs * a0 * Exp(m * kgm * i) * ((1 + SNPK) ^ -5) * YE4
'Calculo componente de Agrietamiento
dACT = 0
dACRA = (ACA - ACAant) + dACT
dIRC = kgc * gca0 * dACRA
'Calculo componente de Ahuellamiento
dIRR = kgr * gra0 * dRDS
'Calculo componente Ambiental
RI = RIant + (dIRS + dIRC + dIRR)
dIRE = kgma * m1 * RI
'Calculo IRI
dIRI = dIRS + dIRC + dIRR + dIRE
IRI = WorksheetFunction.Min(IRIant + dIRI, 16)
PSI = 5 * Exp(-0.24 * IRI)

'Guarda los valores del calcul anterior de las variables
ACAant = ACA
ACWant = ACW
RDMant = RDM
RDSant = RDS
SNPKant = SNPK
RIant = RI
IRIant = IRI
linea = Str(r) & ";" & Str(i) & ";" & Str(Round(ye4acum, 4)) &
";" & Str(ICA) & ";" & Str(ICW) & ";" & Str(Round(SNP, 4)) & ";" &
Str(Round(HS, 4)) & ";" & Str(Round(DEF, 4)) & ";" & Str(Round(ACA, 4))
& ";" & Str(Round(ACW, 4)) & ";" & Str(Round(RDM, 4)) & ";" &
Str(Round(RDS, 4)) & ";" & Str(Round(IRI, 4)) & ";" & Str(Round(PSI,
4))

Print #1, linea
If r = 1 Then 'Se guarda solo la primera replica de cada camino
  Sheets("Res").Cells(contf, 1) = i
  Sheets("Res").Cells(contf, 2) = ye4acum
  Sheets("Res").Cells(contf, 3) = ICA
  Sheets("Res").Cells(contf, 4) = ICW
  Sheets("Res").Cells(contf, 5) = SNP
  Sheets("Res").Cells(contf, 6) = HS
  Sheets("Res").Cells(contf, 7) = DEF
  Sheets("Res").Cells(contf, 8) = ACA
  Sheets("Res").Cells(contf, 9) = ACW
  Sheets("Res").Cells(contf, 10) = dRDST
  Sheets("Res").Cells(contf, 11) = dRDPD
  Sheets("Res").Cells(contf, 12) = dRDM
  Sheets("Res").Cells(contf, 13) = RDM
  Sheets("Res").Cells(contf, 14) = dRDS

```

```

    Sheets("Res").Cells(contf, 15) = RDS
    Sheets("Res").Cells(contf, 16) = dIRS
    Sheets("Res").Cells(contf, 17) = dIRC
    Sheets("Res").Cells(contf, 18) = dIRR
    Sheets("Res").Cells(contf, 19) = dIRE
    Sheets("Res").Cells(contf, 20) = dIRI
    Sheets("Res").Cells(contf, 21) = IRI
    Sheets("Res").Cells(contf, 22) = PSI
    Sheets("Res").Cells(contf, 23) = cam
    Sheets("Res").Cells(contf, 24) = r
    contf = contf + 1
End If
'Acamula informaciòn de 25 años para guardar en archivos por
variable
If i = 25 Then
    resaca = resaca & Str(Round(ACA, 4))
    resacw = resacw & Str(Round(ACW, 4))
    resrdm = resrdm & Str(Round(RDM, 4))
    resiri = resiri & Str(Round(IRI, 4))
    respsi = respsi & Str(Round(PSI, 4))
    resye4 = resye4 & Str(Round(ye4acum, 4))
Else
    resaca = resaca & Str(Round(ACA, 4)) & ";"
    resacw = resacw & Str(Round(ACW, 4)) & ";"
    resrdm = resrdm & Str(Round(RDM, 4)) & ";"
    resiri = resiri & Str(Round(IRI, 4)) & ";"
    respsi = respsi & Str(Round(PSI, 4)) & ";"
    resye4 = resye4 & Str(Round(ye4acum, 4)) & ";"
End If

'Guardar los datos para cuando el PSI sea aproximado al PF en
una cifra decimal
If validapf = 0 Then
    psiround = Round(PSI, 1)
    If psiround = PF Then
        Print #8, Str(Round(PSI, 4)) & ";" & Str(Round(ye4acum,
4)) & ";" & Str(i)
        validapf = 1
    Else
        If PSI < PF Then
            'Interpolaciòn de año y del tráfico acumulado
            x = (PSIant - PF) / (PSIant - PSI)
            ix = (i - 1) + x                'Año interpolado
            y = (ye4acum - ye4acumant) * x
            yacum = ye4acumant + y          'Tráfico acumulado
interpolado
            Print #8, Str(Round(PF, 4)) & ";" & Str(Round(yacum,
4)) & ";" & Str(Round(ix, 1))
            validapf = 1
        End If
    End If
End If
PSIant = PSI

```

```

        ye4acumant = ye4acum
    Next i
    Print #2, Str(r) & ";" & resaca
    Print #3, Str(r) & ";" & resacw
    Print #4, Str(r) & ";" & resrdm
    Print #5, Str(r) & ";" & resiri
    Print #6, Str(r) & ";" & respsi
    Print #7, Str(r) & ";" & resye4
    resaca = ""
    resacw = ""
    resrdm = ""
    resiri = ""
    respsi = ""
    resye4 = ""
    ye4acum = 0
    validapf = 0
Next r
Close #1
Close #2
Close #3
Close #4
Close #5
Close #6
Close #7
Close #8
Next cam

MsgBox (" PROCESO DE SIMULACION TERMINADO")

End Sub

```

Anexo 6. Funciones de densidad de probabilidad que caracterizan el modelo de agrietamiento

Identificación de celda factorial	Función de distribución	MODELO DE DETERIORO INICIACIÓN DE GRIETAS TOTALES ICA		
		Parámetros		
CTANB	Triangular	Lim.inf. = -0,00614792	Pto. central = 0,0925269	Lím. Sup. = 7,12932
NTANM	Triangular	Lim.inf. = 2,83809	Pto. central = 9,07526	Lím. Sup. = 11,0374
CTANM	Triangular	Lim.inf. = 3,24062	Pto. Central = 7,02812	Lím. Sup. = 8,89483
STANM	Triangular	Lim.inf. = 0,358294	Pto. central = 4,21938	Lím. Sup. = 8,48193
NTANA	Triangular	lím.inf. = 5,38683	Pto. central = 10,0353	Lím. Sup. = 11,2489
CTANA	Triangular	lím.inf. = 0,837022	Pto. central = 5,97741	Lím. Sup. = 9,13906
STANA	Weibull	Forma = 3,82957	Escala = 6,34693	
CTMNB	Weibull	Forma = 8,43022	Escala = 7,37976	
NTMNM	Weibull	Forma = 11,3834	Escala = 9,82637	
STMNM	Weibull	Forma = 10,2262	Escala = 7,56782	
NTMNA	Normal	Media = 11,9768	Des. Estandar = 2,64641	
STMNA	Triangular	Lim.inf. = 7,01738	Pto. central = 9,45092	Lím. Sup. = 9,99374
CTBNM	Weibull	Forma = 24,3654	Escala = 7,60176	
STBNM	Triangular	Lim.inf. = 6,24847	Pto. central = 7,82984	Lím. Sup. = 7,99636

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA EL MODELO DE INICIACIÓN DE GRIETAS ANCHAS - ICW	
	Distribución	Parámetro
CTANB	Lognormal	media = 6,37707
		desviación estándar = 1,92292
		Escala log: media = 1,8092
		Escala log: desv. est. = 0,295001
NTANM	Weibull	forma = 7,34289
		escala = 10,7344
CTANM	Weibull	forma = 9,11496
		escala = 11,5066
STANM	Normal	media = 13,2731
		desviación estándar = 2,98797
NTANA	Triangular	límite inferior = 7,71835
		punto central = 12,69
		límite superior = 13,669
CTANA	Weibull	forma = 5,63037
		escala = 10,4803
STANA	Normal	media = 11,8563
		desviación estándar = 1,2718
CTMNB	Weibull	forma = 9,9242
		escala = 13,2871
NTMNM	Weibull	forma = 12,225
		escala = 13,5465
STMNM	Weibull	forma = 9,81716
		escala = 23,7088
NTMNA	Gamma	forma = 9,51086
		escala = 0,741633
STMNA	Triangular	límite inferior = 18,1072
		punto central = 22,3449
		límite superior = 22,344
CTBNM	Weibull	forma = 8,57942
		escala = 31,516
STBNM	Triangular	límite inferior = 16,6789
		punto central = 18,81
		límite superior = 18,81

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 1		Año No 2		Año No 3	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Normal	media = 0,132965	Exponencial	media = 0,384492	Exponencial	media = 0,77459
		desviación estándar = 0,228346				
NTANM					Triangular	límite inferior = -0,00000420196
						punto central = -1,68242E-7
						límite superior = 1,55988
CTANM						
STANM	Exponencial	media = 0,00947497	Exponencial	media = 0,074715	Exponencial	media = 0,258411
NTANA						
CTANA	Triangular	límite inferior = -2,21067E-7	Exponencial	media = 0,0163243	Exponencial	media = 0,073292
		punto central = -0,00256488				
		límite superior = 0,525283				
STANA	Triangular	límite inferior = -2,18396E-7	Exponencial	media = 0,0117356	Exponencial	media = 0,159314
		punto central = -0,00000104696				
		límite superior = 0,758164				

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 1		Año No 2		Año No 3	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB			Triangular	límite inferior = -0,0017638	Triangular	límite inferior = -0,00355763
				punto central = -0,0058804		punto central = -0,0118609
				límite superior = 0,524788		límite superior = 1,05851
NTMNM						
STMNM			Triangular	límite inferior = -2,20474E-7	Triangular	límite inferior = -1,22198E-7
				punto central = -1,48594E-7		punto central = -6,33356E-7
				límite superior = 0,758135		límite superior = 1,66567
NTMNA	Triangular	límite inferior = -1,39993E-7	Normal	media = 0,0161891	Exponencial	media = 0,0613681
		punto central = -0,00166163		desviación estándar = 0,197829		
		límite superior = 1,54781				
STMNA						
CTBNM						
STBNM						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 4		Año No 5		Año No 6	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Exponencial	media = 1,31523	Triangular	límite inferior = -0,909114	Triangular	límite inferior = -1,00607
				punto central = 2,59789		punto central = 4,75415
				límite superior = 4,756		límite superior = 6,06447
NTANM	Exponencial	media = 0,039927	Exponencial	media = 0,200257	Exponencial	media = 0,607954
CTANM			Exponencial	media = 0,0135785	Exponencial	media = 0,0894617
STANM	Exponencial	media = 0,635787	Exponencial	media = 1,27631	Exponencial	media = 2,20563
NTANA					Exponencial	media = 0,0203187
CTANA	Exponencial	media = 0,202476	Exponencial	media = 0,4401	Exponencial	media = 0,827769
STANA	Exponencial	media = 0,739987	Normal	media = 1,64834	Gamma	forma = 8,40093
				desviación estándar = 0,763226		escala = 2,98027

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 4		Año No 5		Año No 6	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Triangular	límite inferior = -0,0058839	Triangular	límite inferior = -0,00000150719	Exponencial	media = 0,0543324
		punto central = -0,0196166		punto central = -1,5516E-7		
		límite superior = 1,75065		límite superior = 2,9152		
NTMNM	Triangular	límite inferior = -5,3006E-7	Triangular	límite inferior = -3,9701E-8	Triangular	límite inferior = -1,71036E-7
		punto central = -4,24277E-7		punto central = -0,00000279603		punto central = -0,000845902
		límite superior = 1,54561		límite superior = 3,91626		límite superior = 8,0811
STMNM	Triangular	límite inferior = -6,25792E-8	Triangular	límite inferior = -0,00000102434	Triangular	límite inferior = -3,41164E-7
		punto central = -0,00000130604		punto central = -0,00000166764		punto central = -4,58349E-7
		límite superior = 2,87477		límite superior = 4,39979		límite superior = 6,78719
NTMNA	Exponencial	media = 0,172289	Exponencial	media = 0,39794	Exponencial	media = 0,80217
STMNA						
CTBNM					Triangular	límite inferior = -0,00176361
						punto central = -0,00588013
						límite superior = 0,52479
STBNM						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 7		Año No 8		Año No 9	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Triangular	límite inferior = -0,27658	Triangular	límite inferior = 0,205441	Triangular	límite inferior = 0,422251
		punto central = 4,75444		punto central = 6,06397		punto central = 9,14852
		límite superior = 7,53006		límite superior = 9,15063		límite superior = 10,9262
NTANM	Exponencial	media = 1,4297	Exponencial	media = 2,88147	Exponencial	media = 5,22793
CTANM	Exponencial	media = 0,282559	Exponencial	media = 0,659396	Triangular	límite inferior = -0,215363
						punto central = 0,524771
						límite superior = 3,78917
STANM	Triangular	límite inferior = -0,00000997607	Triangular	límite inferior = -0,154437	Triangular	límite inferior = 0,298406
		punto central = -0,0000187015		punto central = 1,63848		punto central = 4,3302
		límite superior = 11,7526		límite superior = 13,9504		límite superior = 17,0732
NTANA	Exponencial	media = 0,176795	Exponencial	media = 0,655943	Exponencial	media = 1,72619
CTANA	Exponencial	media = 1,38683	Triangular	límite inferior = -1,24686E-7	Triangular	límite inferior = -0,0109802
				punto central = -0,0000821935		punto central = 1,0585
				límite superior = 7,68829		límite superior = 9,3326
STANA	Lognormal	media = 4,30074	Lognormal	media = 6,092	Lognormal	media = 8,19878
		desviación estándar = 1,22858		desviación estándar = 1,44094		desviación estándar = 1,66004
		Escala log: media = 1,41956		Escala log: media = 1,77976		Escala log: media = 2,0839
		Escala log: desv. est. = 0,280084		Escala log: desv. est. = 0,233318		Escala log: desv. est. = 0,200444

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 7		Año No 8		Año No 9	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Exponencial	media = 0,176731	Exponencial	media = 0,454385	Exponencial	media = 0,929489
NTMNM	Triangular	límite inferior = -0,00000326782	Triangular	límite inferior = -0,00000530451	Exponencial	media = 0,253051
		punto central = -0,000102356		punto central = -0,0000125328		
		límite superior = 12,8963		límite superior = 20,4217		
STMNM	Exponencial	media = 0,0636581	Exponencial	media = 0,187775	Exponencial	media = 0,471417
NTMNA	Exponencial	media = 1,46988	Exponencial	media = 2,48859	Exponencial	media = 3,96695
STMNA			Exponencial	media = 0,099942	Exponencial	media = 0,524985
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,00355726	Triangular	límite inferior = -8,70147E-8	Triangular	límite inferior = -0,00873082
		punto central = -0,0118604		punto central = -0,0196594		punto central = -0,0291098
		límite superior = 1,05852		límite superior = 1,75065		límite superior = 2,59799
STBNM		media = 0,156293	Triangular	límite inferior = 0,757998	Triangular	límite inferior = 1,63842
				punto central = 0,757998		punto central = 1,63842
				límite superior = 1,96163		límite superior = 3,08178

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 10		Año No 11		Año No 12	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Triangular	límite inferior = 0,422251	Triangular	límite inferior = 1,18416	Triangular	límite inferior = 3,1544
		punto central = 9,14852		punto central = 10,9253		punto central = 14,9529
		límite superior = 10,9262		límite superior = 12,8607		límite superior = 17,2069
NTANM	Exponencial	media = 8,68957	Weibull	forma = 1,34355	Triangular	límite inferior = 3,91478
				escala = 14,5817		punto central = 3,9151
						límite superior = 65,1583
CTANM	Triangular	límite inferior = 0,280076	Triangular	límite inferior = 0,761644	Lognormal	media = 3,8403
		punto central = 1,05847		punto central = 1,75059		desviación estándar = 1,43225
		límite superior = 4,98474		límite superior = 6,35115		Escala log: media = 1,28043
STANM	Triangular	límite inferior = 1,19039	Triangular	límite inferior = 1,84204	Triangular	límite inferior = 3,33068
		punto central = 6,14316		punto central = 10,7177		punto central = 13,4862
		límite superior = 20,6107		límite superior = 24,3138		límite superior = 28,4887
NTANA	Exponencial	media = 3,74018	Triangular	límite inferior = -0,20695	Lognormal	media = 11,2999
				punto central = 1,54514		desviación estándar = 7,87533
				límite superior = 26,1107		Escala log: media = 2,22684
						Escala log: desv. est. = 0,629209
CTANA	Weibull	forma = 2,16359	Lognormal	media = 5,2266	Lognormal	media = 6,55512
		escala = 4,55379		desviación estándar = 2,49274		desviación estándar = 2,70533
				Escala log: media = 1,55129		Escala log: media = 1,80161
				Escala log: desv. est. = 0,452716		Escala log: desv. est. = 0,396588
STANA	Lognormal	media = 10,6241	Lognormal	media = 13,3713	Lognormal	media = 16,4441
		desviación estándar = 1,88413		desviación estándar = 2,11232		desviación estándar = 2,34412
		Escala log: media = 2,34764		Escala log: media = 2,58079		Escala log: media = 2,78991
		Escala log: desv. est. = 0,175974		Escala log: desv. est. = 0,157001		Escala log: desv. est. = 0,141835

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 10		Año No 11		Año No 12	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Normal	media = 1,57502	Normal	media = 2,36163	Lognormal	media = 3,30786
		desviación estándar = 0,993293		desviación estándar = 1,18566		desviación estándar = 1,45435
						Escala log: media = 1,10794
						Escala log: desv. est. = 0,42039
NTMNM	Exponencial	media = 0,754732	Exponencial	media = 1,90018	Exponencial	media = 4,01873
STMNM	Exponencial	media = 1,01195	Exponencial	media = 1,87313	Laplace	media = 2,82929
						escala = 0,620268
NTMNA	Exponencial	media = 6,00628	Exponencial	media = 8,69548	Exponencial	media = 12,098
STMNA	Uniforme	límite inferior = 0,757998	Uniforme	límite inferior = 1,63842	Triangular	límite inferior = 2,81799
		límite superior = 2,82929		límite superior = 4,3302		punto central = 2,82929
						límite superior = 6,76495
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,000262527	Triangular	límite inferior = -6,44222E-7	Triangular	límite inferior = -0,0203794
		punto central = -0,0000016338		punto central = -0,00601259		punto central = -0,067948
		límite superior = 3,59943		límite superior = 4,75465		límite superior = 6,06422
STBNM	Triangular	límite inferior = 2,82929	Triangular	límite inferior = 4,3302	Triangular	límite inferior = 6,14291
		punto central = 2,82929		punto central = 4,3302		punto central = 6,14316
		límite superior = 4,63176		límite superior = 6,51821		límite superior = 8,70745

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 13		Año No 14		Año No 15	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Triangular	límite inferior = 4,36297	Weibull	forma = 5,23485	Weibull	forma = 5,61308
		punto central = 17,2058		escala = 16,7064		escala = 19,0978
		límite superior = 19,6206				
NTANM	Triangular	límite inferior = 7,44687	Triangular	límite inferior = 9,0065	Triangular	límite inferior = 18,1989
		punto central = 7,44687		punto central = 18,1989		punto central = 18,1989
		límite superior = 73,8307		límite superior = 80,5674		límite superior = 89,7162
CTANM	Lognormal	media = 5,01078	Lognormal	media = 6,33682	Lognormal	media = 7,8185
		desviación estándar = 1,5976		desviación estándar = 1,77035		desviación estándar = 1,94797
		Escala log: media = 1,56319		Escala log: media = 1,8088		Escala log: media = 2,02638
		Escala log: desv. est. = 0,311148		Escala log: desv. est. = 0,274143		Escala log: desv. est. = 0,245408
STANM	Triangular	límite inferior = 5,12259	Triangular	límite inferior = 7,2227	Triangular	límite inferior = 9,63793
		punto central = 16,5804		punto central = 20,0037		punto central = 23,7598
		límite superior = 33,0055		límite superior = 37,8678		límite superior = 43,0763
NTANA	Triangular	límite inferior = 3,58358	Triangular	límite inferior = 7,04618	Triangular	límite inferior = 10,4206
		punto central = 7,44687		punto central = 12,1929		punto central = 25,5052
		límite superior = 45,2666		límite superior = 56,9921		límite superior = 66,7086
CTANA	Lognormal	media = 8,04217	Lognormal	media = 9,68704	Lognormal	media = 11,4899
		desviación estándar = 2,93627		desviación estándar = 3,17881		desviación estándar = 3,4295
		Escala log: media = 2,02213		Escala log: media = 2,21965		Escala log: media = 2,3988
		Escala log: desv. est. = 0,353748		Escala log: desv. est. = 0,319797		Escala log: desv. est. = 0,292135
STANA	Lognormal	media = 19,8458	Lognormal	media = 23,5799	Lognormal	media = 27,65
		desviación estándar = 2,57917		desviación estándar = 2,81725		desviación estándar = 3,05816
		Escala log: media = 2,97962		Escala log: media = 3,15331		Escala log: media = 3,31355
		Escala log: desv. est. = 0,129417		Escala log: desv. est. = 0,119053		Escala log: desv. est. = 0,110266

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 13		Año No 14		Año No 15	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Lognormal	media = 4,39524	Lognormal	media = 5,63939	Lognormal	media = 7,03943
		desviación estándar = 1,617		desviación estándar = 1,79336		desviación estándar = 1,97755
		Escala log: media = 1,41705		Escala log: media = 1,68161		Escala log: media = 1,91355
		Escala log: desv. est. = 0,356287		Escala log: desv. est. = 0,310379		Escala log: desv. est. = 0,275607
NTMNM	Exponencial	media = 7,24968	Logística	media = 10,6856	Lognormal	media = 17,3206
				desviación estándar = 7,17512		desviación estándar = 9,78475
						Escala log: media = 2,71341
						Escala log: desv. est. = 0,526286
STMNM	Laplace	media = 4,3302	Laplace	media = 6,14316	Lognormal	media = 8,42836
		escala = 0,50585		escala = 0,425664		desviación estándar = 3,82098
						Escala log: media = 2,03814
						Escala log: desv. est. = 0,432337
NTMNA	Exponencial	media = 16,237	Exponencial	media = 21,0896	Exponencial	media = 26,5948
STMNA	Uniforme	límite inferior = 4,3302	Triangular	límite inferior = 6,14316	Triangular	límite inferior = 8,27119
		límite superior = 8,27119		punto central = 6,14157		punto central = 8,27117
				límite superior = 11,5439		límite superior = 14,4331
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,0253009	Triangular	límite inferior = -0,00015754	Triangular	límite inferior = -0,00328206
		punto central = -0,084357		punto central = -0,000114134		punto central = -0,012396
		límite superior = 7,52869		límite superior = 9,14885		límite superior = 10,9257
STBNM	Triangular	límite inferior = 8,27119	Triangular	límite inferior = 10,7172	Uniforme	límite inferior = 13,4862
		punto central = 8,27112		punto central = 10,7177		límite superior = 16,5804
		límite superior = 11,2158		límite superior = 14,0643		

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 16		Año No 17		Año No 18	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 5,989	Weibull	forma = 6,36291	Weibull	forma = 6,73505
		escala = 21,6506		escala = 24,3658		escala = 27,2447
NTANM	Triangular	límite inferior = 19,3142	Triangular	límite inferior = 23,8794	Triangular	límite inferior = 34,837
		punto central = 44,1617		punto central = 73,3497		punto central = 86,1756
		límite superior = 93,0836		límite superior = 94,6869		límite superior = 97,1198
CTANM	Lognormal	media = 9,45639	Lognormal	media = 11,2513	Lognormal	media = 13,2041
		desviación estándar = 2,1292		desviación estándar = 2,31333		desviación estándar = 2,49991
		Escala log: media = 2,22196		Escala log: media = 2,39978		Escala log: media = 2,56292
		Escala log: desv. est. = 0,222382		Escala log: desv. est. = 0,203481		Escala log: desv. est. = 0,187665
STANM	Triangular	límite inferior = 12,3675	Triangular	límite inferior = 15,4213	Gamma	forma = 20,1484
		punto central = 27,8521		punto central = 32,2838		escala = 0,527452
		límite superior = 48,6391		límite superior = 54,5541		
NTANA	Triangular	límite inferior = 16,6108	Triangular	límite inferior = 21,1734	Triangular	límite inferior = 31,7291
		punto central = 34,1485		punto central = 55,5757		punto central = 65,1019
		límite superior = 75,6324		límite superior = 82,1275		límite superior = 87,9556
CTANA	Lognormal	media = 13,4513	Lognormal	media = 15,572	Lognormal	media = 17,853
		desviación estándar = 3,6864		desviación estándar = 3,94828		desviación estándar = 4,21435
		Escala log: media = 2,56286		Escala log: media = 2,71432		Escala log: media = 2,85506
		Escala log: desv. est. = 0,269109		Escala log: desv. est. = 0,249611		Escala log: desv. est. = 0,232866
STANA	Lognormal	media = 32,0594	Lognormal	media = 36,8112	Lognormal	media = 41,9085
		desviación estándar = 3,30176		desviación estándar = 3,54791		desviación estándar = 3,79574
		Escala log: media = 3,46231		Escala log: media = 3,60118		Escala log: media = 3,7314
		Escala log: desv. est. = 0,102717		Escala log: desv. est. = 0,0961584		Escala log: desv. est. = 0,090387

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 16		Año No 17		Año No 18	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Lognormal	media = 8,59553	Lognormal	media = 10,3083	Lognormal	media = 12,1785
		desviación estándar = 2,16699		desviación estándar = 2,36034		desviación estándar = 2,55686
		Escala log: media = 2,12043		Escala log: media = 2,3074		Escala log: media = 2,47811
		Escala log: desv. est. = 0,248233		Escala log: desv. est. = 0,226056		Escala log: desv. est. = 0,207689
NTMNM	Lognormal	media = 24,1529	Lognormal	media = 32,2494	Lognormal	media = 41,4332
		desviación estándar = 11,1635		desviación estándar = 12,5679		desviación estándar = 13,6486
		Escala log: media = 3,0876		Escala log: media = 3,4028		Escala log: media = 3,67257
		Escala log: desv. est. = 0,440018		Escala log: desv. est. = 0,37602		Escala log: desv. est. = 0,320966
STMNM	Lognormal	media = 10,8356	Lognormal	media = 13,5689	Lognormal	media = 16,6298
		desviación estándar = 4,23213		desviación estándar = 4,67211		desviación estándar = 5,13133
		Escala log: media = 2,31185		Escala log: media = 2,55176		Escala log: media = 2,76572
		Escala log: desv. est. = 0,376798		Escala log: desv. est. = 0,334726		Escala log: desv. est. = 0,301574
NTMNA	Triangular	límite inferior = -0,00114739	Triangular	límite inferior = -0,000021305	Uniforme	límite inferior = 0,0
		punto central = -0,000217022		punto central = -0,000411738		límite superior = 99,5669
		límite superior = 104,102		límite superior = 109,707		
STMNA	Triangular	límite inferior = 10,7174	Uniforme	límite inferior = 13,4862	Triangular	límite inferior = 16,5804
		punto central = 10,7177		límite superior = 20,0038		punto central = 16,5804
		límite superior = 17,6394				límite superior = 25,1384
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,00000239389	Exponencial	media = 0,0994414	Exponencial	media = 0,164297
		punto central = -0,0318493				
		límite superior = 12,8603				
STBNM	Uniforme	límite inferior = 16,5804	Triangular	límite inferior = 20,0037	Triangular	límite inferior = 23,7595
		límite superior = 20,0038		punto central = 20,0014		punto central = 23,7598
				límite superior = 24,2304		límite superior = 28,7098

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 19		Año No 20		Año No 21	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 7,10564	Weibull	forma = 7,47483	Weibull	forma = 7,84277
		escala = 30,2882		escala = 33,4973		escala = 36,8732
NTANM	Triangular	límite inferior = 49,1781	Triangular	límite inferior = 59,3866	Triangular	límite inferior = 68,9264
		punto central = 86,1756		punto central = 94,4424		punto central = 98,6907
		límite superior = 99,6563		límite superior = 100,045		límite superior = 100,081
CTANM	Lognormal	media = 17,5873	Lognormal	media = 20,0198	Lognormal	media = 22,6143
		desviación estándar = 2,87938		desviación estándar = 3,07192		desviación estándar = 3,26616
		Escala log: media = 2,85395		Escala log: media = 2,98509		Escala log: media = 3,10826
		Escala log: desv. est. = 0,162638		Escala log: desv. est. = 0,152552		Escala log: desv. est. = 0,143684
STANM	Triangular	límite inferior = 21,6911	Triangular	límite inferior = 26,0587	Triangular	límite inferior = 30,1618
		punto central = 47,648		punto central = 53,4694		punto central = 62,7752
		límite superior = 63,8802		límite superior = 68,0744		límite superior = 71,5838
NTANA	Triangular	límite inferior = 42,8926	Triangular	límite inferior = 54,5069	Triangular	límite inferior = 64,6136
		punto central = 73,3497		punto central = 80,3592		punto central = 80,3592
		límite superior = 92,5616		límite superior = 95,9948		límite superior = 99,9869
CTANA	Lognormal	media = 20,2951	Lognormal	media = 22,8994	Lognormal	media = 25,6668
		desviación estándar = 4,48406		desviación estándar = 4,75702		desviación estándar = 5,03293
		Escala log: media = 2,98655		Escala log: media = 3,10999		Escala log: media = 3,22633
		Escala log: desv. est. = 0,218316		Escala log: desv. est. = 0,205546		Escala log: desv. est. = 0,19424
STANA	Lognormal	media = 47,3342	Normal	media = 52,8587	Lognormal	media = 57,8745
		desviación estándar = 4,0		desviación estándar = 3,82761		desviación estándar = 3,35683
		Escala log: media = 3,85367				Escala log: media = 4,0566
		Escala log: desv. est. = 0,0843553				Escala log: desv. est. = 0,0579533

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 19		Año No 20		Año No 21	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Lognormal	media = 14,2072	Lognormal	media = 16,3952	Lognormal	media = 18,7436
		desviación estándar = 2,75607		desviación estándar = 2,95764		desviación estándar = 3,16136
		Escala log: media = 2,63528		Escala log: media = 2,78097		Escala log: media = 2,91683
		Escala log: desv. est. = 0,192203		Escala log: desv. est. = 0,178955		Escala log: desv. est. = 0,167482
NTMNM	Gamma	forma = 14,727	Normal	media = 60,8776	Normal	media = 69,6175
		escala = 0,287623		desviación estándar = 12,1226		desviación estándar = 10,4431
STMNM	Lognormal	media = 20,0207	Lognormal	media = 23,7446	Lognormal	media = 27,8037
		desviación estándar = 5,60483		desviación estándar = 6,08954		desviación estándar = 6,58163
		Escala log: media = 2,95904		Escala log: media = 3,13551		Escala log: media = 3,29791
		Escala log: desv. est. = 0,274688		Escala log: desv. est. = 0,252387		Escala log: desv. est. = 0,233499
NTMNA	Uniforme	límite inferior = 0,0	Uniforme	límite inferior = 0,0	Triangular	límite inferior = -10,7505
		límite superior = 99,873		límite superior = 99,9627		punto central = 99,9892
						límite superior = 99,9894
STMNA	Triangular	límite inferior = 20,0035	Triangular	límite inferior = 23,7598	Triangular	límite inferior = 27,8521
		punto central = 20,0037		punto central = 23,7598		punto central = 27,8521
		límite superior = 29,2894		límite superior = 33,8427		límite superior = 38,7431
CTBNM	Exponencial	media = 0,262349	Exponencial	media = 0,408312	Exponencial	media = 0,616412
STBNM	Triangular	límite inferior = 27,8521	Triangular	límite inferior = 32,2838	Triangular	límite inferior = 37,0582
		punto central = 27,852		punto central = 32,2838		punto central = 37,0582
		límite superior = 33,1995		límite superior = 38,0384		límite superior = 43,2349

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 22		Año No 23		Año No 24	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 8,20957	Weibull	forma = 8,94071	Weibull	forma = 8,94071
		escala = 40,4168		escala = 48,0109		escala = 48,0109
NTANM	Triangular	límite inferior = 77,4547	Triangular	límite inferior = 84,4528	Triangular	límite inferior = 89,8817
		punto central = 99,873		punto central = 99,9627		punto central = 99,9891
		límite superior = 99,972		límite superior = 99,9939		límite superior = 100,0
CTANM	Lognormal	media = 25,3718	Lognormal	media = 28,2933	Lognormal	media = 31,3799
		desviación estándar = 3,46202		desviación estándar = 3,65942		desviación estándar = 3,85829
		Escala log: media = 3,22441		Escala log: media = 3,33433		Escala log: media = 3,43866
		Escala log: desv. est. = 0,135823		Escala log: desv. est. = 0,128803		Escala log: desv. est. = 0,122493
STANM	Triangular	límite inferior = 36,1052	Triangular	límite inferior = 41,4489	Triangular	límite inferior = 47,0347
		punto central = 62,7752		punto central = 66,9808		punto central = 70,8946
		límite superior = 75,6167		límite superior = 78,9283		límite superior = 81,938
NTANA	Triangular	límite inferior = 72,7655	Triangular	límite inferior = 79,8251	Triangular	límite inferior = 85,8455
		punto central = 90,85		punto central = 97,0252		punto central = 99,5669
		límite superior = 100,076		límite superior = 100,132		límite superior = 100,004
CTANA	Lognormal	media = 28,5984	Lognormal	media = 31,6952	Lognormal	media = 34,9582
		desviación estándar = 5,31155		desviación estándar = 5,5927		desviación estándar = 5,87623
		Escala log: media = 3,3364		Escala log: media = 3,44084		Escala log: media = 3,54022
		Escala log: desv. est. = 0,184156		Escala log: desv. est. = 0,175102		Escala log: desv. est. = 0,166924
STANA	Lognormal	media = 62,4013	Lognormal	media = 66,6282	Lognormal	media = 70,5631
		desviación estándar = 3,12878		desviación estándar = 2,91667		desviación estándar = 2,70856
		Escala log: media = 4,13233		Escala log: media = 4,19817		Escala log: media = 4,25577
		Escala log: desv. est. = 0,0501081		Escala log: desv. est. = 0,0437543		Escala log: desv. est. = 0,0383708

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 22		Año No 23		Año No 24	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Lognormal	media = 21,2535	Lognormal	media = 23,9258	Lognormal	media = 26,7616
		desviación estándar = 3,36705		desviación estándar = 3,5746		desviación estándar = 3,78388
		Escala log: media = 3,04413		Escala log: media = 3,16392		Escala log: media = 3,27707
		Escala log: desv. est. = 0,157443		Escala log: desv. est. = 0,14858		Escala log: desv. est. = 0,140693
NTMNM	Normal	media = 77,0858	Normal	media = 83,3386	Weibull	forma = 17,818
		desviación estándar = 8,78887		desviación estándar = 7,23534		escala = 91,0696
STMNM	Lognormal	media = 32,1973	Lognormal	media = 36,9142	Lognormal	media = 41,9158
		desviación estándar = 7,07177		desviación estándar = 7,53269		desviación estándar = 7,89818
		Escala log: media = 3,44832		Escala log: media = 3,5882		Escala log: media = 3,71822
		Escala log: desv. est. = 0,217057		Escala log: desv. est. = 0,201982		Escala log: desv. est. = 0,186788
NTMNA	Triangular	límite inferior = -5,26773	Triangular	límite inferior = -1,80246	Triangular	límite inferior = -0,438014
		punto central = 99,9968		punto central = 99,9999		punto central = 100,001
		límite superior = 100,011		límite superior = 99,9991		límite superior = 100,0
STMNA	Triangular	límite inferior = 32,2838	Triangular	límite inferior = 37,0582	Triangular	límite inferior = 42,1786
		punto central = 32,2838		punto central = 37,0582		punto central = 42,1786
		límite superior = 43,9934		límite superior = 49,597		límite superior = 55,5416
CTBNM	Exponencial	media = 0,90545	Exponencial	media = 1,2946	Exponencial	media = 1,80149
STBNM	Triangular	límite inferior = 42,1786	Triangular	límite inferior = 47,648	Triangular	límite inferior = 53,4694
		punto central = 42,1774		punto central = 47,648		punto central = 53,4694
		límite superior = 48,8761		límite superior = 54,6713		límite superior = 59,2673

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL	
	Año No 25	
	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 9,89647
		escala = 51,7124
NTANM	Triangular	límite inferior = 93,9298
		punto central = 99,9991
		límite superior = 99,9991
CTANM	Lognormal	media = 34,6325
		desviación estándar = 4,05858
		Escala log: media = 3,53797
		Escala log: desv. est. = 0,116791
STANM	Triangular	límite inferior = 52,8438
		punto central = 74,5218
		límite superior = 84,6629
NTANA	Triangular	límite inferior = 90,6692
		punto central = 99,9628
		límite superior = 99,9628
CTANA	Lognormal	media = 38,3879
		desviación estándar = 6,16126
		Escala log: media = 3,63502
		Escala log: desv. est. = 0,159481
STANA	Lognormal	media = 74,211
		desviación estándar = 2,50448
		Escala log: media = 4,30634
		Escala log: desv. est. = 0,0337384
CTMNB	Lognormal	media = 29,7619
		desviación estándar = 3,99483
		Escala log: media = 3,3843
		Escala log: desv. est. = 0,133627
NTMNM	Weibull	forma = 25,391
		escala = 94,4568
STMNM	Lognormal	media = 47,1066
		desviación estándar = 8,04948
		Escala log: media = 3,83802
		Escala log: desv. est. = 0,16965
NTMNA	Triangular	límite inferior = -0,829508

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS TOTALES ACA PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL	
	Año No 25	
	Distribución	Parámetro
		punto central = 100,0
		límite superior = 99,9999
STMNA	Triangular	límite inferior = 47,648
		punto central = 47,648
		límite superior = 60,4021
CTBNM	Exponencial	media = 2,44348
STBNM	Triangular	límite inferior = 58,2729
		punto central = 58,2729
		límite superior = 63,6974

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 4		Año No 5		Año No 6	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB					Triangular	límite inferior = -6,51881E-8
						punto central = -0,000321931
						límite superior = 3,07548
NTANM					Triangular	límite inferior = -0,00000126196
						punto central = -6,77413E-7
						límite superior = 1,07967
CTANM						
STANM						
NTANA						
CTANA						
STANA						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 4		Año No 5		Año No 6	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB						
NTMNM						
STMNM						
NTMNA	Triangular	límite inferior = -0,006357	Normal	media = 0,0106317	Exponencial	media = 0,0381249
		punto central = -7,23918E-7		desviación estándar = 0,125956		
		límite superior = 1,07585				
STMNA						
CTBNM						
STBNM						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 7		Año No 8		Año No 9	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Exponencial	media = 0,711796	Exponencial	media = 2,44011	Uniforme	límite inferior = 0,0
						límite superior = 11,8267
NTANM	Exponencial	media = 0,0274689	Exponencial	media = 0,128907	Exponencial	media = 0,517331
CTANM						
STANM	Exponencial	media = 0,0200526	Exponencial	media = 0,0465286	Exponencial	media = 0,195266
NTANA					Exponencial	media = 0,100798
CTANA	Triangular	límite inferior = -3,73032E-7	Exponencial	media = 0,0888238	Exponencial	media = 0,440332
		punto central = -0,0139563				
		límite superior = 2,83668				
STANA	Triangular	límite inferior = -0,0117819	Triangular	límite inferior = -0,0273297	Triangular	límite inferior = -0,00537811
		punto central = -4,92197E-7		punto central = -3,26293E-7		punto central = -6,17942E-7
		límite superior = 1,60459		límite superior = 3,72322		límite superior = 6,44019

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 7		Año No 8		Año No 9	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB			Triangular	límite inferior = -0,00952571	Triangular	límite inferior = -0,0241536
				punto central = -0,0317582		punto central = -0,0805269
				límite superior = 2,83421		límite superior = 7,18651
NTMNM	Uniforme	límite inferior = 0,0	Uniforme	límite inferior = 0,0	Uniforme	límite inferior = 0,0
		límite superior = 1,06947		límite superior = 2,33975		límite superior = 3,91111
STMNM						
NTMNA	Exponencial	media = 0,101148	Exponencial	media = 0,220613	Exponencial	media = 0,494463
STMNA						
CTBNM						
STBNM						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 10		Año No 11		Año No 12	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Uniforme	límite inferior = 0,0	Triangular	límite inferior = -2,70129	Triangular	límite inferior = -1,15329
		límite superior = 13,9238		punto central = 13,9237		punto central = 16,1302
				límite superior = 16,1322		límite superior = 18,4843
NTANM	Exponencial	media = 1,1746	Exponencial	media = 2,19977	Triangular	límite inferior = -0,00000813877
						punto central = -0,0000230007
						límite superior = 12,7334
CTANM	Exponencial	media = 0,0733334	Exponencial	media = 0,521185	Exponencial	media = 1,70668
STANM	Exponencial	media = 0,611453	Exponencial	media = 1,14847	Exponencial	media = 2,13203
NTANA	Exponencial	media = 0,386986	Exponencial	media = 0,976805	Triangular	límite inferior = -0,000180759
						punto central = -0,00000541451
						límite superior = 6,65421
CTANA	Exponencial	media = 1,21401	Exponencial	media = 2,51489	Exponencial	media = 4,41587
STANA	Exponencial	media = 0,341744	Exponencial	media = 0,758067	Exponencial	media = 2,14919

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 10		Año No 11		Año No 12	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Triangular	límite inferior = -0,0326625	Exponencial	media = 0,0730466	Exponencial	media = 0,317141
		punto central = -0,108895				
		límite superior = 9,71818				
NTMNM	Exponencial	media = 0,0418841	Exponencial	media = 0,150005	Exponencial	media = 0,441508
STMNM	Triangular	límite inferior = -9,40367E-8	Triangular	límite inferior = -8,37968E-7	Triangular	límite inferior = -0,00000145065
		punto central = -0,00479032		punto central = -0,0111131		punto central = -0,0192233
		límite superior = 1,60435		límite superior = 3,72261		límite superior = 6,43932
NTMNA	Exponencial	media = 0,898304	Exponencial	media = 1,46914	Exponencial	media = 2,22705
STMNA						
CTBNM					Triangular	límite inferior = -0,0095247
						punto central = -0,0317567
						límite superior = 2,83422
STBNM						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 13		Año No 14		Año No 15	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Triangular	límite inferior = -0,0173212	Triangular	límite inferior = 2,79077	Weibull	forma = 5,75579
		punto central = 18,4823		punto central = 20,9915		escala = 20,4335
		límite superior = 20,9939		límite superior = 23,673		
NTANM	Weibull	forma = 2,00411	Weibull	forma = 2,49108	Gamma	forma = 6,9803
		escala = 6,04713		escala = 8,2872		escala = 0,730169
CTANM	Exponencial	media = 3,84918	Uniforme	límite inferior = 0,0	Weibull	forma = 3,56163
				límite superior = 13,9238		escala = 10,6953
STANM	Exponencial	media = 3,33446	Exponencial	media = 5,12391	Exponencial	media = 7,23963
NTANA	Triangular	límite inferior = -0,259503	Triangular	límite inferior = 0,761254	Triangular	límite inferior = 2,22205
		punto central = 2,33974		punto central = 3,91111		punto central = 3,91111
		límite superior = 8,92988		límite superior = 11,4395		límite superior = 14,6087
CTANA	Exponencial	media = 6,84723	Triangular	límite inferior = -2,37102	Normal	media = 12,0563
				punto central = 11,8268		desviación estándar = 4,10441
				límite superior = 21,0107		
STANA	Exponencial	media = 3,91898	Normal	media = 6,53415	Normal	media = 9,66675
				desviación estándar = 4,13555		desviación estándar = 4,87375

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 13		Año No 14		Año No 15	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Exponencial	media = 1,03456	Exponencial	media = 2,62762	Exponencial	media = 5,2014
NTMNM	Exponencial	media = 1,07311	Exponencial	media = 2,14897	Logística	media = 3,36649
						desviación estándar = 2,27756
STMNM	Triangular	límite inferior = -0,00000633013	Triangular	límite inferior = -0,00000920709	Triangular	límite inferior = -0,000332367
		punto central = -0,0289298		punto central = -0,00000267069		punto central = -0,000141618
		límite superior = 9,69487		límite superior = 13,4543		límite superior = 17,6857
NTMNA	Exponencial	media = 3,19013	Exponencial	media = 4,37523	Exponencial	media = 5,79433
STMNA						
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,0241511	Triangular	límite inferior = -0,0326591	Triangular	límite inferior = -0,0397466
		punto central = -0,0805233		punto central = -0,10889		punto central = -0,132521
		límite superior = 7,18653		límite superior = 9,71821		límite superior = 11,8272
STBNM						

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 16		Año No 17		Año No 18	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 6,16517	Weibull	forma = 6,54917	Weibull	forma = 6,92477
		escala = 23,0894		escala = 25,9017		escala = 28,8763
NTANM	Gamma	forma = 9,36492	Gamma	forma = 12,0622	Gamma	forma = 15,0703
		escala = 0,779222		escala = 0,820692		escala = 0,856752
CTANM	Triangular	límite inferior = 5,99904	Lognormal	media = 14,2463	Lognormal	media = 16,4942
		punto central = 11,8267		desviación estándar = 2,69934		desviación estándar = 2,82475
		límite superior = 19,0684		Escala log: media = 2,63886		Escala log: media = 2,78856
				Escala log: desv. est. = 0,187808		Escala log: desv. est. = 0,170021
STANM	Exponencial	media = 9,96488	Exponencial	media = 13,0905	Exponencial	media = 16,8043
NTANA	Triangular	límite inferior = 3,58823	Triangular	límite inferior = 5,41231	Triangular	límite inferior = 7,48346
		punto central = 7,83927		punto central = 10,1625		punto central = 12,7102
		límite superior = 17,1184		límite superior = 20,2615		límite superior = 23,6016
CTANA	Lognormal	media = 14,4471	Lognormal	media = 16,7386	Lognormal	media = 19,1379
		desviación estándar = 4,19721		desviación estándar = 4,19117		desviación estándar = 4,39594
		Escala log: media = 2,62998		Escala log: media = 2,78731		Escala log: media = 2,92596
		Escala log: desv. est. = 0,284657		Escala log: desv. est. = 0,246593		Escala log: desv. est. = 0,226752
STANA	Weibull	forma = 2,57996	Weibull	forma = 3,03922	Lognormal	media = 22,1112
		escala = 15,0336		escala = 19,5721		desviación estándar = 7,30535
						Escala log: media = 3,04428
						Escala log: desv. est. = 0,321872

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 16		Año No 17		Año No 18	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Normal	media = 8,17213	Normal	media = 10,823	Lognormal	media = 13,1101
		desviación estándar = 3,61964		desviación estándar = 3,03718		desviación estándar = 2,95089
						Escala log: media = 2,54867
						Escala log: desv. est. = 0,22231
NTMNM	Logística	media = 5,09148	Gamma	forma = 6,341	Lognormal	media = 9,57558
		desviación estándar = 2,64241		escala = 0,864555		desviación estándar = 3,34383
						Escala log: media = 2,20168
						Escala log: desv. est. = 0,339209
STMNM	Triangular	límite inferior = -0,000036262	Triangular	límite inferior = -0,000471437	Exponencial	media = 0,206551
		punto central = -0,0000920406		punto central = -0,000346558		
		límite superior = 22,4216		límite superior = 27,5063		
NTMNA	Exponencial	media = 7,45212	Exponencial	media = 9,35256	Triangular	límite inferior = -0,00021289
						punto central = -0,000120345
						límite superior = 40,4832
STMNA						
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,0467942	Triangular	límite inferior = -0,00000590152	Triangular	límite inferior = -0,00112984
		punto central = -0,156019		punto central = -0,00000131644		punto central = -0,00000445527
		límite superior = 13,9243		límite superior = 16,2993		límite superior = 18,4837
STBNM					Exponencial	media = 0,330774

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 19		Año No 20		Año No 21	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 7,29689	Weibull	forma = 7,66701	Weibull	forma = 8,03567
		escala = 32,0156		escala = 35,321		escala = 38,7936
NTANM	Gamma	forma = 18,3869	Gamma	forma = 22,0103	Gamma	forma = 25,9388
		escala = 0,888732		escala = 0,917517		escala = 0,943723
CTANM	Lognormal	media = 18,8719	Lognormal	media = 21,4021	Lognormal	media = 24,0922
		desviación estándar = 2,9985		desviación estándar = 3,18684		desviación estándar = 3,3805
		Escala log: media = 2,92521		Escala log: media = 3,05252		Escala log: media = 3,17214
		Escala log: desv. est. = 0,157897		Escala log: desv. est. = 0,148088		Escala log: desv. est. = 0,139632
STANM	Exponencial	media = 21,0353	Normal	media = 25,7154	Weibull	forma = 1,93609
				desviación estándar = 15,4104		escala = 34,6779
NTANA	Triangular	límite inferior = 9,78881	Triangular	límite inferior = 12,3182	Triangular	límite inferior = 15,0637
		punto central = 15,4741		punto central = 18,4474		punto central = 21,6243
		límite superior = 27,1353		límite superior = 30,8586		límite superior = 34,7685
CTANA	Lognormal	media = 21,6815	Lognormal	media = 24,3826	Lognormal	media = 27,2459
		desviación estándar = 4,65018		desviación estándar = 4,91986		desviación estándar = 5,19583
		Escala log: media = 3,05397		Escala log: media = 3,17392		Escala log: media = 3,28704
		Escala log: desv. est. = 0,21207		Escala log: desv. est. = 0,199768		Escala log: desv. est. = 0,189001
STANA	Lognormal	media = 27,1494	Lognormal	media = 32,6235	Lognormal	media = 38,5022
		desviación estándar = 7,81488		desviación estándar = 8,33627		desviación estándar = 8,83215
		Escala log: media = 3,26155		Escala log: media = 3,45341		Escala log: media = 3,62507
		Escala log: desv. est. = 0,282138		Escala log: desv. est. = 0,2515		Escala log: desv. est. = 0,226459

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 19		Año No 20		Año No 21	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Lognormal	media = 15,3174	Lognormal	media = 17,6252	Lognormal	media = 20,0751
		desviación estándar = 2,94		desviación estándar = 3,09448		desviación estándar = 3,28608
		Escala log: media = 2,7109		Escala log: media = 2,85415		Escala log: media = 2,98626
		Escala log: desv. est. = 0,190205		Escala log: desv. est. = 0,174241		Escala log: desv. est. = 0,162609
NTMNM	Lognormal	media = 12,0366	Lognormal	media = 14,7205	Lognormal	media = 17,6183
		desviación estándar = 3,58721		desviación estándar = 3,83965		desviación estándar = 4,09432
		Escala log: media = 2,4454		Escala log: media = 2,65633		Escala log: media = 2,84264
		Escala log: desv. est. = 0,291708		Escala log: desv. est. = 0,256556		Escala log: desv. est. = 0,229341
STMNM	Exponencial	media = 0,489784	Exponencial	media = 0,849755	Exponencial	media = 1,57044
NTMNA	Triangular	límite inferior = -0,0000741552	Triangular	límite inferior = -0,00683933	Triangular	límite inferior = -0,0000118519
		punto central = -0,0000271691		punto central = -0,0000510858		punto central = -0,000516922
		límite superior = 44,8108		límite superior = 49,5071		límite superior = 58,3764
STMNA	Exponencial	media = 0,211515	Exponencial	media = 0,490784	Exponencial	media = 1,50283
CTBNM	Triangular	límite inferior = -0,00128324	Triangular	límite inferior = -0,000407465	Exponencial	media = 0,164283
		punto central = -0,0000506014		punto central = -0,000295198		
		límite superior = 20,9931		límite superior = 23,6627		
STBNM	Triangular	límite inferior = 1,60411	Triangular	límite inferior = 3,72229	Triangular	límite inferior = 6,43876
		punto central = 1,60421		punto central = 3,72229		punto central = 6,43876
		límite superior = 4,15519		límite superior = 6,99777		límite superior = 10,365

Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 22		Año No 23		Año No 24	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 8,4031	Weibull	forma = 8,76944	Weibull	forma = 9,13574
		escala = 42,4345		escala = 46,2447		escala = 50,2248
NTANM	Gamma	forma = 30,1707	Gamma	forma = 34,7047	Gamma	forma = 39,5506
		escala = 0,967803		escala = 0,990095		escala = 1,01115
CTANM	Lognormal	media = 26,945	Lognormal	media = 29,9623	Lognormal	media = 33,1452
		desviación estándar = 3,5768		desviación estándar = 3,77491		desviación estándar = 3,97456
		Escala log: media = 3,28507		Escala log: media = 3,39207		Escala log: media = 3,49376
		Escala log: desv. est. = 0,132165		Escala log: desv. est. = 0,125493		Escala log: desv. est. = 0,119486
STANM	Uniforme	límite inferior = 3,72229	Uniforme	límite inferior = 6,43876	Triangular	límite inferior = 1,64115
		límite superior = 72,0264		límite superior = 75,7013		punto central = 68,9496
						límite superior = 80,3786
NTANA	Triangular	límite inferior = 18,0187	Triangular	límite inferior = 21,1829	Triangular	límite inferior = 24,2901
		punto central = 24,9999		punto central = 28,5698		punto central = 32,3303
		límite superior = 38,8621		límite superior = 43,1889		límite superior = 48,3802
CTANA	Lognormal	media = 30,2734	Lognormal	media = 33,4666	Lognormal	media = 36,8265
		desviación estándar = 5,47541		desviación estándar = 5,75775		desviación estándar = 6,0425
		Escala log: media = 3,39418		Escala log: media = 3,49596		Escala log: media = 3,59293
		Escala log: desv. est. = 0,179412		Escala log: desv. est. = 0,170792		Escala log: desv. est. = 0,162992
STANA	Triangular	límite inferior = 21,8079	Normal	media = 50,8745	Triangular	límite inferior = 32,676
		punto central = 45,4164		desviación estándar = 8,66402		punto central = 58,1569
		límite superior = 72,0424				límite superior = 79,0435

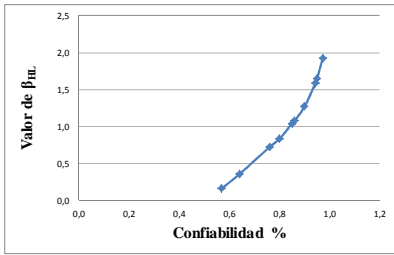
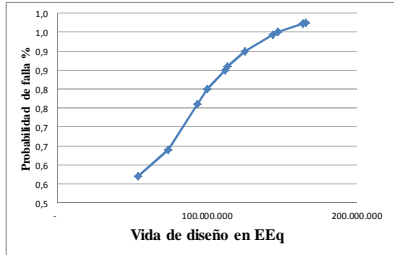
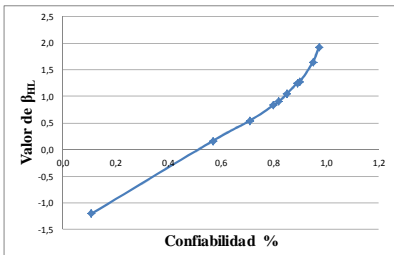
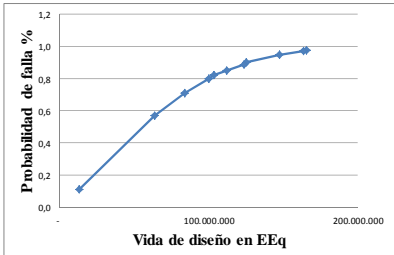
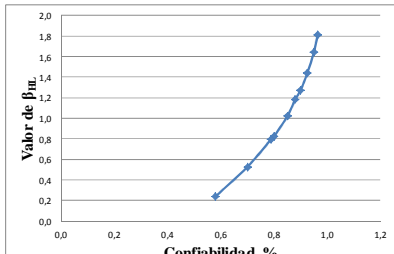
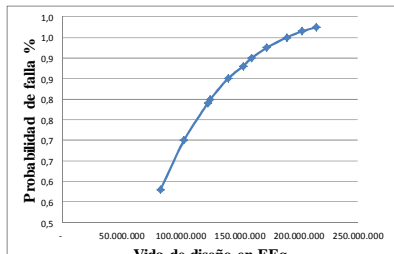
Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL					
	Año No 22		Año No 23		Año No 24	
	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro	Distribución	Parámetro
CTMNB	Lognormal	media = 22,6814	Lognormal	media = 25,4492	Lognormal	media = 28,3806
		desviación estándar = 3,48906		desviación estándar = 3,6965		desviación estándar = 3,90642
		Escala log: media = 3,10985		Escala log: media = 3,22625		Escala log: media = 3,33632
		Escala log: desv. est. = 0,15293		Escala log: desv. est. = 0,144493		Escala log: desv. est. = 0,136999
NTMNM	Lognormal	media = 20,7229	Lognormal	media = 24,0287	Lognormal	media = 27,531
		desviación estándar = 4,34831		desviación estándar = 4,60033		desviación estándar = 4,84978
		Escala log: media = 3,0097		Escala log: media = 3,16125		Escala log: media = 3,30003
		Escala log: desv. est. = 0,207575		Escala log: desv. est. = 0,189731		Escala log: desv. est. = 0,174813
STMNM	Exponencial	media = 2,45515	Exponencial	media = 3,91609	Exponencial	media = 5,66541
NTMNA	Triangular	límite inferior = -3,11293	Triangular	límite inferior = -3,46891	Triangular	límite inferior = -2,82578
		punto central = 12,7084		punto central = 20,3092		punto central = 24,9969
		límite superior = 58,2004		límite superior = 61,9116		límite superior = 65,6192
STMNA	Exponencial	media = 2,79536	Uniforme	límite inferior = 1,60421	Uniforme	límite inferior = 3,72229
				límite superior = 13,4513		límite superior = 17,6847
CTBNM	Exponencial	media = 0,282586	Exponencial	media = 0,467945	Exponencial	media = 0,752328
STBNM	Triangular	límite inferior = 9,694	Triangular	límite inferior = 13,4513	Triangular	límite inferior = 17,6847
		punto central = 9,694		punto central = 13,4513		punto central = 17,4829
		límite superior = 14,2255		límite superior = 18,5579		límite superior = 23,4353

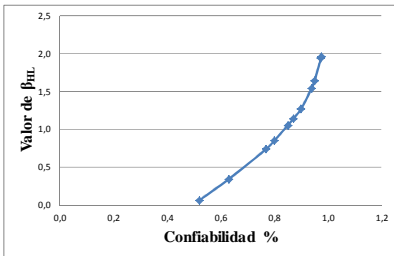
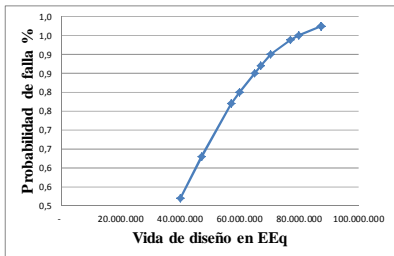
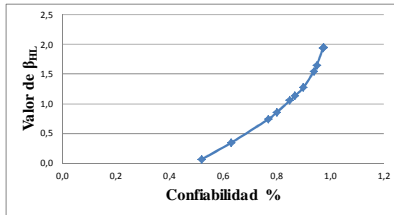
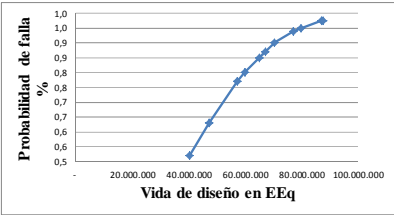
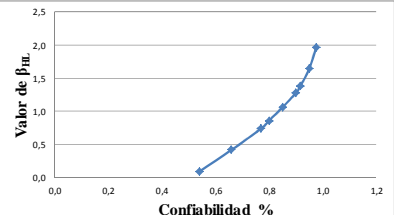
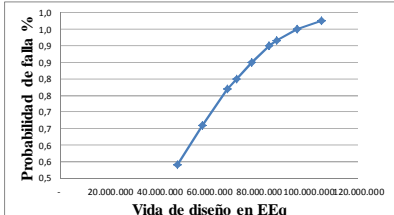
Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL	
	Año No 25	
	Distribución	Parámetro
CTANB	Weibull	forma = 10,3476
		escala = 53,8845
NTANM	Gamma	forma = 45,2499
		escala = 1,04417
CTANM	Lognormal	media = 36,4948
		desviación estándar = 4,17563
		Escala log: media = 3,59067
		Escala log: desv. est. = 0,114046
STANM	Triangular	límite inferior = 7,45488
		punto central = 73,769
		límite superior = 83,4206
NTANA	Triangular	límite inferior = 28,0863
		punto central = 36,2778
		límite superior = 52,2201
CTANA	Lognormal	media = 40,3536
		desviación estándar = 6,32841
		Escala log: media = 3,68553
		Escala log: desv. est. = 0,155872
STANA	Normal	media = 62,5429
		desviación estándar = 7,59404
CTMNB	Lognormal	media = 31,477
		desviación estándar = 4,11819
		Escala log: media = 3,44077
		Escala log: desv. est. = 0,130277
NTMNM	Lognormal	media = 31,2254
		desviación estándar = 5,09619
		Escala log: media = 3,42809
		Escala log: desv. est. = 0,162135
STMNM	Exponencial	media = 8,12127
NTMNA	Triangular	límite inferior = -2,3688

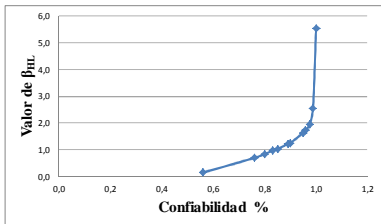
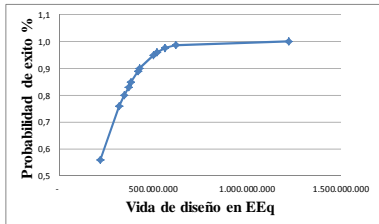
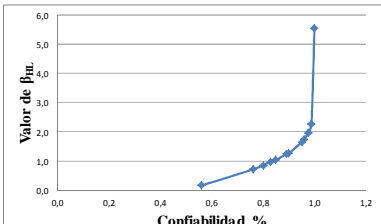
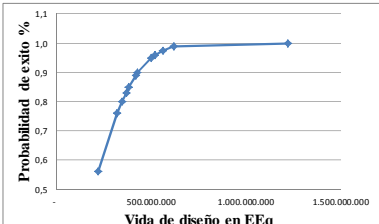
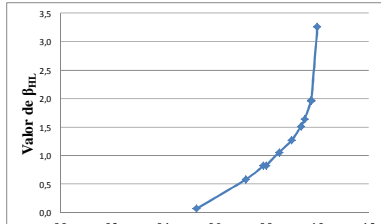
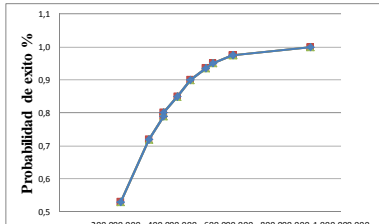
Identificación de celda Factorial	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD RECOMENDADA PARA EL MODELO DE PROGRESIÓN DE GRIETAS ANCHAS ACW PARA CADA AÑO Y NIVEL DEL FACTORIAL	
	Año No 25	
	Distribución	Parámetro
		punto central = 32,3304
		límite superior = 69,0384
STMNA	Uniforme	límite inferior = 6,43876
		límite superior = 22,3744
CTBNM	Exponencial	media = 1,16694
STBNM	Uniforme	límite inferior = 22,3744
		límite superior = 27,5047

Anexo 7. Ejecución del análisis de confiabilidad

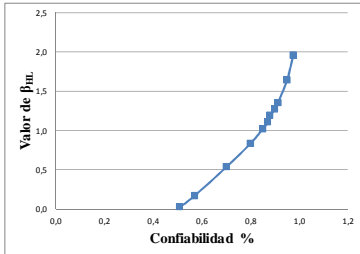
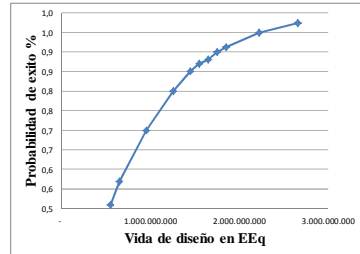
Identificaci ón de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificaci ón de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificaci ón de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificaci ón de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3		
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros	
CTANB	Normal Valor-P 0,00247765	media = 1,54525E7 desviación estándar = 5,48753E6	CTANB	Lognormal Valor-P 0,00748064	media = 6,25407E6 desviación estándar = 1,18763E7	CTANB	Lognormal Valor-P 0,00161479	media = 5,87105E6 desviación estándar = 1,0803E7	CTANB	Lognormal Valor-P 0,168538	media = 4,70301E6 desviación estándar = 1,13363E7	
COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	P_{exit}	Vida de diseño								
	-	1,290	0,900	0,100	6.254.070							
	-	0,321	0,630	0,370	15.254.070							
	-	0,014	0,510	0,490	18.254.070							
	-	0,014	0,510	0,490	18.449.507							
	-	0,041	0,480	0,520	18.762.210							
	-	0,088	0,460	0,540	19.254.070							
	-	0,297	0,380	0,620	21.254.070							
	-	0,852	0,200	0,800	26.700.000							
	-	1,048	0,150	0,850	28.600.000							
COVARIANZA NIVEL 2	-	1,219	0,110	0,890	30.254.070							
	-	1,255	0,100	0,900	30.600.000							
	-	1,645	0,050	0,950	34.360.000							
	-	1,738	0,041	0,959	35.254.070							
	-	1,960	0,025	0,975	37.390.000							
	-	2,154	0,016	0,984	39.254.070							
	-	1,339	0,910	0,090	5.871.050							
	-	0,091	0,460	0,540	18.871.050							
	-	0,201	0,420	0,580	19.871.050							
	-	0,308	0,380	0,620	20.871.050							
COVARIANZA NIVEL 3	-	0,630	0,260	0,740	23.871.050							
	-	0,683	0,250	0,750	24.400.000							
	-	1,018	0,150	0,850	27.500.000							
	-	1,277	0,100	0,900	29.871.050							
	-	1,645	0,050	0,950	33.290.000							
	-	1,708	0,044	0,956	33.871.050							
	-	1,961	0,025	0,975	36.200.000							
	-	2,361	0,009	0,991	39.871.050							
	-	1,495	0,930	0,070	4.703.010							
	-	0,365	0,640	0,360	14.703.010							
COVARIANZA NIVEL 4	-	0,157	0,560	0,440	16.703.010							
	-	0,051	0,480	0,520	18.703.010							
	-	0,365	0,360	0,640	21.703.010							
	-	0,575	0,280	0,720	23.703.010							
	-	0,786	0,220	0,780	25.703.010							
	-	0,849	0,200	0,800	26.300.000							
	-	1,028	0,150	0,850	28.000.000							
	-	1,271	0,100	0,900	30.300.000							
	-	1,314	0,094	0,906	30.703.010							
	-	1,632	0,051	0,949	33.703.010							
COVARIANZA NIVEL 5	-	1,644	0,050	0,950	33.820.000							
	-	1,738	0,041	0,959	34.703.010							
	-	1,845	0,033	0,967	35.703.010							
	-	1,960	0,025	0,975	36.790.000							

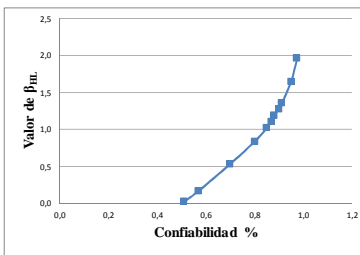
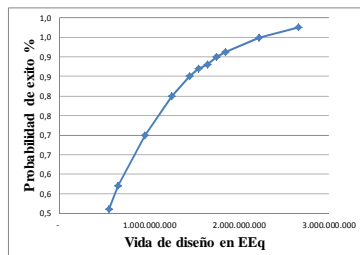
Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros
CTANM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 1,35815E7 desviación estándar = 1,93114E6	CTANM	Lognormal Valor-P 0,0000134668	media = 1,63724E8 desviación estándar = 2,20199E8	CTANM	Lognormal Valor-P 0,0000133656	media = 1,6369E8 desviación estándar = 2,20153E8	CTANM	Lognormal Valor-P 0,0603493	media = 2,0276E8 desviación estándar = 3,27179E8
COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	1,960	0,025	0,975	165.900.000							
	1,928	0,027	0,973	163.724.000							
	1,645	0,050	0,950	147.300.000							
	1,589	0,056	0,944	143.724.000							
	1,270	0,100	0,900	125.300.000							
	1,076	0,140	0,860	113.724.000							
	1,042	0,150	0,850	112.000.000							
	0,833	0,200	0,800	100.000.000							
	0,722	0,240	0,760	93.724.000							
	0,357	0,360	0,640	73.724.000							
	0,165	0,430	0,570	53.724.000							
COVARIANZA NIVEL 2	1,961	0,025	0,975	165.900.000							
	1,929	0,027	0,973	163.690.000							
	1,645	0,050	0,950	147.300.000							
	1,271	0,100	0,900	125.300.000							
	1,248	0,110	0,890	123.690.000							
	1,042	0,150	0,850	112.000.000							
	0,903	0,180	0,820	103.690.000							
	0,833	0,200	0,800	100.000.000							
	0,542	0,290	0,710	83.690.000							
	0,165	0,430	0,570	63.690.000							
	1,201	0,890	0,110	13.095.200							
	COVARIANZA NIVEL 3	1,959	0,025	0,975	215.000.000						
1,811		0,035	0,965	202.760.000							
1,645		0,050	0,950	189.650.000							
1,437		0,075	0,925	172.760.000							
1,274		0,100	0,900	160.000.000							
1,185		0,120	0,880	152.760.000							
1,019		0,150	0,850	140.000.000							
0,824		0,200	0,800	125.000.000							
0,798		0,210	0,790	122.760.000							
0,528		0,300	0,700	102.760.000							
0,239		0,420	0,580	82.760.000							

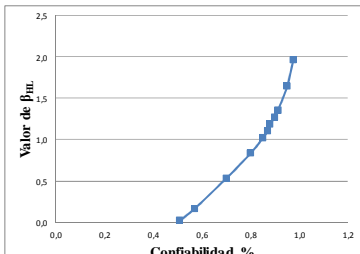
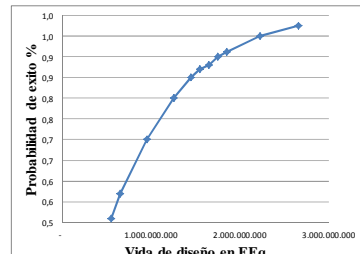
Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros
STANM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 2,39019E7 desviación estándar = 7,32926E6	STANM	Lognormal Valor-P 0,0134186	media = 2,71873E7 desviación estándar = 4,94133E7	STANM	Lognormal Valor-P 0,0134679	media = 2,71801E7 desviación estándar = 4,94001E7	STANM	Lognormal Valor-P 0,153334	media = 3,0085E7 desviación estándar = 6,98079E7
COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	0,059	0,480	0,520	40.180.100							
	0,341	0,370	0,630	47.180.100							
	0,740	0,230	0,770	57.180.100							
	0,852	0,200	0,800	60.000.000							
	1,051	0,150	0,850	65.000.000							
	1,139	0,130	0,870	67.180.100							
	1,272	0,100	0,900	70.500.000							
	1,541	0,062	0,938	77.180.100							
	1,645	0,050	0,950	79.760.000							
1,945	0,026	0,974	87.180.100								
1,959	0,025	0,975	87.550.000								
COVARIANZA NIVEL 2	0,059	0,480	0,520	40.180.100							
	0,340	0,370	0,630	47.180.100							
	0,739	0,230	0,770	57.180.100							
	0,852	0,200	0,800	60.000.000							
	1,052	0,150	0,850	65.000.000							
	1,139	0,130	0,870	67.180.100							
	1,272	0,100	0,900	70.500.000							
	1,541	0,062	0,938	77.180.100							
	1,645	0,050	0,950	79.760.000							
	1,945	0,026	0,974	87.180.100							
1,960	0,025	0,975	87.550.000								
COVARIANZA NIVEL 3	0,090	0,460	0,540	47.180.100							
	0,416	0,340	0,660	57.180.100							
	0,738	0,230	0,770	67.180.100							
	0,859	0,200	0,800	71.000.000							
	1,058	0,150	0,850	77.180.100							
	1,276	0,100	0,900	84.000.000							
	1,378	0,084	0,916	87.180.100							
	1,645	0,050	0,950	95.500.000							
	1,960	0,025	0,975	105.250.000							

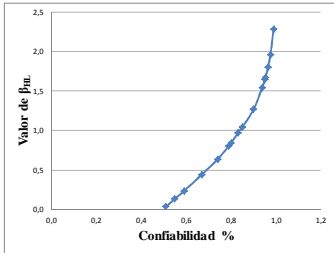
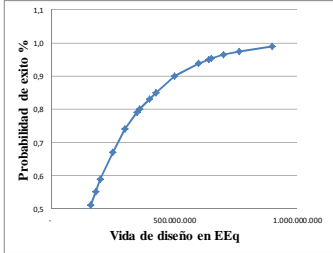
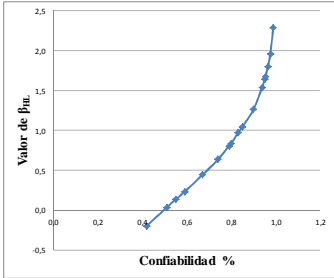
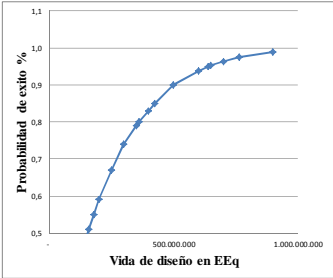
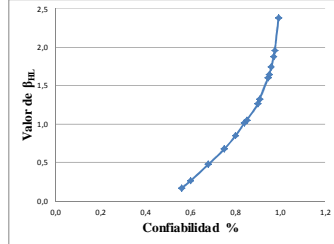
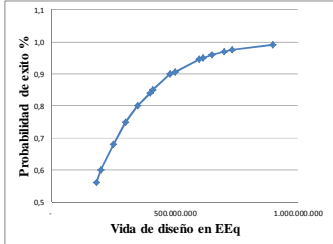
Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros
CTANA	Normal Valor-P 0,716972	media = 4,96958E7 desviación estándar = 2,68226E6	CTANA	Lognormal Valor-P 0,496644	media = 1,21861E9 desviación estándar = 7,19946E8	CTANA	Lognormal Valor-P 0,499862	media = 1,21839E9 desviación estándar = 7,19816E8	CTANA	Lognormal Valor-P 0,0356208	media = 8,91614E8 desviación estándar = 8,28609E8
COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	5,556	0,000	1,000	1.218.610.000							
	2,550	0,012	0,988	618.390.000							
	1,960	0,025	0,975	561.000.000							
	1,739	0,041	0,959	518.390.000							
	1,645	0,050	0,950	499.600.000							
	1,262	0,100	0,900	425.000.000							
	1,226	0,110	0,890	418.390.000							
	1,030	0,150	0,850	380.000.000							
	0,967	0,170	0,830	368.390.000							
	0,847	0,200	0,800	345.000.000							
	0,705	0,240	0,760	318.390.000							
	0,152	0,440	0,560	218.390.000							
COVARIANZA NIVEL 2	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	5,547	0,000	1,000	1.218.390.000							
	2,256	0,012	0,988	618.390.000							
	1,961	0,025	0,975	561.000.000							
	1,740	0,041	0,959	518.390.000							
	1,645	0,050	0,950	499.500.000							
	1,262	0,100	0,900	425.000.000							
	1,226	0,110	0,890	418.390.000							
	1,030	0,150	0,850	380.000.000							
	0,968	0,170	0,830	368.390.000							
	0,848	0,200	0,800	345.000.000							
	0,705	0,240	0,760	318.390.000							
	0,152	0,440	0,560	218.390.000							
COVARIANZA NIVEL 3	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	3,257	0,001	0,999	891.614.000							
	1,975	0,024	0,976	618.390.000							
	1,959	0,025	0,975	614.600.000							
	1,645	0,050	0,950	546.200.000							
	1,515	0,065	0,935	518.390.000							
	1,271	0,100	0,900	465.000.000							
	1,054	0,150	0,850	418.390.000							
	0,828	0,200	0,800	370.000.000							
	0,819	0,210	0,790	368.390.000							
	0,578	0,280	0,720	318.390.000							
	0,066	0,470	0,530	218.390.000							

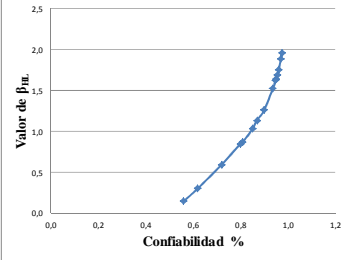
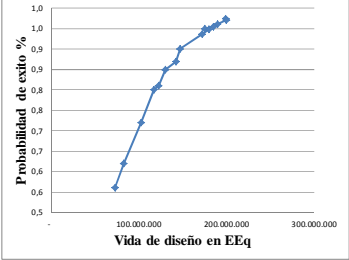
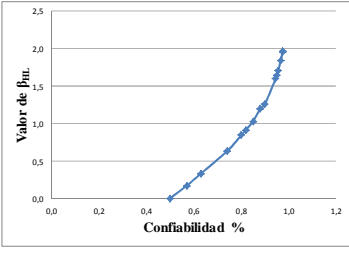
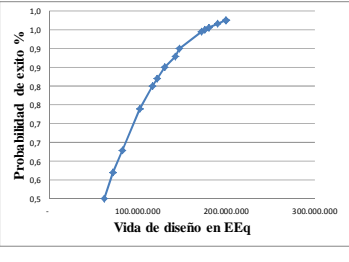
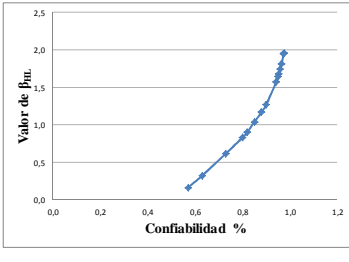
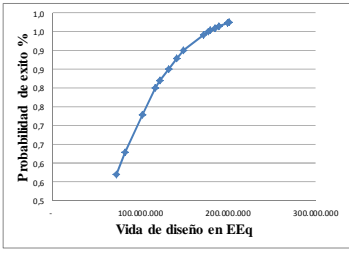
Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros
STANA	Normal Valor-P 0,000820063	media = 3,1886E7 desviación estándar = 8,14732E6	STANA	Lognormal Valor-P 0,0872977	media = 1,85226E9 desviación estándar = 9,0579E9	STANA	Lognormal Valor-P 0,0877472	media = 1,85162E9 desviación estándar = 9,05479E9	STANA	Lognormal Valor-P 0,0876251	media = 1,85179E9 desviación estándar = 9,05563E9

COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño		
	1,960	0,025	0,975	2.659.000.000		
	1,645	0,050	0,950	2.226.000.000		
	1,354	0,088	0,912	1.851.620.000		
	1,273	0,100	0,900	1.750.000.000		
	1,190	0,120	0,880	1.651.620.000		
	1,105	0,130	0,870	1.551.620.000		
	1,018	0,150	0,850	1.450.000.000		
	0,835	0,200	0,800	1.251.620.000		
	0,532	0,300	0,700	951.620.000		
0,166	0,430	0,570	651.620.000			
0,021	0,490	0,510	551.620.000			

COVARIANZA NIVEL 2	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño		
	1,960	0,025	0,975	2.659.000.000		
	1,645	0,050	0,950	2.226.000.000		
	1,355	0,088	0,912	1.851.620.000		
	1,273	0,100	0,900	1.750.000.000		
	1,191	0,120	0,880	1.651.620.000		
	1,106	0,130	0,870	1.551.620.000		
	1,018	0,150	0,850	1.450.000.000		
	0,835	0,200	0,800	1.251.620.000		
	0,532	0,300	0,700	951.620.000		
0,166	0,430	0,570	651.620.000			
0,021	0,490	0,510	551.620.000			

COVARIANZA NIVEL 3	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño		
	1,960	0,025	0,975	2.659.000.000		
	1,645	0,050	0,950	2.227.000.000		
	1,354	0,088	0,912	1.851.620.000		
	1,273	0,100	0,900	1.750.000.000		
	1,190	0,120	0,880	1.651.620.000		
	1,106	0,130	0,870	1.551.620.000		
	1,018	0,150	0,850	1.450.000.000		
	0,835	0,200	0,800	1.251.620.000		
	0,532	0,300	0,700	951.620.000		
0,166	0,430	0,570	651.620.000			
0,021	0,490	0,510	551.620.000			

Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros
CTMNB	Normal Valor-P 0,0000248787	media = 9,79766E6 desviación estándar = 5,17491E6	CTMNB	Lognormal Valor-P 0,137916	media = 1,19781E8 desviación estándar = 2,40383E9	CTMNB	Lognormal Valor-P 0,00261009	media = 1,19743E8 desviación estándar = 2,40309E9	CTMNB	Lognormal Valor-P 0,00741629	media = 1,04533E8 desviación estándar = 2,26175E9
COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	0,034	0,490	0,510	160.000.000							
	0,135	0,450	0,550	180.000.000							
	0,230	0,410	0,590	200.000.000							
	0,443	0,330	0,670	250.000.000							
	0,633	0,260	0,740	300.000.000							
	0,806	0,210	0,790	350.000.000							
	0,840	0,200	0,800	360.000.000							
	0,968	0,170	0,830	400.000.000							
	1,045	0,150	0,850	425.000.000							
	1,266	0,100	0,900	500.000.000							
	1,540	0,062	0,938	600.000.000							
COVARIANZA NIVEL 2	1,645	0,050	0,950	639.700.000							
	1,671	0,047	0,953	650.000.000							
	1,799	0,036	0,964	700.000.000							
	1,960	0,025	0,975	764.000.000							
	2,289	0,011	0,989	900.000.000							
	0,198	0,580	0,420	119.743.000							
	0,034	0,490	0,510	160.000.000							
	0,135	0,450	0,550	180.000.000							
	0,230	0,410	0,590	200.000.000							
	0,443	0,330	0,670	250.000.000							
	0,633	0,260	0,740	300.000.000							
	0,807	0,210	0,790	350.000.000							
COVARIANZA NIVEL 3	0,840	0,200	0,800	360.000.000							
	0,968	0,170	0,830	400.000.000							
	1,046	0,150	0,850	410.000.000							
	1,261	0,100	0,900	480.000.000							
	1,320	0,093	0,907	500.000.000							
	1,604	0,054	0,946	600.000.000							
	1,645	0,050	0,950	615.000.000							
	1,739	0,041	0,959	650.000.000							
	1,872	0,031	0,969	700.000.000							
	1,960	0,025	0,975	734.000.000							
	2,380	0,009	0,991	900.000.000							

Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA ÚTIL CON Pf = 2,0		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 1		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO - ORIGINAL COVARIANZA NIVEL 2		Identificación de celda Factorial	VARIABLE ALEATORIA BÁSICA VIDA DE DISEÑO COVARIANZA NIVEL 3	
	Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros		Tipo de Distribución	Parámetros
STMNM	Normal Valor-P 0,00529752	media = 1,22622E7 desviación estándar = 1,92545E6	STMNM	Lognormal Valor-P 3,27814E-7	media = 1,79806E8 desviación estándar = 3,22315E8	STMNM	Lognormal Valor-P 0,000000848425	media = 1,72344E8 desviación estándar = 3,06401E8	STMNM	Lognormal Valor-P 0,00712625	media = 1,41622E8 desviación estándar = 3,11111E8
COVARIANZA NIVEL 1	β_{HL}	P_f	$P_{\text{éxito}}$	Vida de diseño							
	1,961	0,025	0,975	199.200.000							
	1,884	0,030	0,970	200.000.000							
	1,757	0,040	0,961	190.000.000							
	1,693	0,045	0,955	185.000.000							
	1,645	0,050	0,950	175.500.000							
	1,626	0,052	0,948	179.806.000							
	1,526	0,064	0,937	172.344.000							
	1,262	0,100	0,900	147.000.000							
	1,136	0,130	0,870	142.344.000							
	1,030	0,150	0,850	130.000.000							
	0,869	0,190	0,810	122.344.000							
	0,848	0,200	0,800	117.000.000							
	0,591	0,280	0,720	102.344.000							
	0,302	0,380	0,620	82.344.000							
	0,145	0,440	0,560	72.344.000							
COVARIANZA NIVEL 2	1,971	0,024	0,976	200.000.000							
	1,961	0,025	0,975	199.200.000							
	1,838	0,033	0,967	190.000.000							
	1,710	0,044	0,956	180.344.000							
	1,645	0,050	0,950	175.500.000							
	1,603	0,055	0,946	172.344.000							
	1,262	0,100	0,900	147.000.000							
	1,199	0,120	0,880	142.344.000							
	1,030	0,150	0,850	130.000.000							
	0,918	0,180	0,820	122.344.000							
	0,848	0,200	0,800	117.000.000							
	0,633	0,260	0,740	102.344.000							
	0,336	0,370	0,630	82.344.000							
	0,176	0,430	0,570	72.344.000							
	0,007	0,500	0,500	62.344.000							
COVARIANZA NIVEL 3	1,960	0,025	0,975	201.200.000							
	1,945	0,026	0,974	200.000.000							
	1,813	0,035	0,965	190.000.000							
	1,748	0,040	0,960	185.000.000							
	1,682	0,046	0,954	180.000.000							
	1,645	0,050	0,950	177.200.000							
	1,576	0,058	0,943	172.344.000							
	1,270	0,100	0,900	149.000.000							
	1,171	0,120	0,880	141.622.000							
	1,041	0,150	0,850	132.000.000							
	0,903	0,180	0,820	122.344.000							
	0,834	0,200	0,800	117.000.000							
	0,620	0,270	0,730	102.344.000							
	0,326	0,370	0,630	82.344.000							
	0,166	0,430	0,570	72.344.000							