



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE
LOS PARÁMETROS DE DISEÑO Y SUS
EFECTOS EN EL DESEMPEÑO DE LOS
PAVIMENTOS URBANOS**

MARGARETH BRANDÃO TICIANELLI

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

Profesor Supervisor:
ALONDRA CHAMORRO

ÁLVARO GONZÁLEZ

Santiago de Chile, agosto, 2021

© 2021, Margareth Brandão Ticianelli



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE LOS
PARÁMETROS DE DISEÑO Y SUS EFECTOS EN
EL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS
URBANOS**

MARGARETH BRANDÃO TICIANELLI

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

ALONDRA CHAMORRO 
ÁLVARO GONZÁLEZ 
MARCELO GONZÁLEZ 
ALELÍ OSÓRIO 
CHRISTIAN OBERLI 

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

Santiago de Chile, agosto, 2021

A mi familia, Leandro, Cecília y
João, quienes me apoyaron
incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

En primero quisiera agradecer a mi familia, quienes han apoyado incondicionalmente en toda la trayectoria del magister, por creer en mí, por soportar el peso de la distancia y de la ausencia y aun así tener el valor de darme fuerza para seguir.

En especial, me gustaría agradecer a los profesores supervisores Alondra Chamorro y Álvaro González, agradecerles la oportunidad y la paciencia con mi adaptación al idioma, por compartir sus conocimientos y por el apoyo fundamental en el desarrollo de la tesis.

Agradezco también a todo el equipo y profesores del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, en especial a la Sra Edith Garrido, Sra Pilar, Sr Willian y Sr Claudio, por todo el apoyo, las conversas y por tornar más fácil la vida lejos de la familia. Aprovecho para agradecer a los profesores, investigadores y miembros de la comisión de evaluación y de la dirección de postgrado.

A los compañeros del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción que me recibieron y ayudaron en mi adaptación a la cultura chilena y a la universidad.

También quisiera agradecer al Serviu-RM, en la persona del Ing. Francisco Mora por las informaciones y aclaraciones sobre el proceso de gestión de infraestructura vial urbana, fundamental en la investigación.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes generales	1
1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.3 Propuesta de investigación.....	8
1.4 Metodología de investigación	10
1.5 Organización de la tesis.....	12
2. VARIABILIDAD EN DESEMPEÑO Y DISEÑO DE PAVIMENTO URBANO	13
2.1 Desempeño de pavimentos.....	13
2.2 Serviciabilidad.....	13
2.3 Diseño de pavimentos	16
2.4 Métodos de Diseño.....	20
2.5 Solicitación de tránsito en pavimentos urbanos	36
2.6 Estudios sobre la variabilidad y sus efectos en el desempeño	37
2.7 Propuesta conceptual para metodología de análisis de la variabilidad	43
3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.....	46
3.1 Datos recolectados.....	48
3.2 Correlación entre los parámetros y el desempeño.....	50
4. ANÁLISIS DE CASO DE ESTUDIO.....	61
4.1 Cuantificación de la variabilidad.....	61

4.2	Discusión y análisis de los resultados	72
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1	Conclusiones	77
5.2	Recomendaciones de futuras investigaciones	78
	BIBLIOGRAFÍA.....	80
	A N E X O S.....	90
A.	TOMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	91
B.	SIMULACION Y CUANTIFICACION DEL IMPACTO.....	135

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Variabilidad en los datos de tránsito	40
Tabla 2: Coeficiente de variación para predicción del tránsito, AASHTO93.....	40
Tabla 3: Variabilidad asociada a los parámetros, evaluación de antecedentes	49
Tabla 4: Resumen de los datos disponibles.....	50
Tabla 5: Escenario MSC para análisis de correlación.....	51
Tabla 6: Coeficientes de correlación de Pearson (r) – pavimentos flexibles	51
Tabla 7: Coeficientes de correlación de Pearson (r) – pavimentos rígidos	51
Tabla 8: Coeficientes de correlación de Pearson (r) tránsito – Asfalto.....	52
Tabla 9: Coeficientes de correlación de Pearson (r) tránsito - Hormigón.....	53
Tabla 10: Estructuras de referencia.....	55
Tabla 11: Variabilidad asociada a los parámetros, datos RM Santiago	55
Tabla 12: Variabilidad de la vida remanente de los pavimentos en la RM Santiago.	58
Tabla 13: Escenarios simulación del caso de estudio	59
Tabla 14: Parámetros para simulación – Asfalto	59
Tabla 15: Parámetros para simulación – Hormigón.....	60
Tabla 16: Espesor de las capas superiores h1(mm) y D(mm).....	63
Tabla 17: Número estructural SN (mm).....	64
Tabla 18: Número estructural SN (mm) en función del espesor de la capa h1(mm).	64
Tabla 19: Suelo de subrasante MR_SR(MPa) y kc (MPa/m)	65
Tabla 20: Módulo de ruptura del hormigón Sc (MPa).....	65

Tabla 21: Vida útil en año, pavimentos de asfalto	67
Tabla 22: Vida útil en año, pavimentos de hormigón	68
Tabla 23 – Análisis de variabilidad por nivel de tránsito.....	75
Tabla 24: Espesores por tipo de pavimento	91
Tabla 25: Cantidad de tramos con levantamiento deflectométrico	92
Tabla 26: Composición de la flota de camiones y FEEc.....	109
Tabla 27: Resumen FEEb – Asfalto y Hormigón	110
Tabla 28: Factor de Pista, según clasificación funcional	113
Tabla 29: Variabilidad espesor de capa de rodado.....	117
Tabla 30: Prueba de bondad del ajuste.....	117
Tabla 31: Variabilidad de los módulos elásticos E de las capas de rodado	118
Tabla 32: Prueba de bondad del ajuste – E1 (MPa) E _{PCC} (MPa)	119
Tabla 33: Variabilidad de los módulos resiliente de la subrasante MR _{SR} (MPa). 120	
Tabla 34: Prueba de bondad del ajuste – MR _{SR} (MPa)	120
Tabla 35: Variabilidad de los módulos de reacción de la subrasante – kc (MPa/m) 121	
Tabla 36: Prueba de bondad del ajuste – kc (MPa/m).....	121
Tabla 37: Variabilidad de los módulos de ruptura – Sc (MPa).....	123
Tabla 38: Prueba de bondad del ajuste – Sc (MPa).....	123
Tabla 39: Variabilidad de los módulos de ruptura – Sc (MPa).....	124
Tabla 40: Prueba de bondad del ajuste – S _{NEFF} (mm)	124
Tabla 41: Variabilidad de la vida remanente	125
Tabla 42: Prueba de bondad del ajuste – vida remanente	126

Tabla 43: Análisis de correlación vida remanente RM Santiago – Hormigón.....	128
Tabla 44: Análisis de correlación vida remanente RM Santiago – Asfalto ϵ_t	128
Tabla 45: Análisis de correlación vida remanente RM Santiago – Asfalto ϵ_v	128
Tabla 46: Variabilidad del TMDA y TMDAc	129
Tabla 47: Prueba de bondad del ajuste –TMDA y TMDAc	130
Tabla 48: Variabilidad del Tf.....	131
Tabla 49: Prueba de bondad del ajuste – Tf.....	132
Tabla 50: Variabilidad de EE – Asfalto y Hormigón.....	133
Tabla 51: Prueba de bondad del ajuste – EE.....	133
Tabla 52: Diseño base Asfalto	135
Tabla 53: Diseño base – Hormigón.....	136
Tabla 54: Coeficiente de correlaciones r – Pavimento Asfalto.....	137
Tabla 55: Coeficiente de correlaciones r – Pavimento Hormigón	137
Tabla 56: Correlaciones en Pareja – Pavimento Asfalto.....	137
Tabla 57: Correlaciones en Pareja – Pavimento Hormigón	139
Tabla 58: Variabilidad del desempeño – Pavimento de Asfalto	144
Tabla 59: Variabilidad del desempeño – Pavimento de hormigón	145
Tabla 60: Variabilidad de la vida útil en años – pavimento de asfalto	145
Tabla 61: Variabilidad de la vida útil en años – pavimento de hormigón	146
Tabla 62: Estadística descriptiva del desempeño N_t – Pavimento de asfalto	147
Tabla 63: Estadística descriptiva de la vida útil – Pavimento de asfalto	147
Tabla 64: Estadística descriptiva del desempeño N_t – Pavimento de hormigón	148

Tabla 65: Estadística descriptiva de la vida útil – Pavimento de hormigón	149
Tabla 66: Variabilidad en el diseño – número estructural SN(mm)	149
Tabla 67: Variabilidad en el diseño – espesor de losa D(mm).....	150
Tabla 68: Variabilidad combinada en el diseño – número estructural SN(mm).....	150
Tabla 69: Variabilidad combinada en el diseño – espesor de losa D(mm).....	150

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Diagrama de flujo de la investigación	10
Figura 2: Evolución de deterioros y reducción del PSI en el tiempo, adaptado de AASHTO, (1993) y Pavel, (MINVU, n.d.).....	14
Figura 3.: Factores que influyen en el desempeño de los pavimentos (Tighe et al., 2007).....	15
Figura 4: Representación del comportamiento del pavimento bajo aplicación de carga	19
Figura 5: Confiabilidad y variabilidad según AASHTO93 (Rodríguez Moreno, 2014)	26
Figura 6: Metodología de análisis de la variabilidad	43
Figura 7: Confiabilidad y variabilidad según AASHTO93 (Rodríguez Moreno, 2014)	47
Figura 8: Esquema de la estructura de referencia	54
Figura 9: Variabilidad del suelo, pavimento de asfalto (a) hormigón (b).....	56
Figura 10: Variabilidad del tránsito, TMDAc (c), FEE _{Asfalto} (d) y FEE _{Hormigón} (e)	56
Figura 11: Variabilidad Desempeño real Nt (EE) – Pavimento Asfalto	62
Figura 12: Variabilidad Desempeño real Nt (EE) – Pavimento de Hormigón.....	62
Figura 13: Variabilidad Vida Útil – Pavimento Asfalto	66
Figura 14: Variabilidad Vida Útil – Pavimento de hormigón.....	66
Figura 15: Variabilidad de tránsito y suelo en diseño – Pavimento de hormigón	69

Figura 16: Variabilidad combinada en diseño – Pavimento de hormigón	69
Figura 17: Variabilidad en diseño – Pavimento de asfalto.....	70
Figura 18: Variabilidad en diseño – Pavimento de asfalto.....	71
Figura 19: Flujo de procesamiento de datos	94
Figura 20: Líneas de contorno de deflexiones en el pavimento, Noureldin, (1993)..	95
Figura 21: Espesor de las capas granulares	97
Figura 22: Espesores de las capas	97
Figura 23: Modelo de estructura para retro cálculo	98
Figura 24: Resultados retro cálculo – pavimento asfáltico	99
Figura 25: Resultado retro calculo pavimento hormigón.....	101
Figura 26: Identificación de <i>outliers</i>	102
Figura 27: Estructura del pavimento de hormigón.....	103
Figura 28: Resultados σ_e (MPa) y SR.....	103
Figura 29: Estructura del pavimento asfáltico.....	104
Figura 30: Resultados ϵ_t y N_f	105
Figura 31: Resultados ϵ_v y N_R	105
Figura 32: Distribución % por categoría de vehículo por comuna	106
Figura 33 – TMDA y TMDAc (vehículos por día).....	107
Figura 34: FEE por tipo de bus y nivel de ocupación.	109
Figura 35: Truck Factor – variación.....	111
Figura 36: Ejes Equivalentes.....	115
Figura 37: Histograma FDP para espesor de capa, h_1 (mm) y D (mm).....	117

Figura 38: Ajuste FDP para E_1 (MPa) y E_{PCC} (MPa)	119
Figura 39: Ajuste FDP para MR_{SR} (MPa)	120
Figura 40: Ajuste FDP para k_c (MPa/m)	122
Figura 41: Ajuste FDP para S_c (MPa)	123
Figura 42: Ajuste FDP para SN_{EFF} (mm)	125
Figura 43: Ajuste FDP para vida remanente	127
Figura 44: Ajuste FDP para $TMDA$	130
Figura 45: Ajuste FDP para $TMDAc$	130
Figura 46: Ajuste FDP para T_f – Asfalto y Hormigón.....	132
Figura 47: Ajuste FDP para EE – Asfalto y Hormigón.....	134
Figura 48: Flujo de trabajo – Simulación y Cuantificación – Pavimento de Asfalto	141
Figura 49: Flujo de trabajo – Simulación y Cuantificación – Pavimento de Hormigón	141

RESUMEN

Actualmente, el 55% de la población mundial se concentra en centros urbanos, con perspectivas de crecimiento de hasta un 68% en 2050, sobre todo en países en vías de desarrollo.

El crecimiento de las ciudades crea la necesidad de proveer infraestructura de transporte que permita accesibilidad y movilidad, posibilitando a la población acceder a servicios básicos como salud y educación, mejores condiciones de trabajo y cultura, favoreciendo el desarrollo de actividades comerciales.

Los pavimentos urbanos se desarrollan como parte importante de una red de infraestructura de transporte, para el flujo de transporte de pasajeros y cargas. Su desempeño a lo largo de los años, afecta los tiempos de desplazamiento en la medida que afecta la velocidad del flujo de vehículos y consecuentemente los costos operacionales de los vehículos al transitar por los pavimentos.

El desempeño de un pavimento es afectado en distintas medidas por la variabilidad de los parámetros de diseño, principalmente el tránsito, y la heterogeneidad inherente al ambiente urbano, llevando a una pérdida de desempeño.

Por lo general, los pavimentos urbanos se diseñan utilizando métodos desarrollados originalmente para pavimentos interurbanos sin la necesaria adaptación a la realidad urbana en términos de considerar la variabilidad, principalmente en la composición del tránsito, tipo y peso de los vehículos.

El objetivo de esta investigación es estudiar la variabilidad del tránsito y de los parámetros que representan las características mecánicas de las capas asfálticas y losas de

hormigón y de la capacidad de soporte del suelo de la subrasante, buscando determinar su efecto en el desempeño y vida útil de un pavimento.

Para lograr el objetivo de la investigación, se propuso un método de análisis de variabilidad aplicable a pavimentos urbanos, mediante el cual fue posible evaluar la variabilidad en el ambiente urbano y sus efectos en el desempeño del pavimento.

Los resultados obtenidos demuestran la alta variabilidad de los parámetros en el ambiente urbano, consecuentemente el amplio rango asumido por el desempeño del pavimento en términos de ejes EE equivalentes (COV entre 3 y 304%) y vida útil en años (COV entre 2 y 79%) llevando a la probabilidad de falla de hasta un 55% de los pavimentos.

Palabras Claves: Variabilidad, diseño de pavimento, pavimentos urbanos.

ABSTRACT

Currently, 55% of the world's population is concentrated in urban centers, with growth prospects of up to 68% in 2050, especially in developing countries.

The growth of cities creates the need to provide transportation infrastructure that allows accessibility and mobility, enabling the population to access basic services such as health and education, better working conditions and culture, stimulate the development of commercial activities.

Urban pavements developed as an important part of a transport infrastructure network, for the flow of passenger and cargo transport, their performance over the years affects travel times as it affects the speed of the flow of traffic. Vehicles and consequently the operational costs of the vehicles when traveling on the pavements.

The variability of the design parameters affect the performance of a pavement in different intensity, mainly the traffic, and the heterogeneity inherent to the urban environment can enhance the variability causing loss of performance and service life.

Usually, the design of urban pavements use methods originally developed for interurban pavements without the necessary adaptation to urban reality in terms of considering variability, mainly in the composition of traffic, types and weight of vehicles.

The objective of this research is study the variability of traffic and the input parameters that represent the mechanical characteristics of asphalt layers, concrete slabs, and thicknesses in an urban environment, in order to determine their effects on the pavement performance and service life.

To achieve the research objective, a variability analysis method applicable to urban pavements was proposed, through which it was possible to evaluate variability in the urban environment and its effects on pavement performance.

The results shows the high variability of the parameters in the urban environment, consequently the wide range assumed by the performance of the pavement in terms of equivalent EE axes (COV between 3 and 304%) and useful life in years (COV between 2 and 79 %) contributing to the probability of failure of up to 55% of the pavements.

Keywords: Variability, pavement design, pavement performance, urban pavements.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

1.1.1 Pavimentos en el contexto de infraestructura urbana

La infraestructura tiene la capacidad de ser una herramienta de política efectiva para atender los desequilibrios sociales y territoriales al conectar las zonas rurales y remotas con los grandes centros de producción y consumo, lo cual genera mayores oportunidades económicas para sus residentes y reduce la migración (OCDE, 2017). Los pavimentos urbanos se desarrollan entonces como parte importante de una red de infraestructura de transporte, para el flujo de transporte de pasajeros y cargas en ciudades.

El mal estado de los pavimentos urbanos genera costos elevados de operación vehicular, aumento en los tiempos de viaje en ciudades, problemas de seguridad vial y contaminación, todo lo cual se traduce en externalidades negativas para la sociedad y calidad de vida de la población y altos costos para la economía del país (Chamorro et al., 2015).

Los pavimentos urbanos son una preocupación real para los administradores de infraestructura sobre todo en países en vías de desarrollo, recientemente diversas investigaciones se desarrollaron con la finalidad de crear índices de condición específicos para pavimentos urbanos (Shah et al., 2013; Osorio et al., 2015), evaluar y adaptar herramientas de gestión para el uso en pavimentos urbanos (Osorio, 2015;

Yogesh et al., 2016; Loprencipe et al., 2017), y proponer métodos para la gestión de mantenimiento (Augeri et al., 2019).

Estudios en Chile demuestran que, hay un requerimiento de inversión de U\$60.776 billones para el sector de vialidad urbana en el decenio 2018-2027 (CChC, 2018b) para todo Chile. El estudio evidencia que un 27% de las calles se encuentra en condición irregular o precaria. Para la Región Metropolitana de Santiago la previsión es de U\$13.769 billones siendo un 58% para suplir necesidades en mantenimiento vial, nuevos pavimentos y nuevas calles (CChC, 2018a).

Esta previsión evidencia la necesidad de diseñar estructuras que tengan desempeño estructural satisfactorio y seguro desde un punto de vista funcional, sustentables ambientalmente y viables financieramente.

1.1.2 Conceptos de diseño y desempeño de pavimentos

El diseño de pavimentos es parte del proceso total de gestión del pavimento, que incluye planificación, diseño, construcción y la fase de operación, donde están incluidos el mantenimiento, evaluación y rehabilitación (Huang, 2004).

Los pavimentos son estructuras diseñadas y construidas para operar por largos períodos de tiempo, son expuestas a sollicitaciones de tránsito y clima, como la temperatura y pluviometría, además de la variabilidad presente en el ambiente en que el pavimento está emplazado (Gupta et al., 2014). Esta combinación de factores es capaz de determinar las características de comportamiento del pavimento durante su vida útil.

Un diseño de pavimento robusto debe permitir predicciones precisas y representativas del desempeño del pavimento (Alhasan et al., 2018).

El desempeño de un pavimento es su capacidad relativa para servir adecuadamente al tráfico para el cual fue diseñado durante un período de tiempo (Carey Jr & Irick, 1960). Sin embargo, no existe una sola definición de desempeño descrita en la literatura.

El desempeño de un pavimento tiene relación con un criterio de falla o indicador de deterioro, que es la condición límite que el pavimento debería soportar, respetando sobre todo las consideraciones de diseño.

Los métodos de diseño son clasificados por su forma de concepción, modelos empíricos en base a observación de experimentos en terreno y medición de evolución de la condición de los pavimentos con la aplicación de cargas (Carvalho, 2006), como ejemplo el método de diseño AASHTO 93 desarrollado por el *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) y publicado en la versión de 1993 del *Guide for Design of Pavement Structure*, para pavimentos de asfalto y hormigón, detallado en el ítem 2.4.4.

Los métodos empírico-mecanicistas, relacionan las tensiones y deformaciones de los materiales con ecuaciones empíricas de fatiga desarrolladas mediante experimentos de laboratorio o terreno. Ejemplos de estos métodos son el del *Asphalt Institute* (TAI) para pavimentos flexibles y el *American Concrete Pavement Association* (ACPA) para pavimentos rígidos (Papagiannakis & Masad, 2008).

Todavía existen los métodos de diseño puramente mecanicistas, que han surgido luego del avance computacional que posibilita la implementación de métodos de cálculo avanzados, como el método numérico de los elementos finitos (Lundstrom et al., 2007). El método permite calcular las tensiones y deformaciones de los materiales bajo condiciones climáticas y sollicitación de tránsito para predecir el surgimiento de deterioros, su característica más singular es que no son utilizadas ecuaciones empíricas o funciones de transferencia, sin embargo es necesario un gran esfuerzo en la caracterización experimental de los materiales además del costo involucrado en la necesidad computacional para desarrollar los análisis (Carvalho, 2012).

El método de diseño, asimismo, puede tener un enfoque determinístico o probabilístico. Se considera un diseño determinístico cuando los factores y variables de diseño son deterministas, es decir, adquieren valores fijos esperados. Un modelo probabilístico, como el desarrollado por Mun, (2014), en tanto, espera replicar la variabilidad del desempeño considerando variables de diseño y parámetros estocásticos, los cuales distribuyen acorde a una función de probabilidad esperada con ciertos parámetros conocidos como media y varianza (Huang, 2004).

1.1.3 Variabilidad en el diseño de pavimentos

Existe incertidumbre y variabilidad en el diseño y construcción del pavimento, así como en las cargas de tráfico y factores climáticos que sollicitan el pavimento durante

su vida útil (FHWA, 2006), pudiendo ser la principal causa de diferencias entre el desempeño diseñado y el observado (Valle & Thom, 2016).

La variabilidad es inherente a los materiales (Noureldin et al., 1994), la construcción y a los métodos de diseño (Sebaaly & Bazi, 2005). La incertidumbre está relacionada a la imprecisión en la cuantificación de los parámetros (NCHRP, 2003), principalmente respecto a las proyecciones de tránsito, las cargas por eje y tasa de crecimiento (Kalita & Rajbongshi, 2015).

El concepto de variabilidad y confiabilidad se ha tratado de ir incorporando en los métodos de diseño más tradicionales. Por ejemplo el método empírico AASHTO 93 incorporó el concepto de confiabilidad y variabilidad en su versión publicada en 1986 (AASHTO, 1986). Según Carvalho (2006) pese a que esta modificación representa la incertidumbre de todas las entradas, el concepto de confiabilidad y variabilidad se incorporan de manera muy simple en la ecuación de diseño. Ambos conceptos se incluyen de manera aditiva a la ecuación sin incluir la variabilidad inherente de cada factor y variable. De esta forma, no es posible tener la sensibilidad en relación a cuál de las variables o parámetros es más o menos influyente en el resultado del diseño o desempeño inferidos por los modelos AASHTO93 para asfalto y hormigón.

En su investigación Abaza (2002) plantea la utilización de modelos AASHTO 93 con dos perspectivas distintas durante el ciclo de vida del pavimento, como herramienta para predecir el desempeño del pavimento en un momento futuro dado y con enfoque de diseño para obtener la estructura requerida como número

estructural (SN) para soportar la sollicitación de tránsito, sin embargo no aborda el tema de la variabilidad a lo largo del ciclo de vida.

Otro abordaje del concepto de variabilidad y confiabilidad es el diseño basado en confiabilidad, *Reliability-Based Design* (RBD), en cual la confiabilidad es asociada a una ecuación de diseño y debe garantizar que la probabilidad de falla de un pavimento se encuentre por debajo del nivel objetivo previsto (Kim & Lee, 2002) posibilitando la aplicación probabilista de los métodos de diseño mecanicista-empíricos.

La probabilidad de falla se puede determinar utilizando la Función de Probabilidad (FDP) del desempeño predicho, a través de un valor percentil bajo el cual se ubican cierta cantidad de datos (Theyse & Muthen, 2000), o utilizando los métodos First-Order Reliability Method (FORM) o Second-Order Reliability Method (SORM) (Dilip et al., 2013).

Según diversas investigaciones, la variabilidad en los parámetros de diseño explica la variabilidad en el desempeño de pavimentos, tanto de asfalto (Kalita & Rajbongshi, 2015) (Valle & Thom, 2020) como de hormigón (Vancura, 2013) (Sabih & Tarefder, 2016a), impactando la vida útil de éstos.

1.1.4 Diseño de pavimentos urbanos

Tradicionalmente los métodos de diseño han sido desarrollados para pavimento interurbano y de aeropuerto, a ejemplo de AASHTO 93, *TAI*, PCA – Portland Cement Association y ACPA, sin embargo siguen siendo utilizados en las

actividades de diseño de pavimento urbanos tanto en Chile como en otros países, como México (SEDATU, 2013).

El uso de los métodos de diseño interurbanos para diseño de pavimentos urbanos demanda una adaptación, sobre todo en la determinación de las solicitaciones de tránsito (AASHTO 1993).

Estudios más recientes demuestran diferencias significativas entre los pavimentos urbanos e interurbanos o rurales, las más importantes están relacionadas al tránsito en especial la combinación de distintos modales de transporte en el mismo flujo y la presencia frecuente de intersecciones que causan gran diferencia en las velocidades del flujo (Weijermars, 2007).

1.2 Planteamiento del problema

Los estudios e investigaciones han sido desarrollados en el ámbito de los pavimentos interurbanos logrando cuantificar la variabilidad y el comportamiento de varios parámetros, pero los resultados obtenidos pueden tener diferencias importantes al momento de reflejar el desempeño de pavimentos en ambiente urbano.

Luego de la evaluación de los antecedentes queda claro que la variabilidad existente entre el diseño y desempeños de los pavimentos es debida parte al tránsito pero también a los materiales, principales diferencias entre los ambientes interurbanos y urbanos.

No conocer la variabilidad de los parámetros de diseño en el ambiente urbano causado por la falta de análisis sistemático de los datos disponibles en la

construcción de los pavimentos, para comprender la variabilidad del desempeño de los pavimentos urbanos en servicio, impide su correcta consideración y por consecuencia podría llevar a sobre o sub estimar el diseño de los pavimentos.

De este escenario surge la oportunidad de investigar y cuantificar la variabilidad en el ambiente urbano, descubrir cuáles son sus efectos en el desempeño de los pavimentos urbanos y la mejor forma de considerar la variabilidad en el diseño de los pavimentos.

1.3 Propuesta de investigación

1.3.1 Hipótesis

La variabilidad del desempeño de pavimentos urbanos se debe principalmente a la variabilidad del tránsito urbano, a la incertidumbre en la estimación de la capacidad de soporte de los suelos de fundación y a la precisión con que se caracteriza el módulo elástico de las capas que componen la estructura.

1.3.2 Objetivo general y específico

Objetivo general:

Estudiar la variabilidad de los parámetros de diseño y sus efectos en el desempeño de pavimentos urbanos.

Objetivo específico 1: Identificar qué parámetros son más relevantes en explicar la variabilidad de desempeño de los pavimentos urbanos.

Objetivo específico 2: Establecer la variabilidad de los parámetros y sus efectos en el desempeño de pavimentos urbanos.

1.3.3 Alcance

La investigación propuesta se desarrolló con un enfoque en pavimentos de asfalto y concreto en el entorno urbano, sin embargo, se adoptan supuestos, condiciones y límites para definir el alcance de la investigación.

- a) Espesores de las capas de asfalto y hormigón obtenidos a través de testigos extraídos de pavimentos en servicio.
- b) Las capas de base, sub base y subrasante consideran materiales granulares y suelo sin adiciones o estabilización.
- c) Los valores de peso por eje de los vehículos comerciales, son considerados en base a antecedentes disponibles en la literatura, como la Encuesta Origen-Destino (EOD), normas técnicas, y leyes vigentes. No se han realizados pesajes de vehículos.
- d) Las simulaciones se realizaron utilizando el método empírico AASHTO 93 para pavimento de asfalto y hormigón, por la posibilidad en adecuarlo a la herramienta de simulación y adecuado a la disponibilidad de datos.

1.4 Metodología de investigación

La metodología de investigación está organizada en dos etapas para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos, acorde como se presenta en la Figura 1.

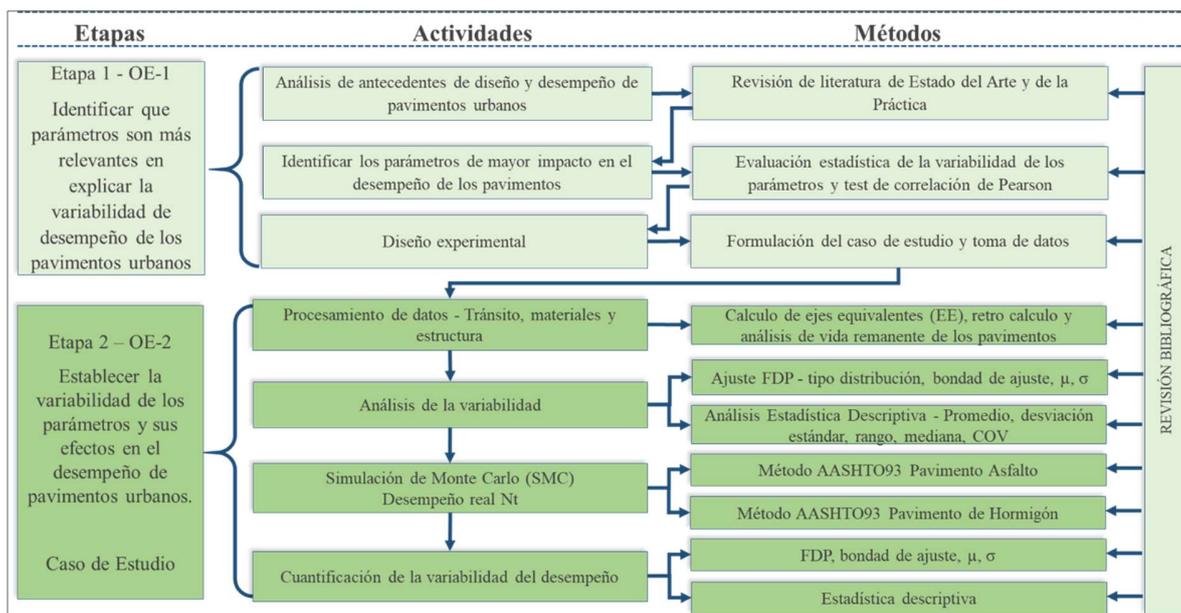


Figura 1: Diagrama de flujo de la investigación

Etapa 1 – Objetivo Específico 1 – Identificar qué parámetros explican la variabilidad en el desempeño de los pavimentos urbanos

- El análisis de antecedentes incluye revisión bibliográfica de estado del arte y de la práctica en tema de diseño y desempeño de los pavimentos, se busca conocer la aplicabilidad y limitaciones de los modelos existentes a los pavimentos urbanos.
- Identificar en la literatura los parámetros y su variabilidad que usualmente determinan el desempeño del pavimento y a través de la y análisis de

correlación entre parámetros y desempeño (Llopis-Castelló et al., 2020), así como identificar el efecto, positivo o negativo, de los parámetros.

- La actividad de diseño experimental consiste en la formulación de un caso de estudio que permita evaluar un la variabilidad y sus efectos en el desempeño de los pavimentos urbanos, incluyendo la actividad de búsqueda por informaciones necesarias y datos disponibles en el ámbito del proyecto FONDEF D09I1018.

Etapa 2 – Objetivo Específico 2 – Establecer la variabilidad de los parámetros y sus efectos directos en el desempeño

En esta etapa se realizan las siguientes actividades:

- Procesamiento de los datos referentes al tránsito, materiales y estructuras de los pavimentos, inclusive estudio de tránsito y cálculos de ejes equivalentes, retro cálculo para determinación de los módulos elásticos y resilientes de los materiales que componen la estructura, análisis de vida remanente de los pavimentos existentes utilizando método empírico mecanicista.
- Análisis de la variabilidad que se realiza a partir de la determinación de la función de densidad de probabilidad (Tighe, 2001; Whiteley et al., 2005), estadística descriptiva en términos de coeficiente de variación (COV).
- Simulaciones de Monte Carlo (SMC) para simular la variabilidad en el desempeño de los pavimentos cuando consideradas las variabilidades encontradas en los parámetros en el ambiente urbano, con soporte del software Minitab Workspace™ versión 1.1.1.0 utilizando el método AASHTO93 para pavimentos de asfalto y hormigón.
- Cuantificación de la variabilidad del desempeño del pavimento través de la comparación entre los resultados obtenidos de la simulación a la situación de referencia según las recomendaciones AASHTO93, con soporte del software Minitab Statistical versión 2020.

1.5 Organización de la tesis

El documento de tesis está dividido en cinco capítulos, el primero es la introducción que incluye la presentación del tema abordado por la investigación, los antecedentes generales, planteamiento de problema y formulación de la investigación propuesta.

En el capítulo dos se detalla más profundamente el estado del arte en el tema de la variabilidad en el diseño y desempeño de los pavimentos en el contexto urbano.

El capítulo tres presenta el diseño experimental y la metodología para desarrollo de la investigación.

En el cuarto capítulo son presentados los resultados obtenidos de los estudios desarrollados, los análisis y discusión.

El último capítulo presenta las conclusiones obtenidas del estudio, el aporte científico y práctico de la tesis las recomendaciones para futuros desarrollos e investigaciones.

2. VARIABILIDAD EN DESEMPEÑO Y DISEÑO DE PAVIMENTO URBANO

2.1 Desempeño de pavimentos

El desempeño de un pavimento es su capacidad relativa para servir adecuadamente al tráfico para el cual fue diseñado durante un período de tiempo (Carey Jr & Irick, 1960). Sin embargo, no existe una sola definición de desempeño descrita en la literatura.

Según AASHTO (1993) el desempeño de un pavimento incluye el desempeño estructural, relativo a la condición física u ocurrencia de deterioros en pavimento, desempeño funcional relativo al confort del usuario al transitar por el pavimento y desempeño de seguridad relativo a la resistencia al deslizamiento.

El desempeño de un pavimento en función del tiempo puede ser descrito mediante el uso de modelos de comportamiento o desempeño, agregando parámetros externos como sollicitación de tránsito y clima, como también parámetros inherentes a la estructura del pavimento y propiedades de los materiales (Gupta et al., 2014).

2.2 Serviciabilidad

El concepto de serviciabilidad fue desarrollado por Carey Jr y Irick (1960) con la finalidad de incluir en la ecuación AASHO61 el parámetro de desempeño. Según AASHTO (1993) serviciabilidad es la capacidad de una sección específica de pavimento para servir al tráfico en su condición actual, representada en la ecuación por el PSI que puede ser obtenido través de la combinación de deterioros

superficiales presentes en la superficie del pavimento o por correlación con el IRI – *International Roughness Index* que representa la irregularidad o rugosidad longitudinal del pavimento (Huang, 2004).

Los pavimentos se deterioran con el tiempo y con la exposición a solicitaciones de clima y tránsito, el cambio de condición puede ser fácilmente notado por el surgimiento de deterioros en el pavimento. Ejemplos del deterioro son el ahuellamiento, que son depresiones en la sección transversal en la huella de rodado debido a la acción del tránsito visto en la Figura 2(a); agrietamiento, que se caracteriza por la apertura de grietas en la superficie de los pavimentos presentado en las Figuras 2 (b) y (c); rugosidad longitudinal, medida en términos del IRI. La pérdida de serviciabilidad en términos de la reducción del PSI en el tiempo es la combinación de estos deterioros, proceso representado en la Figura 2.

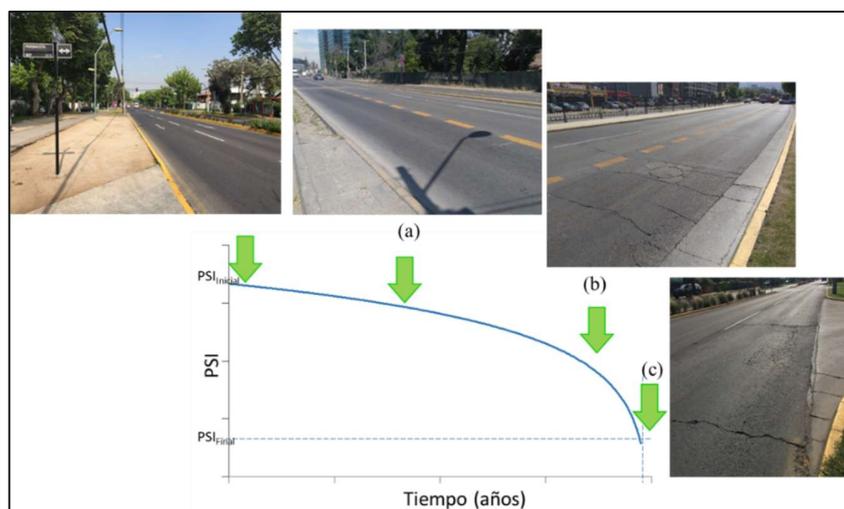


Figura 2: Evolución de deterioros y reducción del PSI en el tiempo, adaptado de AASHTO, (1993) y Pavel, (MINVU, n.d.)

Comprender el desempeño de los pavimentos requiere conocer la interdependencia entre el diseño de la estructura, las solicitaciones de tránsito y clima, las condiciones de construcción y mantenimiento, acorde a lo presentado en la Figura 3.

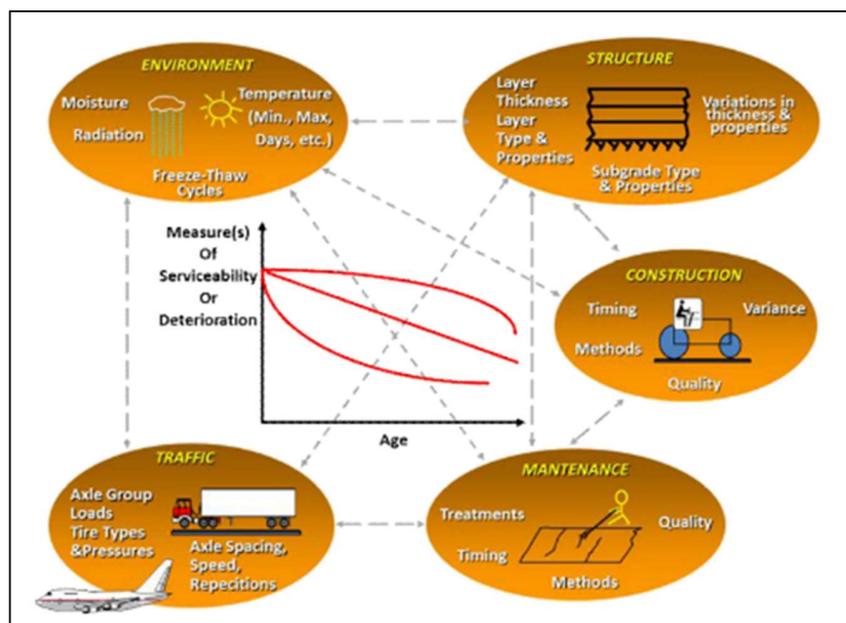


Figura 3.: Factores que influyen en el desempeño de los pavimentos (Tighe et al., 2007).

De los diversos factores los que más influyen en el pérdida de serviciabilidad del pavimento son el tránsito, la edad del pavimento y el ambiente (AASHTO, 1993) debiéndose considerar adecuadamente en los métodos de diseño de los pavimento. La gran dificultad a superar en el diseño de pavimento, independiente del modelo que se pretende utilizar, es la característica heterogénea de los materiales utilizados y asumidos como homogéneo, sumada a la incertidumbre en las proyecciones del tránsito para un largo periodo de tiempo.

2.3 Diseño de pavimentos

Los métodos de diseño son clasificados por su forma de concepción, modelos empíricos en base a observación de experimentos en terreno y medición de evolución de la condición de los pavimentos con la aplicación de cargas, o modelos empíricos-mecanicistas, relacionan las tensiones y deformaciones de los materiales a ecuaciones empíricas de fatiga desarrollada en experimentos en laboratorio o en terreno (Carvalho, 2006).

Los modelos empíricos, a ejemplo del AASHTO 93, son relativamente más simples en su aplicación y también demandan una cantidad de información menor en comparación a los modelos mecanicista-empíricos tornándolos más interesantes a las entidades y gobiernos a cargo de la administración de grandes redes de pavimento bajo limitaciones presupuestarias para auscultación regular de la condición del pavimento.

En su investigación Abaza, (2002) plantea la utilización del modelo AASHTO93 con dos abordajes distintos durante el ciclo de vida del pavimento, como herramienta para predecir el desempeño del pavimento en un momento futuro dado y con enfoque de diseño para obtener estructural requerida como número estructural (SN) para soportar la sollicitación de tránsito, pudiendo fácilmente extender el análisis para los pavimentos de hormigón. Sin embargo en esta oportunidad no ha evaluado el efecto de la variabilidad.

Además de los métodos de diseño, hay el enfoque del diseño: determinista y probabilístico. En el método determinista, cada factor de diseño tiene un valor fijo

basado en el factor de seguridad asignado por el diseñador. Un enfoque más realista es el método probabilístico, en el que a cada factor de diseño se le asigna una media y una varianza (Huang, 2004).

Mun, (2014) desarrolla una herramienta de probabilística para determinar los parámetros para la función de desempeño del pavimento según el modelo AASHTO93, utilizando método de los momentos y Simulación de Monte Carlo, y concluye que la capacidad estructural es la variable que afecta más significativamente el desempeño.

2.3.1 Métodos empíricos

El modelo empírico, basado en observación de experimento en campo o por ensayos acelerados de carga, para diseño de pavimentos flexible fuera desarrollado y ampliamente utilizado en principios de los años 1900, inclusive por el Departamento de Carreteras de California en 1929. El espesor de los pavimentos está relacionado con el CBR (Huang, 2004).

El método de diseño CBR fue estudiado ampliamente por el Cuerpo de Ingenieros de EEUU durante la Segunda Guerra Mundial y se convirtió en un método muy popular después de la guerra. La desventaja de un método empírico es que sólo se puede aplicar a un conjunto dado de condiciones ambientales, materiales y de carga.

Si se cambian estas condiciones, el diseño ya no es válido, (Carvalho, 2006)

De los modelos empíricos el AASHTO para pavimentos flexibles y rígidos el más conocido y ampliamente utilizado, desarrollado través de regresión en base a las

experiencias obtenidas en pista de prueba *AASHO Road Test* administrada por la *American Association of State Highway Officials*, en inicio de los años 1960 en *Illinois*, EE.UU.

A partir de los datos del experimento en la pista de prueba en 1961 el Comité de Diseño del AASHO ha publicado el primera guía de diseño en base a los primeros resultados del teste, en 1972 el actualmente nombrado ASSHTO Comité de Diseño publicó el *AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structure* 1972 (Yoder & Witczak, 1975), y las revisiones se publicaron en 1981, 1983 y 1986, el 1993 se publicó el *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure* y en 1998 el volumen suplementario para pavimentos rígidos, (Papagiannakis & Masad, 2008).

2.3.2 Método empírico-mecanicista

Los modelos mecanicista-empíricos se basan en la mecánica de los materiales que componen la estructura del pavimento, cómo se relacionan con la aplicación de la carga de una rueda, cómo se comportan en términos de tensión y/o deformación, conforme con la Figura 4. Estos valores se utilizan para predecir, través el uso de ecuaciones empíricas de desempeño, el límite de falla del pavimento (Huang, 2004).

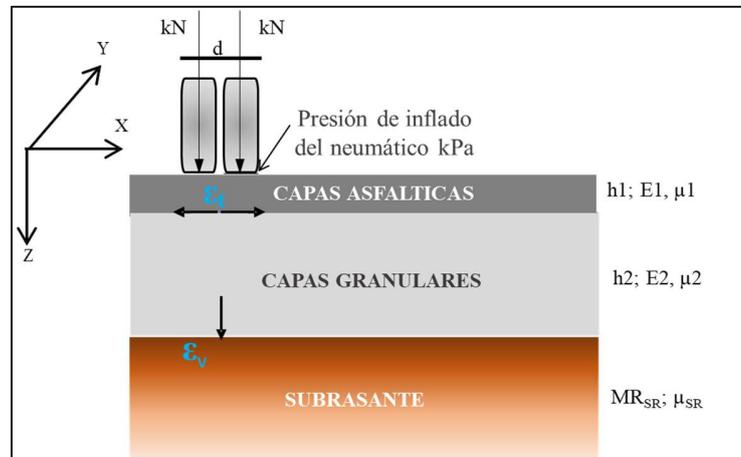


Figura 4: Representación del comportamiento del pavimento bajo aplicación de carga

2.3.3 Criterio de falla mecanicista para pavimentos asfálticos

Los modelos mecanicista-empíricos utilizan usualmente dos criterios de falla, por fatiga y por deformación permanente.

La falla por fatiga tiene origen en las tensiones de tracción ϵ_t que ocurren en la base de la capa de material asfáltico producto de la aplicación de carga de tránsito. La falla por deformación permanente de la subrasante es causada por el acumulo de deformación vertical residual ϵ_v después de la aplicación de una carga de compresión pavimento.

2.4 Métodos de Diseño

Esta sección presenta algunos ejemplos de los métodos de diseño utilizados actualmente, tanto modelos empírico como mecanicista-empíricos.

2.4.1 Método *The Asphalt Institute (TAI)*

Este método es desarrollado para pavimentos asfálticos en base a dos criterios de falla, por fatiga de la capa asfáltica representada por el agrietamiento en 10% del área de la huella de rodado, y la deformación permanente de la subrasante representados por el ahuellamiento de 12,5mm.

Utiliza las ecuaciones 1 y 2 para calcular los ejes equivalentes hasta la falla (Papagiannakis & Masad, 2008).

$$N_f = 0.0795 \varepsilon_t^{-3.291} E^{-0.854} \quad (\text{ec. 1})$$

N_f – número de Ejes Equivalentes límite fatiga

ε_t – deformación de tracción actuante

E – módulo elástico de la mezcla asfáltica en psi

$$N_r = 1.365 \cdot 10^{-9} \varepsilon_v^{-4.477} \quad (\text{ec. 2})$$

N_r – número de Ejes Equivalentes límite de falla por deformación permanente

ε_v – deformación vertical de compresión actuante en el top de la subrasante

2.4.2 Método *Portland Cement Association* PCA 1984 para pavimentos de hormigón

El método PCA1984 fueron desarrolladas por Packard y Tayabji en base al número de repeticiones de ejes equivalentes de carga antes de que el pavimento falle por fatiga por flexión, para un determinado SR dado, según el conjunto de ecuaciones 3 hasta 5 (Delatte, 2008).

$$SR = \frac{\sigma_e}{MOR} \quad (\text{ec. 3})$$

Para $SR \geq 0,55$

$$\log N_f = 11,737 - 12,077 * (SR) \quad (\text{ec. 4})$$

Para $0,45 < SR < 0,55$

$$N_f = \left(\frac{4,2577}{SR - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (\text{ec. 5})$$

SR= Stress Ratio

σ_e = tensión el borde de la losa

MOR = Modulo de ruptura o resistencia la flexión del hormigón

N_f = Número de repeticiones del Eje Estándar hasta que el pavimento falle fatiga

Para el $SR < 0,45$ el N_f es ilimitado

2.4.3 Método American Concrete Pavement Association ACPA para pavimentos de hormigón

El nuevo Método de fatiga de pavimento de hormigón que desarrolló el ACPA para el programa informático de diseño de pavimento de hormigón *StreetPave* incluye mejoras en el Método PCA1984 siendo la principal la inclusión del parámetro de confiabilidad P. manteniendo el SR y el daño acumulado como se definen anteriormente. La expresión de fatiga revisada la ecuación 6 (Delatte, 2008):

$$\log N_f = \left(\frac{-SR^{-10.24} * \log(1-P)}{0,0112} \right)^{0,217} \quad (\text{ec. 6})$$

SR= Stress Ratio

N_f = Número de repeticiones del Eje Estándar hasta que el pavimento falle fatiga

P=probabilidad de falla

2.4.4 Método AASHTO 93

El método de diseño AASHTO tuvo inicio a partir de las experiencias obtenidas en pista de prueba *AASHTO Road Test* administrada por la *American Association of State Highway Officials*, entre el final de los años 1950 e inicio de los años 1960 en Illinois, EE.UU, (Huang, 2004).

En 1961 el Comité de Diseño del AASHTO ha publicado el primera guía de diseño en base a los primeros resultados del teste, en 1972 el actualmente nombrado ASSHTO Comité de Diseño ha publicado el *AASHTO Interim Guide for Design of*

Pavement Structure 1972, y las revisiones se publicaron en 1981, 1983 y 1986 (Papagiannakis & Masad, 2008).

La versión publicada en 1986 introdujo cambios importantes en términos de confiabilidad y variabilidad través de la introducción del Factor de Confiabilidad (FR), que está asociado a un nivel de confiabilidad asumido para el diseño (R) correspondiente a la desviación estándar asociada a la distribución normal un valor Z_R y la desviación combinada (S_0) asociado a la variabilidad de los datos de entrada, sobre todo al tránsito estimado para el período de diseño W_{18} y la caracterización de la subrasante (Rodríguez Moreno, 2014).

La versión publicada el 1993 del *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure* presenta la versión actual de la ecuación de diseño para pavimentos flexibles y para diseño empírico de pavimentos rígidos. En 1998 se publicó el volumen suplementario conteniendo una nueva versión para pavimentos rígidos, en el cual incluye consideraciones acerca de las tenciones actuantes en los bordes y esquinas de la losa, los efectos de la temperatura y verificación de la condición de escalonamiento en las juntas.

Las ecuaciones y principales conceptos y parámetros del método ASSHTO93 son presentados en la secuencia.

2.4.4.1 Ecuaciones de diseño

Pavimento flexible

$$\log(W_{18}) = Z_R * S_0 + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log(\Delta PSI)/(4,2-1,5)}{0,4+109/(SN+1)} + 2,32 * \log(MR) - 8,07 \quad (\text{ec. 7})$$

$$SN = h_1 * a_1 + h_2 * a_2 * m_2 + h_3 * a_3 * m_3 \quad (\text{ec. 8})$$

W_{18} : Tránsito acumulado para el período de diseño

MR: Modulo Resiliente de la Subrasante

Z_R : Coeficiente estadístico relativo confiabilidad

S_0 : Desviación estándar combinada

PSI_i : *Present Serviceability Index* Inicial

PSI_t : *Present Serviceability Index* Terminal

SN: *Structural Number* (Numero estructural)

$\Delta PSI = PSI_{inicial} - PSI_{terminal}$

a_i : coeficiente estructural de la capa i

h_i : espesor de la capa i

m_i : coeficiente de drenaje de la capa granular i

Pavimento de Hormigón

$$\log(W_{18}) = Z_R * S_0 + 7,35 * \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log[\Delta PSI / (4,5 - 1,5)]}{1 + 1624 \times 10^7 / (D + 1)^{8,46}} +$$

$$(4,22 - 0,32 * PSI_t) * \log \left\{ \frac{S_c D_c (D^{0,75} - 1132)}{215,63 J [D^{0,75} - 1,42 / (E_c / k)^{0,25}]} \right\} \quad (\text{ec. 9})$$

W_{18} : Tránsito acumulado para el período de diseño

Z_R : Coeficiente estadístico relativo confiabilidad

S_0 : Desviación Estándar Combinada

k : Modulo de Reacción del suelo (pci)

$\Delta PSI = PSI_{\text{inicial}} - PSI_{\text{terminal}}$

D : Espesor de la losa

J : coeficiente de transferencia de carga

C_d : coeficiente de drenaje de capas granulares

S_c : Modulo de ruptura del hormigón¹

E_c : Modulo elástico del hormigón

¹ El módulo de ruptura S_c es también encontrado en la literatura como Resistencia a la Flexo tracción, medido través de ensayo de tracción en vigas (Delatte, 2008).

2.4.4.2 Factor de confiabilidad ZR y Desviación combinada S0

La confiabilidad R (ec. 10) es definida en la guía AASHTO 93 como la probabilidad de que las solicitaciones de tránsito aplicadas sobre el pavimento no superen las solicitaciones previstas que los pavimentos pueden soportar hasta alcanzar el nivel mínimo de servicio propuesto en el diseño representado por el P_f en la Figura 5.

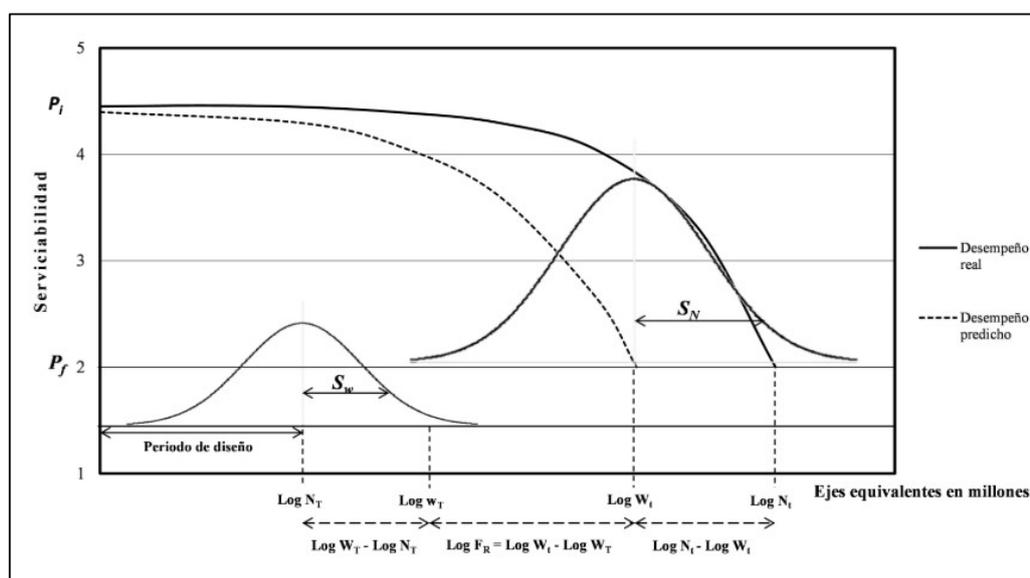


Figura 5: Confiabilidad y variabilidad según AASHTO93 (Rodríguez Moreno, 2014)

De la Figura 5 se definen los conceptos de solicitación de tránsito y desempeño según el método AASHTO, (1993) utilizados para la definición de confiabilidad y variabilidad.

Log W_T : Predicción de tránsito en período de diseño

LogW_t: Desempeño predicho del pavimento, en términos de número de ejes equivalentes.

LogN_T: Tránsito real en el período de diseño

LogN_t: Desempeño real del pavimento, en términos de número de ejes equivalentes hasta alcanzar el valor de PSI_t

$$R = (\log N_T - \log N_t) > 0 \quad (\text{ec. 10})$$

El factor Z_R es la desviación estándar, en la escala Z bajo la curva de la distribución normal, que para un dado valor de confiabilidad R representa el área en la cola de la curva ubicado entre el $-\infty$ y Z_R, en la cual no se atienden las condiciones de diseño (AASHTO, 1993).

La desviación estándar combinada S₀ es raíz de la suma de las varianzas S_w² y S_N² (ec. 11) (Noureldin et al., 1994), demostrado en la Figura 5, y representan respectivamente el error en la predicción del tránsito que debería pasar por el pavimento, y en la predicción del desempeño del pavimento (Rodríguez Moreno, 2014).

$$S_0 = \sqrt{S_W^2 + S_N^2} \quad (\text{ec. 11})$$

2.4.4.3 Tránsito

La sollicitación de tránsito en los métodos de diseño para pavimentos flexible y rígido es basada en la carga equivalentes al eje estándar de 18 kip², *ESAL – Equivalent Single Axel Load*, que consiste en convertir la carga de los vehículos que transitan por el pavimento en una única carga estándar, el proceso es detallado por el conjunto de ecuaciones en la secuencia (Huang, 2004).

$$ESAL = AADT * T * T_f * G * D * L * 365 \quad (\text{ec. 12})$$

AADT: *Annual Average Daily Traffic* o TMDA: Tránsito Diario Medio Anual (vpd)

T: % de camiones

T_f: Truck factor (ec. 13)

G: Factor de crecimiento (ec. 20)

D: % de tránsito por sentido da vía

L: % de camiones en la pista de diseño

$$T_f = \sum_i (p_i * EALF_i) * A \quad (\text{ec. 13})$$

EALF: *Equivalent Axel Load Factor* para el grupo de eje *i* (ver ec14)

p_i: % de camiones en el grupo *i*

$$EALF = \frac{W_{tx}}{W_{18}} \quad (\text{ec. 14})$$

² kip – *kilo pound* – unidad de medida de fuerza, 1kip = 4,45kN, luego 18kip equivale a 80kN

Pavimento flexible

$$\text{Log} \left(\frac{W_{tx}}{W_{18}} \right) = 4,79 \log(18 + 1) - 4,79 \log(L_x + L_2) + 4,33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (\text{ec. 15})$$

$$G_t = \log \frac{4,2 - p_t}{4,2 - 1,5} \quad (\text{ec. 8a}) \quad \beta_x = 0,4 + \frac{0,081(L_x + L_2)^{3,23}}{(SN+1)^{5,19} L_2^{3,23}} \quad (\text{ec. 16})$$

Pavimento rígido

$$\text{Log} \left(\frac{W_{tx}}{W_{18}} \right) = 4,62 \log(18 + 1) - 4,62 \log(L_x + L_2) + 3,28 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (\text{ec. 17})$$

$$G_t = \log \frac{4,5 - p_t}{4,5 - 1,5} \quad (\text{ec. 18})$$

$$\beta_x = 1 + \frac{3,63(L_x + L_2)^{5,20}}{(D+1)^{8,46} L_2^{3,52}} \quad (\text{ec. 19})$$

L_x : Peso eje x (simple, doble o triple) en kips.

L_2 : Código del tipo de eje (1,2 y 3 respectivamente)

p_t : PSI_{terminal}

SN: Número estructural del pavimento asfáltico (pul.)

2.4.4.4 Tasa de crecimiento de tránsito r (%)

Representa el crecimiento de los volúmenes de tránsito a lo largo de los años, pudiendo incluso variar para cada clase de vehículo. Se utiliza para calcular el factor

de crecimiento del tránsito G de la ecuación indicada por AASHTO86 (Huang, 2004).

$$G = \frac{(1+r)^Y - 1}{r} \quad (\text{ec. 20})$$

r : tasa de crecimiento %

Y : período en años

2.4.5 Método AASHTO MEPDG

El más reciente desarrollo el Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) fue desarrollado través un proyecto de investigación financiado por el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) el NCHRP Project 1-37A y fue publicado el abril de 2004 (Li et al., 2011), (AASHTO, 2008).

El enfoque de este método implementa las funciones de daño acumulado por la sollicitación de tránsito hasta el límite de falla del pavimento, para el pavimento flexible se detalla el mecanismo de falla por fatiga del material asfáltico y por ahuellamiento causado por las deformaciones plásticas y elásticas. Para los pavimentos de hormigón son detallados los cálculos para los factores de daño para falla por agrietamiento.

Pavimento flexible

La fatiga del material asfáltico es descrita por N_f de acuerdo con las ecuaciones a continuación, (Papagiannakis & Masad, 2008).

$$N_f = 0,00432 k_1' C \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1,281} \quad (\text{ec. 21})$$

ϵ : deformación por tracción en la capa de hormigón asfáltico

E: Módulo resiliente de la capa asfáltica (psi).

C y k'_1 son constantes de calibración.

$$C = 10^M \quad (\text{ec. 22})$$

$$M = 4,84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right) \quad (\text{ec. 23})$$

V_b : volumen de bitumen en la mezcla

V_a : volumen de aire en la mezcla expresado en porcentaje del volumen total.

El coeficiente k'_1 es una función del espesor de la capa de hormigón asfáltico h_{ac} (pulgadas) y se define de manera diferente para la acumulación de grietas de abajo hacia arriba (ec. 24) y grietas longitudinales de arriba a abajo (ec 25).

$$k'_1 = \frac{1}{0,00039 \frac{0,003602}{1 + e^{11,02 + 3,49 h_{ac}}}} \quad (\text{ec. 24})$$

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{15,676 + ,8186 ac}}} \quad (\text{ec. 25})$$

El daño por fatiga (FD) se acumula estimando el agrietamiento por separado para las grietas de abajo hacia arriba y de arriba a abajo, según la hipótesis del Miner, expresada por la siguiente ecuación.

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m}}{N_{i,j,k,l,m}} 100 \quad (\text{ec. 26})$$

$n_{i,j,k,...}$ = número aplicaciones de carga en las condiciones i, j, k, l, m, n.

$N_{i,j,k,...}$ = número aplicaciones de carga hasta la falla por fatiga en las condiciones i, j, k, l, m, n.

i = representa el cambio mensual en el módulo de base y sub-base debido a las variaciones de humedad y de la mezcla asfáltica debido a variación de temperatura.

j = representa los cambios horarios en el módulo de la mezcla asfáltica.

k = tipo de eje.

l = nivel de carga para cada tipo de eje.

m = trayectoria de la rueda, suponiendo que la desviación lateral distribuida normalmente.

El área de agrietamiento por fatiga FC para grietas de abajo hacia arriba (porcentaje del área total de la pista) se calcula por la siguiente ecuación.

$$FC = \frac{100}{1 + e^{c'_2(-2 + \log FD)}} \quad (\text{ec. 27})$$

FD : daño por fatiga por agrietamiento de bajo hacia arriba, calculado por la ec 26.

$$c'_2 = -2,40874 - 39,748(1 + h_{ac})^{-2,856} \quad (\text{ec. 28})$$

El agrietamiento por fatiga FC para grietas de arriba hacia abajo (extensión de grieta) se calcula por la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{10560}{1 + e^{(7,0 - 3,5 \log FD)}} \quad (\text{ec. 29})$$

FD : daño por fatiga por agrietamiento de arriba hacia bajo, calculado por la ec 26.

El daño por deformación permanente es la responsable por la formación del ahuellamiento en los pavimentos. La deformación plástica, PD , se calcula agregando las deformaciones plásticas en cada capa de la estructura, utilizando la ec. 30, subdividiendo cada capa en un número de subcapas n de espesor h_i y calculando la deformación plástica ϵ_p^i en cada subcapa y en la subrasante.

$$PD = \sum_{i=1}^n \epsilon_p^i h^i \quad (\text{ec. 30})$$

La deformación plástica ε_p en cada capa de asfalto se calcula a partir de la deformación vertical elástica correspondiente ε_v utilizando la ec. 31.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_v} = k_1 10^{-3,4488T^{1,5606} N^{0,479244}} \quad (\text{ec. 31})$$

T: temperatura de la capa de hormigón asfáltico (°F)

N: número acumulado ejes equivalentes

k1: factor de calibración, representa el aumento del nivel de confinamiento con la profundidad (en pulgadas) calculada a partir de las ecuaciones 32 hasta 34.

$$k_1 = (C_1 + C_2 \text{ depth}) 0,328196^{\text{depth}} \quad (\text{ec. 32})$$

$$C_1 = -0,1039h_{ac}^2 + 2,4868h_{ac} - 17,342 \quad (\text{ec. 33})$$

$$C_2 = 0,0172h_{ac}^2 - 1,7331h_{ac} + 27,428 \quad (\text{ec. 34})$$

Para las capas granulares y subrasante la deformación plástica ε_p se calcula a partir de la deformación vertical elástica correspondiente ε_v utilizando la ec. 35.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_v} = \beta_G \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad (\text{ec. 35})$$

β_G : constante de calibración – 1,673 para materiales granulares y 1,35 para materiales finos

β , ρ y ε_0 son propiedades del material obtenidas de ensayos de laboratorio con carga repetitiva hasta un determinado nivel de deformación ε_r , y son calculados con el conjunto de ecuaciones 36 hasta 38, donde W_c es el contenido de agua en porcentual.

$$\log \beta = -0,6119 - 0,017638W_c \quad (\text{ec. 36})$$

$$\rho = -10^9 \left(\frac{-4,89285}{1 - (10^9)^\beta} \right)^{1/\beta} \quad (\text{ec. 37})$$

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} = \frac{1}{2} \left(0,15e^{(\rho)^\beta} + 20e^{\left(\frac{\rho}{10^9}\right)^\beta} \right) \quad (\text{ec. 38})$$

Pavimento de hormigón

Los pavimentos de hormigón son nombrados en MEPDG como JPCP pavimento de hormigón con juntas y CRCP pavimento de hormigón continuamente reforzado, la falla por agrietamiento de fatiga, de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, es característico de los pavimentos JCP, con o sin barras de traspaso de carga.

El porcentaje total de agrietamiento de losas, TCRACK, se determina sumando el porcentaje de agrietamiento de arriba hacia abajo CRKp y de abajo hacia arriba CRKq, a través de las ecuaciones 39 hasta 41.

$$TCRACK = (CRKp + CRKq - CRKpCRKq) 100\% \quad (\text{ec. 39})$$

$$CRKp, q = \frac{1}{1 + FD_{p,q}^{-1,68}} \quad (\text{ec. 40})$$

$$FD_{p,q} = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m}}{N_{i,j,k,l,m}} 100 \quad (\text{ec. 41})$$

$FD_{p,q}$ = daño total por fatiga por agrietamiento de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, acumulado según la hipótesis de Miner¹⁰

$n_{i,j,k,...}$ = número aplicaciones de carga en las condiciones i, j, k, l, m, n .

$N_{i,j,k,...}$ = número aplicaciones de carga hasta la falla por fatiga en las condiciones i, j, k, l, m, n .

i = edad, que explica los cambios en el módulo de ruptura del hormigón, la condición de unión de la capa y el deterioro de la eficiencia de transferencia de carga (LTE)

j = mes, que explica los cambios en la base y el módulo de reacción de la subrasante

k = tipo de eje

l = nivel de carga para cada tipo de eje.

m= diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa

n = trayectoria de la rueda, suponiendo que la desviación lateral es distribuida normalmente

La sollicitación de tránsito hasta el límite de falla del pavimento, establecido en 50% de losas agrietadas, bajo las mismas condiciones i,j,k,l,m,n se calcula con:

$$\log N_{i,j,k,l,m,n} = 2,0 \left(\frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{1,22} + 0,4371 \quad (\text{ec. 42})$$

donde:

MR_i: módulo de ruptura del hormigón en la edad_i (psi)

σ_{i,j,k,l,m,n}: tensión crítica bajo carga en las condiciones i, j, k, l, m, n (psi)

2.5 Solicitud de tránsito en pavimentos urbanos

El tráfico urbano presenta condiciones específicas de solicitud para los pavimentos, debido a la baja velocidad y la concentración de las ruedas en la sección transversal. Para el caso de cargas pesadas de camiones y autobuses que acelera el proceso de formación de ahuellamiento, especialmente en intersecciones, semáforos y estaciones de autobuses (Ali et al., 2009).

Existe una tendencia a ignorar o sobreestimar los niveles de ocupación de los autobuses urbanos, aunque la cantidad no varíe significativamente, los niveles de ocupación durante los períodos pico, mañana y tarde, haz con que la carga resultante en los pavimentos difieren significativamente (Ebels, 2016). Bushman et al., (2003) han constatado que un porcentaje de 13% de los camiones que transitan por las autopistas urbanas en Saskatoon, Canadá, posiblemente excedían los límites de carga de eje y del peso bruto permitido. La clase de vehículo que más contribuye en esta situación son los vehículos de dos y tres ejes, durante la jornada laboral en los días hábiles, cuándo el servicio de cargas local es más activos en flujo urbano. Constatando que un 6% de los ejes equivalentes aplicados en el pavimento se debían al exceso de carga del vehículo y no al flujo de tránsito.

Las tasas de crecimiento del tránsito también difieren a lo observado en las vías rurales, según la evaluación de Packard (1984) las vías ubicadas en regiones urbanas donde hay una alta tasa de crecimiento urbano suelen tener una tasa de crecimiento del tránsito más alta a la esperada, sin embargo, el crecimiento en los volúmenes de camiones poden ser menores a los de los autos.

Los valores de tasa de crecimiento son estimados en base a valores históricos ajustados por regresión (Koorey et al., 2000), un enfoque alternativo es explorar el crecimiento de vehículos automotores registrados en el área de influencia y asumir una tasa de crecimiento igual al crecimiento promedio del registro de vehículos, siempre que el área de influencia sea bien delimitada (Kamplimath et al., 2013).

2.6 Estudios sobre la variabilidad y sus efectos en el desempeño

Los pavimentos son infraestructuras diseñadas para desempeñar por largo periodos de tiempo y por largas extensiones, tornando el diseño y construcción de pavimentos actividades con una cierta dosis de incertidumbre (Jiang et al., 2003).

Sin embargo, existe incertidumbre y variabilidad en el diseño y construcción del pavimento, así como en las cargas de tráfico y factores climáticos que solicitan el pavimento durante su vida útil (FHWA, 2006), pudiendo ser la principal causa de distorsión entre el desempeño diseñado y observado (Valle & Thom, 2016).

Cada uno de los parámetros de diseño puede ser una fuente de incertidumbre, en las distintas etapas del ciclo de vida de los pavimentos, entre las cuales se incluyen la variabilidad inherente los materiales (Kim & Buch, 2003) y a la construcción (Sebaaly & Bazi, 2005).

La incertidumbre está relacionada a la imprecisión en la cuantificación de los parámetros (NCHRP, 2003), principalmente los relacionados a las proyecciones de tránsito, las cargas por eje y tasa de crecimiento (Romanoschi et al., 2011), (Kalita & Rajbongshi, 2015).

De acuerdo a los resultados obtenidos por Valle & Thom (2016) los parámetros cuya variabilidad inciden más en la fatiga de pavimentos flexibles son el módulo elástico y el espesor del asfalto. En cuanto a deformación permanente de asfaltos, inciden más los espesores de la sub-base granular y del asfalto, además de la rigidez de la subrasante.

A su vez, Sabih & Tarefder, (2016b) comprobaron que las propiedades del hormigón, principalmente módulo elástico (E) y módulo de ruptura (Sc), tienen un impacto significativo en el agrietamiento transversal.

2.6.1 Variabilidad inherente a los materiales

Los materiales son afectados por la variabilidad espacial y la variabilidad debido a imprecisión en el proceso de estimación de las propiedades (Noureldin et al., 1994).

El factor de variabilidad espacial representa la no uniformidad de los parámetros geotécnicos, módulo resiliente y módulo de reacción del suelo, a lo largo del pavimento (FHWA, 2006) causando el surgimiento de deterioro en los pavimentos.

La variabilidad debido a la imprecisión en la estimación de las propiedades puede estar asociada al método de prueba en laboratorio que puede resultar de diferentes laboratorios y operadores, variabilidad en la selección de las propiedades de los materiales de las capas de la estructura del pavimento, (Yoder & Witczak, 1975).

Roesler et al., (2016) resaltan que la no-uniformidad en el soporte de las losas de los pavimentos de hormigón podría aumentar hasta un 31% en las tensiones en los bordes de la losa llevando el pavimento a falla.

2.6.2 Variabilidad en la construcción

La existencia e importancia de la variabilidad ha sido reconocida en la industria de las carreteras desde la década de 1950, sin embargo fue durante el análisis de las variabilidades de materiales y construcción de la prueba AASHO (1956-1962) cuando se identifica la magnitud y el efecto de la variabilidad en la construcción (Hughes, 1996).

La variabilidad producto del proceso constructivo está presente la variabilidad en las propiedades de mezcla asfáltica utilizada, inclusive la granulometría, contenido de asfalto y propiedades mecánicas (Sebaaly & Bazi, 2005).

En los pavimentos de hormigón la variabilidad reportada por Tayabji & Wu, (2002) presenta el coeficiente de variación (COV) alrededor de los 15% para los parámetros de resistencia a la tracción, compresión, flexo tracción o módulo de ruptura y módulo de elasticidad.

Además la variabilidad está presente en los espesores de las capas construidas sean para pavimentos de asfalto (Jiang et al., 2003), pavimentos de hormigón (Vancura, 2013) e inclusive en los trabajos de recapados de pavimento (Whiteley et al., 2005). Hay que resaltar, sin embargo que mismo cuando las variaciones de espesores de la capa de asfalto y sub base mismo estando dentro de las tolerancias permitidas por las especificaciones de construcción, afectan el desempeño del pavimento (Valle & Thom, 2020), pudiéndose considerar la variabilidad producto de la construcción como una fuente de incertidumbre.

2.6.3 Variabilidad de los datos de tránsito

En la estimación de la variabilidad del tránsito de diseño debe ser evaluada en función de la variabilidad de los datos que componen el cálculo de las repeticiones en el periodo de diseño (Kalita & Rajbongshi, 2015), detallados en la Tabla 1.

Tabla 1: Variabilidad en los datos de tránsito

Parámetros	Fuente de incertidumbre y variabilidad
Repeticiones de tráfico (T)	Tendencia y tasa de crecimiento anual del tráfico
	Factores empíricos adoptados para la conversión de diferentes cargas de eje y diferentes configuraciones de eje.
	Factor empírico de distribución
	Factor empírico de daño vehicular

Huang, (2004) presenta los COV para la predicción del tráfico para el período de diseño obtenidos en la versión publicada en 1986 de la Guía AASHTO, detallados en la Tabla 2.

Tabla 2: Coeficiente de variación para predicción del tránsito, AASHTO93

Descripción	COV (%)
Suma de EALF sobre % de distribución por eje	35
Tráfico diario medio inicial – ADT ₀ o TMDA ₀	15
Factor de crecimiento del tráfico – G	10
Porcentaje de camiones en la flota – %T	10
Promedio de número de ejes por camión – A	10
Predicción de tráfico general	42

EALF – Equivalent Axel Load Factor

La variabilidad de la tasa de crecimiento está asociada a factores socioeconómicos, factores asociados al crecimiento del tráfico, densidad de población y tasa de crecimiento de población, el uso del suelo y la clasificación funcional de la carretera (Lu et al., 2009).

2.6.4 Cuantificación de la variabilidad

Según Noureldin et al., (1994) la inclusión de los parámetros de variabilidad, Z_R y S_0 en los métodos AASHTO, proviene del reconocimiento de que cada parámetro de diseño es en realidad una variable aleatoria con una distribución específica durante el período de diseño.

Investigaciones más recientes han demostrado que hay diversas distribuciones posibles para las variables aleatorias continuas y las más comúnmente utilizadas en la literatura para representar el comportamiento de los parámetros de diseño y la vida útil de un pavimento son la distribución Normal, Log normal, Gamma y Weibull (Tighe, 2001; Selezneva et al., 2003; Kalita & Rajbongshi, 2015).

Del punto de vista de la estadística la medida que más común para representar la variabilidad es la desviación estándar, otras formas de representar la variabilidad son el Coeficiente de Variación (COV%) que es una relación entre la desviación estándar y el promedio de los valores, o simplemente el rango de valores. Sin embargo la varianza es un parámetro importante en la cuantificación de la variabilidad siendo una medida estadística que permite la suma de varianzas en resumen, si un número

de varianzas diferentes afectan una medición, la varianza de la medición es igual a la suma de las varianzas individuales (Hughes, 1996).

La forma de atribuir esta variabilidad al diseño es utilizando el enfoque probabilista, a partir de la determinación de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) (Whiteley et al., 2005) y estadística descriptiva en que a cada parámetro o variables independientes asociadas a un método se le asigna una media, desviación estándar y una varianza o coeficiente de variación (Noureldin et al., 1994), de esta forma se puede evaluar la sensibilidad al diseño final y confiabilidad del diseño (Kim & Buch, 2003).

2.6.5 Variabilidad en el contexto urbano

Llopis-Castelló et al., (2020) en su investigación sobre el deterioro de pavimentos urbanos presentan la variabilidad de parámetros en el ambiente urbano, través de la evaluación de datos disponibles en el programa LTPP – *Long Term Pavement Performance*. En resumen los datos de tránsito, en términos del TMDA, TMDAc y ESAL, presentan COV de 90%, 89% y 74% respectivamente, en cuanto a las informaciones referentes a materiales y estructura, las secciones evaluadas presentan SN variando entre 2,64 hasta 12,02 pul., promedio de 6.55 pul y desviación estándar de 2.39 pul., y COV de 36,5%.

En el ambiente urbano se debe considerar además la variabilidad producto de la existencias de tramos homogéneos cortos debido a que las calles tienen diferentes flujos de tráfico y diferentes materiales en cada sentido (Osorio et al., 2015).

Todavía en el ambiente urbano hay que considerar el riesgo de gran importancia para las vías urbanas ofrecido por los servicios públicos subterráneos y la necesidad de repararlos causando deterioro en los pavimentos (Hastak & Baim, 2001).

Cada una de esas condiciones dificulta las actividades en el proceso total de gestión del pavimento, siendo necesaria la adecuación de los métodos de diseño y predicción de desempeño desarrollados para pavimentos interurbanos para utilización en pavimentos urbanos.

2.7 Propuesta conceptual para metodología de análisis de la variabilidad

Con el sentido de proponer una metodología de análisis de la variabilidad de los parámetros y del desempeño se presenta en la Figura 6 el flujo de actividades propuestas.

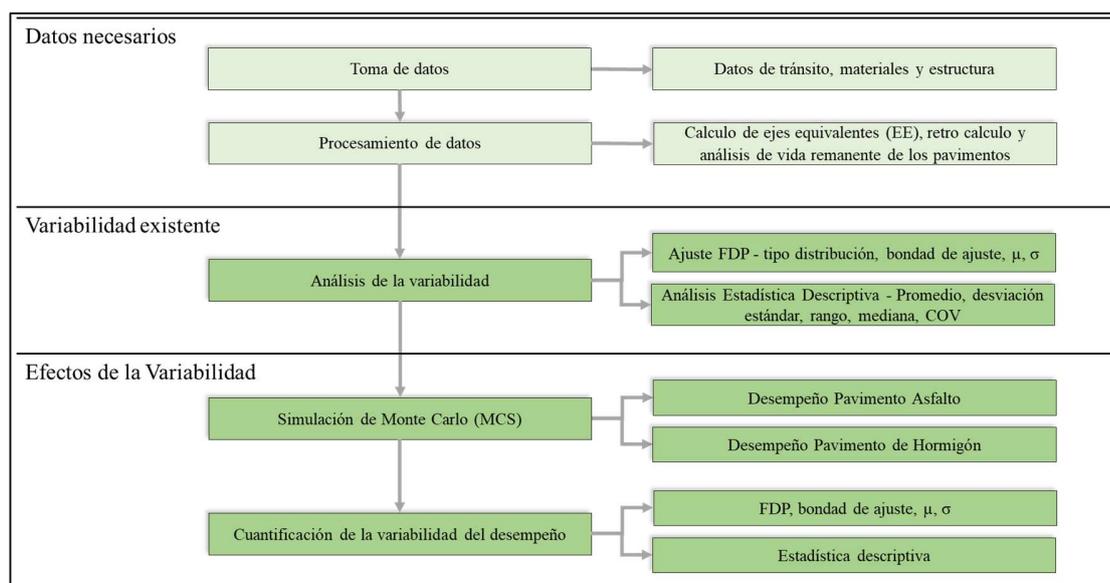


Figura 6: Metodología de análisis de la variabilidad

Las actividades son descritas en detalle a continuación.

2.7.1 Toma de datos y procesamiento

Incluye la búsqueda por informaciones necesarias de los parámetros de diseño, así como la extracción de otros parámetros por medio de procesamiento de los datos utilizando procesos de retro cálculo y correlaciones, para las informaciones de los materiales y estructura, expansión de datos para las informaciones volumen de tránsito y cálculos de factores de ejes equivalentes.

Los parámetros son agrupados en parámetros estructurales y de los materiales: espesores de las capas, módulos elásticos de los materiales granulares y asfálticos, módulo elástico y módulo de ruptura del hormigón, capacidad de soporte del suelo, módulo resiliente o módulo de reacción, y parámetros de tránsito: volumen de tránsito comercial (TMDAc o *AADTT*), factor de eje equivalente (FEE o *Tf*), tasa de crecimiento (*G*), % de tránsito por sentido da vía (*D*) y % de tránsito por pista (*L*).

2.7.2 Análisis de la variabilidad

El análisis de la variabilidad consiste de la evaluación estadística de los datos disponibles con la finalidad de caracterizar la función de densidad de probabilidad FDP que represente más adecuadamente la dispersión de los datos, seguido del

agrupamiento por rango de valores, evaluación de posibles outliers y estadística descriptiva en términos de coeficiente de variación (COV).

2.7.3 Cuantificación del impacto de la variabilidad

La evaluación del impacto de la variabilidad en el desempeño se desarrolla a través de Simulaciones de Monte Carlo (SMC) utilizando un modelo teórico para predicción de desempeño de pavimento en comparación a resultados obtenidos para una situación referencia.

Las SMC son corridas utilizando como entrada números aleatorios generados en base a las distribuciones de probabilidades, y respectivos parámetros, resultantes de la etapa anterior de análisis de variabilidad.

El modelo teórico elegido para simulación debe tener en cuenta la disponibilidad y calidad de los datos además de la posibilidad de inferir los deterioros considerados como criterio de falla.

La cuantificación de la variabilidad del desempeño consiste en el estudio estadístico de los resultados caracterizando la función de densidad de probabilidad FDP, inclusive los parámetros μ , σ , más adecuada a los valores, el rango de valores, estadística descriptiva y COV. Además se determina el % de puntos con desempeño inferior a la situación de referencia, indicando la posibilidad de falla temprana.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

Este capítulo presenta la descripción del experimento y metodología aplicados para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Conforme planteado por Abaza, (2002) se utiliza el modelo AASHTO 93 con dos abordajes distintos durante el ciclo de vida del pavimento en el diseño y como herramienta para predecir el desempeño del pavimento en un momento futuro.

A través de la comparación del desempeño predicho por el método AASHTO 93 W_t utilizando la variabilidad según la recomendación AASHTO (Z_R ; S_0), con el desempeño real N_t simulado, detallados en la Figura 7, utilizando la variabilidad encontrada en ambiente urbano con la finalidad de cuantificar los efectos de la variabilidad de los parámetros individualmente.

Los valores de N_t serán inferidos de forma probabilística utilizando Simulación de Monte Carlo (SMC), basado en la investigación de Mun, (2014) para pavimentos interurbanos.

Para alcanzar los objetivos, el trabajo experimental se desarrolló en dos etapas, la primera con sentido de identificar los parámetros que más influyen en el desempeño a través de la posible correlación entre los parámetros través del coeficiente de correlación de Pearson (Llopis-Castelló et al., 2020) utilizando datos disponible en la literatura revisada.

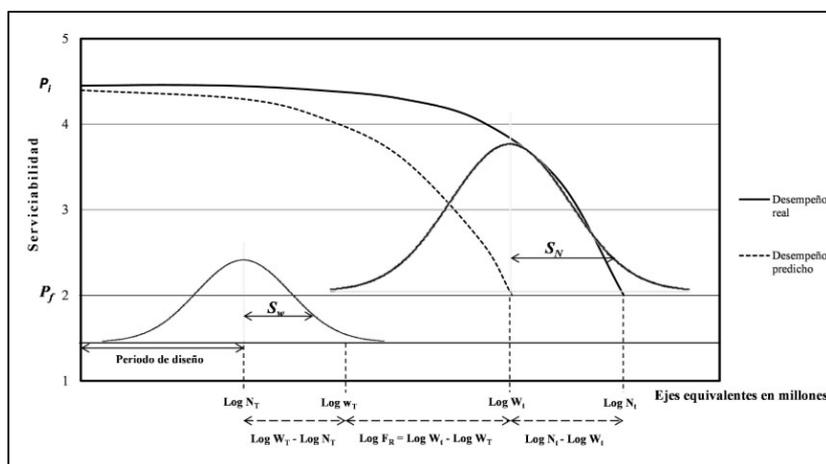


Figura 7: Confiabilidad y variabilidad según AASHTO93 (Rodríguez Moreno, 2014)

La segunda etapa del experimento consiste en un caso de estudio, utilizando datos disponibles de la Región Metropolitana (RM) de Santiago, con el sentido de evaluar la variabilidad de los parámetros que presentan una mayor correlación entre los parámetros y el desempeño. Esta etapa se realiza utilizando las actividades según la metodología conceptual propuesta en el ítem 2.7.

Los parámetros estudiados en el caso de los pavimentos de asfalto son: h_i (mm): espesor de las capas de asfalto, base y sub-base; a_i : coeficiente estructural de las capas de revestimiento, base y sub-base; m_i : coeficiente de drenaje de la capa granular; MR_{SR} : Módulo resiliente de la subrasante; SN (mm): número estructural. Para los pavimentos de hormigón se incluyen: D (mm): espesor de la losa de hormigón; h_2 (mm) espesor de la sub-base; k_c : módulo de reacción combinado entre subrasante y sub-base; E_c : módulo elástico del hormigón, S_c : módulo de ruptura del

hormigón; Cd: coeficiente de drenaje; J: coeficiente de transferencia de carga. Para las informaciones relativas al tránsito será evaluado el Tránsito Medio Diario Anual comercial (TMDAc), Factor de pista (Fp) y el Factor de Eje Equivalente (FEE).

El caso de estudio utiliza las SMC para simular la variabilidad en el desempeño N_t causada por la variabilidad encontrada en los parámetros y los compara con la referencia de un diseño base.

Las simulaciones en el caso de estudio utilizan el modelo AASHTO93, el ajuste de la función de densidad de probabilidad (FDP) se realiza con 95% de confiabilidad, respaldada por el test Anderson-Darling (AD) para bondad de ajuste y cálculos de los parámetros μ y σ (ubicación y escala) por método de máxima verosimilitud (Fernandes, 2013), con soporte del software Minitab.

Es importante resaltar que en las simulaciones del caso de estudio la variabilidad es incluida para cada parámetro individualmente, por lo tanto no se aplican los valores recomendados para Z_R y S_0 .

3.1 Datos recolectados

La primera etapa del trabajo se desarrolla con informaciones y datos recolectados de la literatura revisada, mayoritariamente referente a estudios desarrollados en ámbito de los pavimentos interurbanos, Tabla 3.

Tabla 3: Variabilidad asociada a los parámetros, evaluación de antecedentes

Pavimento	Parámetro	COV (%)	FDP	Fuente
Asfalto	h1	7,2	Normal	(Valle & Thom, 2016)
	h2	15	Normal	(Timm et al., 2000)
	h3	15	Normal	(Noureldin et al., 1994)
	MR SR	30	Lognormal	(Timm et al., 2000)
	a1	6	Normal	(Noureldin et al., 1994)
	a2	13	Normal	(Noureldin et al., 1994)
	a3	15	Normal	(Noureldin et al., 1994)
	SN	11	Normal	(Noureldin et al., 1994)
Hormigón	D	2,5	Normal	(Liu, 2015), (Vancura et al., 2013)
	Ec	12	Normal	(Tayabji & Wu, 2002)
	Sc	10	Normal	(Tayabji & Wu, 2002)

Las datos referentes a los parámetros de tránsito fueron obtenidos en la biblioteca SECTRA en informes de resultados de investigaciones desarrolladas en el ámbito de la Región Metropolitana de Santiago, recopilados de la biblioteca SECTRA (SECTRA, n.d.).

Los datos referentes a los parámetros de los materiales y estructura de los pavimentos, utilizados en el estudio de caso, fueron adquiridos en el proyecto FONDEF D09I1018 “Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile” del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico liderado por investigadores del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile, (Chamorro et al., 2015).

Los tramos del estudio son vías de diferentes características parte de la red vial de la RM Santiago, el total de tramos evaluados 102 tramos de pavimento asfáltico, 159

de pavimento rígido y 120 puntos de medición de flujo vehicular y clasificación por tipo de vehículo, distribuidos en 28 comunas, detallados en la Tabla 4.

Tabla 4: Resumen de los datos disponibles

Tipo	Tramos	Espesor de la capa superior	Levantamiento FWD	Comunas RM
Pavimento Asfáltico	102	102	45	7
Pavimento de Hormigón	159	159	69	9
Flujo de Tránsito	120		-	28

Los valores de los módulos resilientes de la mezcla asfáltica y de las capas granulares y del suelo de subrasante, el módulo de reacción de suelo para pavimentos de hormigón, módulo de ruptura y módulo elástico del hormigón, fueron obtenidos a través del proceso de retro cálculo.

3.2 Correlación entre los parámetros y el desempeño

El análisis de correlaciones se desarrolla utilizando resultados obtenidos a través de SMC con base en datos y antecedentes recopilados de literatura e investigaciones publicadas anteriormente, tanto para pavimentos urbanos e interurbanos, en su gran mayoría, referencian la variabilidad de los parámetros relativos a los materiales y estructura, detallados en la Tabla 3.

Las SMC se ejecutan para tres niveles de tránsito para cada tipo de pavimento, resumidos en la Tabla 5, utilizando datos de estructura y materiales recopilados de literatura y datos de tránsito de la RM Santiago.

Tabla 5: Escenario MSC para análisis de correlación

Parámetro variable	Niveles de Tránsito		
	3E+06	10E+06	20E+06
Parámetros estructurales y tránsito - asfalto	Nt _{Asfalto1}	Nt _{Asfalto2}	Nt _{Asfalto3}
Parámetros estructurales y tránsito - hormigón	Nt _{Hormigón1}	Nt _{Hormigón2}	Nt _{Hormigón3}

Las correlaciones entre los parámetros de diseño relativos a la estructura, materiales y tránsito, consideran el desempeño real representado por el Nt como variable dependiente, simulados según modelo AASHTO93, los resultados se presentan en las Tablas 6 para pavimento de asfalto y Tabla 7 para pavimento de hormigón.

Se consideran correlacionados los parámetros que presentan el valor para el coeficiente de correlación $r \geq 0,4$ (moderado a fuerte) independiente del signo (+) o (-) incluyendo los valores del intervalo de confianza IC 95% (Schober et al., 2018).

Tabla 6: Coeficientes de correlación de Pearson (r) – pavimentos flexibles

	Nt _{Asfalto}	TMDAc	SN
SN	0,612	0,593	
MR_SR	0,522	0,513	0,011
h1	0,496	0,481	0,829

Tabla 7: Coeficientes de correlación de Pearson (r) – pavimentos rígidos

	Nt _{Hormigón}	TMDAC	k_c (pci)
Sc (psi)	0,443	0,427	0,002
D (pul)	0,814	0,79	-0,028
h2 (pul)	0,018	0,021	0,353

Los resultados en la primera columna representan las correlaciones directas entre el parámetro y el desempeño, sin embargo también es posible notar que existen correlaciones bastante significativas entre los parámetros, ubicados en las otras columnas, que podrían interferir indirectamente en el desempeño.

Para los pavimentos asfálticos se destacan los parámetros relativos a la estructura – SN(mm) y $h_{1(mm)}$ y al suelo de la subrasante – MR_SR.

Para los pavimentos de hormigón se destacan los parámetros relativos a la estructura – D(mm) y la combinación del $kc+h_2$, sin embargo, el kc se evaluará aisladamente puesto que no hay referencias reales del $h_{2(mm)}$. Destacase también el parámetro relativo al material – S_C .

Los resultados presentan la fuerte relación del TMDAc y el desempeño de los pavimentos tanto asfáltico como de hormigón, pero con correlación débil ($r < 0,4$) entre el factor de eje equivalente (T_f) y el desempeño, con intención de confirmar este resultado se desarrolló nuevamente una evaluación, tomando en cuenta solamente los datos de tránsito, presentado en las Tablas 8 y 9, donde es posible notar que los resultados no se repiten, presentando coeficiente de correlación $r > 0,4$ (moderado a fuerte) dentro del intervalo de confianza IC 95%.

Tabla 8: Coeficientes de correlación de Pearson (r) tránsito – Asfalto

	$N_{t_{Asfalto}}$	TMDA	TMDAc	Fp
TMDA	0,635			
TMDAc	0,914	0,747		
Fp	-0,469	-0,703	-0,617	
$T_f_{Asfalto}$	0,327	-0,077	-0,036	0,161

Tabla 9: Coeficientes de correlación de Pearson (r) tránsito - Hormigón

	N_{tHormigón}	TMDA	TMDAc	Fp
TMDA	0,619			
TMDAc	0,784	0,747		
Fp	-0,544	-0,703	-0,617	
Tf_Hormigón	-0,579	-0,077	-0,036	0,161

Los resultados de las correlaciones fueron utilizados para la definición del factorial para el caso de estudio desarrollado para la Región Metropolitana de Santiago en la creación de los escenarios para las SMC.

3.2.1 Caso de Estudio

Las vías urbanas en Chile están a cargo del Ministerio de Vivienda y Urbanismo – MINVU, y son administradas por el Servicio Regional de Vivienda y Urbanismo, SERVIU, cuya atribución es materializar en la instancia regional los planes y programas estratégicos definidos por el MINVU para cada región del país (MINVU, 2017).

El SERVIU de la Región Metropolitana ha publicado en 2018 el Manual de Vialidad Urbana, Pavimentación y Aguas Lluvias (SERVIU, 2018), que tiene como objetivo estandarizar las actividades relacionadas a infraestructura urbana en la Región Metropolitana, inclusive el diseño y ejecución de las obras de pavimentación.

El referido manual presenta, entre otras, la recomendación de solicitud de tránsito, para los diseños de estructuras de nuevos pavimentos asfálticos y de

hormigón para cada tipo de vía según su clasificación funcional, considerando el rol que desempeñan en la red, son nombradas expresas, troncales, colectoras, de servicio, locales o pasajes (MINVU, 2008).

En este contexto se crea el diseño base, detallado en la Figura 8 y Tabla 10, utilizado en este trabajo como referencia de comparación entre los escenarios estudiados, desarrollado según la Guía AASTHO 93, y las orientaciones del SERVIU en cuanto a los niveles de tránsito para vías expresas 20×10^6 , vías troncales 10×10^6 y vías colectoras 3×10^6 , ejes equivalentes para período de 20 años de vida útil.

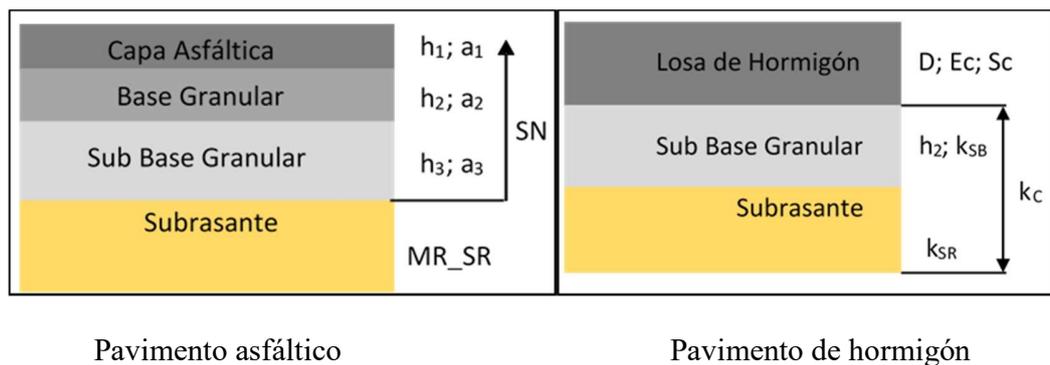


Figura 8: Esquema de la estructura de referencia

Tabla 10: Estructuras de referencia

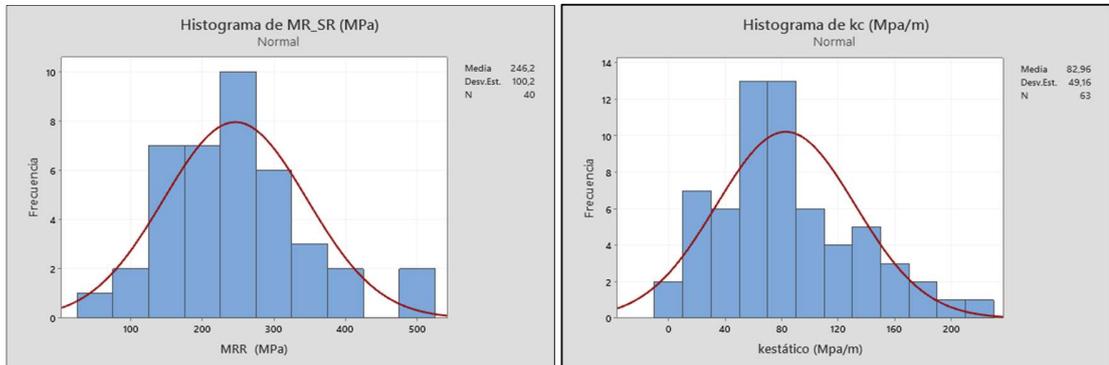
Tipo	Estructura	Nivel de tránsito (10^6)			Tipo	Estructura	Nivel de tránsito (10^6)		
		3	10	20			3	10	20
Asfalto	h1 (mm)	120	145	161	Hormigón	D (mm)	191	235	262
	h2 (mm)	150	150	150		h2 (mm)	200	200	200
	h3 (mm)	150	200	200		kc(MPa/m)	77	77	77
	SN (mm)	90	107	114		Cd	1		
	MR SR	87	87	87		Sc (MPa)	5		
	a1	0,44				J	3,6		
	a2	0,14				E (MPa)	30.000		
	a3	0,11							
R=80%; $Z_R = -0,841$; S0 - 0,45; PSIinicial – 4,5; PSIterminal – 2,0									

3.2.1.1 Análisis de variabilidad

Los análisis de la variabilidad de los parámetros de diseño, referentes al tránsito, materiales y estructura, realizados para los tramos de la RM presentaron los resultados conforme resumidos en la Tabla 11 y en las Figuras 9 y 10 se presentan las gráficas de FDP para los parámetros de la RM Santiago.

Tabla 11: Variabilidad asociada a los parámetros, datos RM Santiago

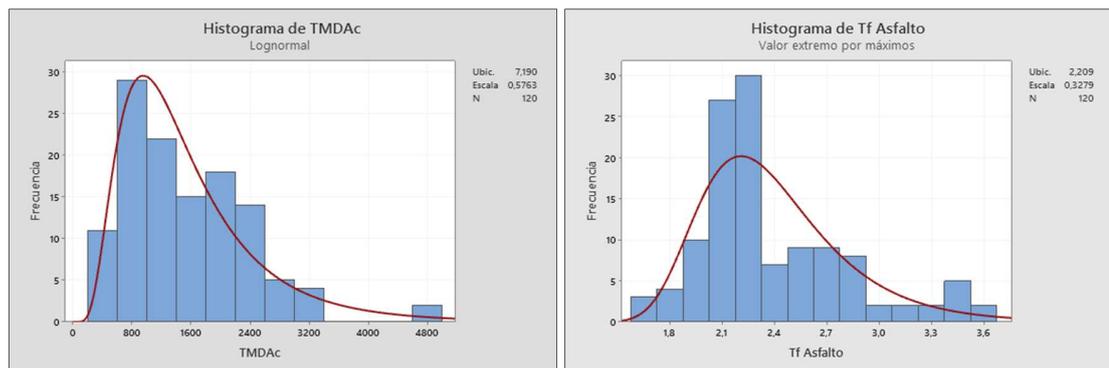
Pavimento	Parámetro	Media	Desviación Estándar	COV (%) Típico	FDP
Asfalto	h1 (mm)	102	48	47%	Lognormal
	h2 (mm)	548,4	337,1	61%	Lognormal
	MR SR (MPa)	246,2	100,2	41%	Lognormal (a)
	SNeF (mm)	144	101	70%	Lognormal
	a1	0,68	0,16	24%	Lognormal
	a2	0,09	0,06	65%	Lognormal
Hormigón	D (mm)	173	35	20%	Lognormal
	Sc (MPa)	3,9	0,7	18%	Lognormal
	kc (MPa/m)	82,9	49,2	60%	Normal (b)
Tránsito	TMDAc (vpd)	1.544	840	54%	Lognormal (g)
	FEE _{Asfalto}	2,4	0,43	18%	Valor extremo (h)
	FEE _{Hormigón}	2,8	0,48	17%	máximo (i)



(a)

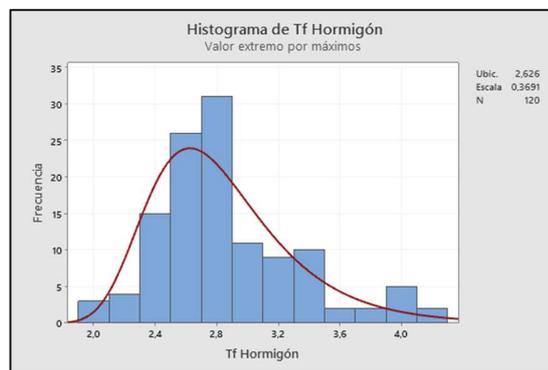
(b)

Figura 9: Variabilidad del suelo, pavimento de asfalto (a) hormigón (b)



(c)

(d)



(e)

Figura 10: Variabilidad del tránsito, TMDAc (c), $FEE_{Asfalto}$ (d) y $FEE_{Hormigón}$ (e)

El ajuste de la función de densidad de probabilidades (FDP), utilizado para comprender cómo se distribuyen las variables se realizaron utilizando el software *Minitab Statistical*, versión 2020. En el software, fueron testeadas las distribuciones continuas simétricas y asimétricas utilizando el método de máxima verosimilitud para estimación de los parámetros de las distribuciones y el test de bondad de ajuste de Anderson-Darling AD, considerando el mejor ajuste por análisis de $p\text{-value} > \alpha$, siendo $\alpha=1$ -Índice de Confiabilidad (95%) y $AD_{\text{Observado}} < AD_{\text{Crítico}}$ para $\alpha=5\%$, en esta orden siempre que fuera posible (Fernandes, 2013).

De forma complementaria se evaluó la vida remanente de los pavimentos para los tramos de prueba de la RM según la metodología mecanicista-empírico utilizando los modelos del *TAI* para pavimentos de asfalto y *ACPA* para hormigón, con la finalidad de comprender el comportamiento de la red vial urbana en la RM.

En la Tabla 12 se presentan los resultados para los pavimentos asfálticos en términos de N_f y N_d , ξ_t y ξ_v así como las respectivas FDP. Para los pavimentos de hormigón, en la misma tabla, se presentan los valores de N_f , SR y σ_e y las respectivas FDP.

La tensión de borde σ_e , se determina través del análisis mecanicista, que se realiza con el soporte de la herramienta de análisis de elementos finitos en 3D EverFE 2.25, para simular la respuesta de los pavimentos de hormigón a la carga aplicada por los ejes de los vehículos y los efectos ambientales.

Tabla 12: Variabilidad de la vida remanente de los pavimentos en la RM Santiago

Pavimento	Parámetro	Media	Desviación Estándar	COV (%) Típico	FDP
Asfalto	Nf	1,06E+06	1,25E+06	118	Weibull
	Nd	1,71E+08	2,35E+08	137,26	Gamma
	ϵ_t	2,19E-04	2,15E-04	98,49	Lognormal
	ϵ_v	2,03E-04	2,11E-04	104,01	Lognormal
Hormigón	Nf	2,46E+09	9,12E+09	370,76	Lognormal
	SR	0,35	0,1682	48,05	Gamma
	σ_e	1,3093	0,6299	48,1	Gamma

Un breve análisis de correlaciones, apunta los valores de $D(\text{mm})$ y k_c (MPa/m) como los principales parámetros en la determinación del σ_e en los pavimentos de hormigón. Para los pavimentos asfálticos los valores de los módulos elásticos y espesores de las capas E_1 , h_1 y E_2 , h_2 y el MR_{SR} son importantes en el cálculo del ϵ_t , sin embargo los módulos elásticos no son determinantes en el ϵ_v .

3.2.1.2 SMC para simulación de la variabilidad en el desempeño

La etapa de cuantificación de la variabilidad se realiza según los escenarios presentados en la Tabla 13, creados para simular la variabilidad del desempeño producto de la variabilidad de los parámetros, individualmente o en pares, basándose en los resultados de las correlaciones entre los parámetros y el desempeño.

Tabla 13: Escenarios simulación del caso de estudio

	Parámetros	Escenarios
Pavimento de Asfalto	Espesor capa bituminosa h1 (mm)	A1
	Módulo resiliente subrasante MR (MPa)	A2
	Número estructural SN (mm)	A3
	TMDAc (vpd)	A4
	SN+h1	A5
	TMDAc+h1	A6
Pavimento de Hormigón	TMDAc (vpd)	H1
	Módulo de ruptura Sc (MPa)	H2
	Espesor de losa D (mm)	H3
	D+TMDAc	H4
	Sc+TMDAc	H5
	Kc (MPa/m)	H6

3.2.1.3 Parámetros de entrada para los escenarios

Las SMC de los escenarios se corren utilizando datos aleatorios, presentados en la Tabla 14 y 15 según la FDP y variabilidad apurada de los datos de la RM de Santiago, tomando como punto de partida las estructuras del diseño base, Tabla 9.

Tabla 14: Parámetros para simulación – Asfalto

Nivel de tránsito	Parámetro	h1	MR SR	SN	TMDAc	Tf
	Unid.	mm	MPa	mm	vpd	
	FDP	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	V. ext. máx
3E+06	Media	120	86,68	90,3	120,99	2,4
	D. Estándar	56,471	35,279	63,124	65,871	0,432
	μ	4,7875	4,4623	4,5031	4,7957	2,209
	σ	0,4473	0,3915	0,6308	0,5095	0,3279
10E+06	Media	145	86,68	106,8	462,31	2,4
	D. Estándar	68,235	35,279	74,658	251,703	0,432
	μ	4,9767	4,4623	4,671	6,1362	2,209
	σ	0,4473	0,3915	0,6308	0,5095	0,3279
20E+06	Media	161	86,68	113,84	924,63	2,4
	D. Estándar	75,765	35,279	79,579	503,406	0,432
	μ	5,0814	4,4623	4,7348	6,8294	2,209
	σ	0,4473	0,3915	0,6308	0,5095	0,3279

Tabla 15: Parámetros para simulación – Hormigón

Nivel de tránsito	Parámetro	D	Sc	kc	TMDAc	Tf
	Unid.	mm	MPa	MPa/m	vpd	
	FDP	Lognormal	Lognormal	Normal	Lognormal	V. ext. máx
3E+06	Media	191	5,00	77,14	102,21	2,84
	D. Estándar	39	0,03	37,92	55,65	0,487
	μ	5,2523	1,6094	-	4,6270	2,6260
	σ	0,2022	0,0070	-	0,5095	0,3279
10E+06	Media	235	5,00	77,14	390,56	2,84
	D. Estándar	48	0,035	37,92	212,64	0,487
	μ	5,4596	1,6094	-	5,9676	2,6260
	σ	0,2022	0,0070	-	0,5095	0,3279
20E+06	Media	262	5,00	77,14	781,12	2,84
	D. Estándar	53,5	0,035	37,92	425,28	0,487
	μ	5,5683	1,6094	-	6,6607	2,6260
	σ	0,2022	0,0070	-	0,5095	0,3279

Los resultados obtenidos de las simulaciones son presentados en la siguiente sección, en la cual se evalúa el rango de variación del Nt, los efectos de los distintos parámetros en el ciclo de vida del pavimento, en la fase de diseño y utilización de los pavimentos.

4. ANÁLISIS DE CASO DE ESTUDIO

4.1 Cuantificación de la variabilidad

Los resultados del estudio de la variabilidad se presenta en dos secciones, la primera es la variabilidad en el desempeño resultante de la variabilidad de los parámetros de diseño que se correlacionan con el N_t demostrando cuanto tránsito tendría capacidad de soportar el pavimento luego de construido, asumiendo que ocurriera la variabilidad encontrada en el ambiente urbano, simulando la fase de operación del pavimento. En este momento son también presentados los resultados en términos de vida útil en años a partir de la transformación utilizando los datos de variabilidad del tránsito urbano.

La segunda sección presenta la variabilidad de la estructura en términos del $SN(mm)$ y $D(mm)$, resultante de la variabilidad de los parámetros de tránsito y suelo en la fase de diseño estructural del pavimento

a) Variabilidad en el desempeño

Los resultados obtenidos son presentados por separado, siendo que para los parámetros relativos a la estructura se evalúa la variabilidad causada en el desempeño es mostrada en términos de número de ejes equivalentes admisibles hasta el $PSI_t=2$.

El efecto de la variabilidad del parámetro relativo al tránsito, aisladamente y combinado con los parámetros relativos a la estructura, se evalúa observando la

variabilidad causada en el desempeño mostrada en términos del período de vida útil en años hasta alcanzar la condición terminal de $PSI_t=2$.

Los resultados son presentados en términos del N_t en EE admisibles para los pavimentos de asfalto en la Figuras 11 y para los pavimentos de hormigón en la Figura 12.

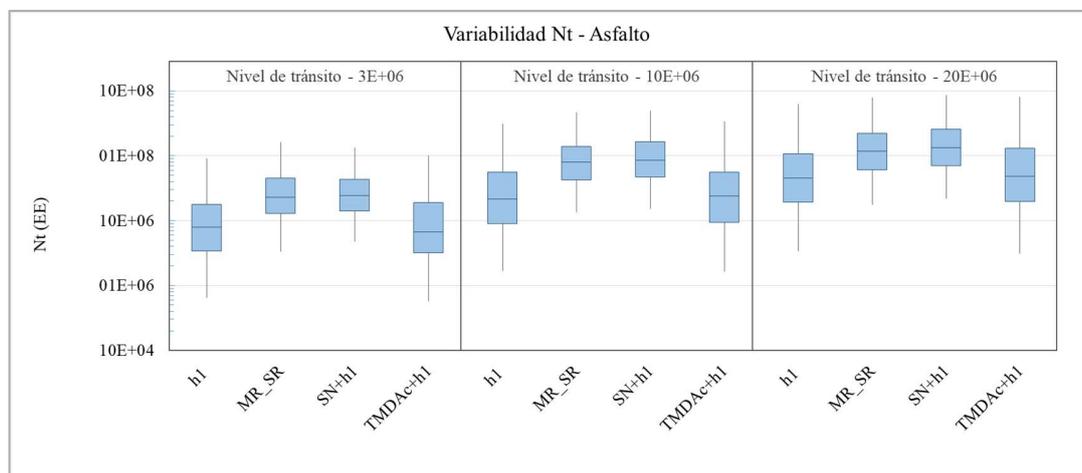


Figura 11: Variabilidad Desempeño real N_t (EE) – Pavimento Asfalto

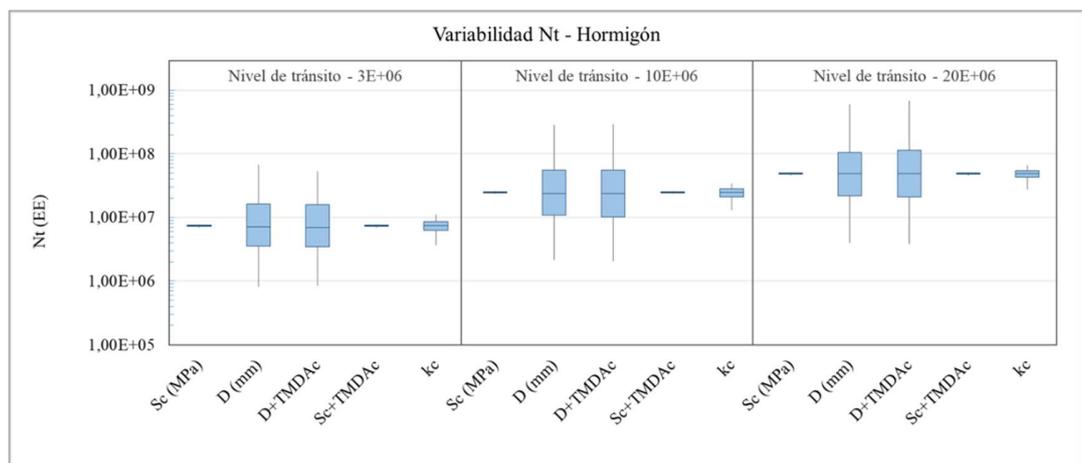


Figura 12: Variabilidad Desempeño real N_t (EE) – Pavimento de Hormigón

Los valores obtenidos para el desempeño N_t simulado, producto de la variabilidad de los espesores de las capas de asfalto h_1 (mm) y hormigón D (mm) incluso las FDPs ajustadas, son presentados en la Tabla 16.

Tabla 16: Espesor de las capas superiores h_1 (mm) y D (mm)

Escenario	Parámetro	W_{18}	Nt – Desempeño Real				% $N_t < W_{18}$
			COV (%)	FDP	Ejes Equivalentes *		
					Mínimo	Máximo	
A3.1	h_1 (mm)	3E+06	154%	Lognormal	6,4E+05	8,9E+07	22%
A10.1	h_1 (mm)	10E+06	182%	Lognormal	1,7E+06	3,1E+08	29%
A20.1	h_1 (mm)	20E+06	191%	Lognormal	3,4E+06	6,2E+08	25%
H3.3	D (mm)	3E+06	194%	Lognormal	8,2E+05	6,8E+07	21%
H10.3	D (mm)	10E+06	233%	Lognormal	2,2E+06	2,9E+08	24%
H20.3	D (mm)	20E+06	214%	Lognormal	4,0E+06	6,0E+08	23%

* Intervalo de confianza IC de 95%

Los valores obtenidos de las simulaciones para la evolución del efecto del SN (mm) en el desempeño, Tabla 17, presentan valores de COV entre 1040% - 2271% posiblemente debido a la variabilidad en el parámetro de entrada COV 70%, sin embargo este parámetro puede estar indirectamente afectado por las variabilidades de los materiales de las capas de base y subbase que no son objeto de evaluación en este estudio, por lo tanto los resultados obtenidos no serán evaluados.

En cambio, se evaluó el efecto de la variabilidad del SN en función de la variabilidad del h_1 (mm) encontrada en los datos del caso de estudio, considerando las otras capas no variables, Los resultados son presentados en la Tabla 18.

Tabla 17: Número estructural SN (mm)

Escenario	Parámetro	W_{18}	Nt – Desempeño Real				% Nt< W_{18}
			COV (%)	FDP	Ejes Equivalentes *		
					Mínimo	Máximo	
A3.3	SN (mm)	3E+06	2271%	Lognormal	3,09E+03	2,01E+11	45%
A10.3	SN (mm)	10E+06	1040%	Lognormal	1,07E+04	7,42E+11	42%
A20.3	SN (mm)	20E+06	1987%	Lognormal	1,10E+04	2,35E+08	42%

* IC de 95%

Tabla 18: Número estructural SN (mm) en función del espesor de la capa h_1 (mm)

Escenario	Parámetro	W_{18}	Nt – Desempeño Real				% Nt< W_{18}
			COV (%)	FDP	Ejes Equivalentes *		
					Mínimo	Máximo	
A3.5	SN+h1	3E+06	102%	Lognormal	4,80E+06	1,32E+08	14%
A10.5	SN+h1	10E+06	106%	Lognormal	1,52E+07	5,00E+08	14%
A20.5	SN+h1	20E+06	121%	Lognormal	2,21E+07	8,65E+08	16%

* IC de 95%

En la Tabla 19, son presentados los valores obtenidos para el desempeño Nt simulado, producto de la variabilidad en la capacidad de soporte del suelo de subrasante.

Tabla 19: Suelo de subrasante MR_SR(MPa) y kc (MPa/m)

Escenario	Parámetro	W ₁₈	Nt – Desempeño Real				% Nt<W ₁₈
			COV (%)	FDP	Ejes Equivalentes *		
					Mínimo	Máximo	
A3.2	MR_SR (MPa)	3E+06	115%	Lognormal	3,35E+06	1,62E+08	17%
A10.2	MR_SR (MPa)	10E+06	103%	Lognormal	1,34E+07	4,62E+08	16%
A20.2	MR_SR (MPa)	20E+06	109%	Lognormal	1,79E+07	7,85E+08	20%
H3.6	kc (MPa/m)	3E+06	25%	Normal	3,71E+06	1,11E+07	1,2%
H10.6	kc (MPa/m)	10E+06	21%	Weibull	1,32E+07	3,42E+07	0,4%
H20.6	kc (MPa/m)	20E+06	19%	Weibull	2,77E+07	6,52E+07	0,3%

* IC de 95%

En la Tabla 20, son presentados los valores obtenidos para el desempeño Nt simulado, producto de la variabilidad en el módulo de ruptura del hormigón Sc, aisladamente y asociado a la variabilidad del tránsito.

Tabla 20: Módulo de ruptura del hormigón Sc (MPa)

Escenario	Parámetro	W ₁₈	Nt – Desempeño Real				% Nt<W ₁₈
			COV (%)	FDP	Ejes Equivalentes *		
					Mínimo	Máximo	
H3.2	Sc (MPa)	3E+06	3%	Normal	6,95E+06	7,71E+06	0%
H10.2	Sc (MPa)	10E+06	3%	Normal	2,35E+07	2,60E+07	0%
H20.2	Sc (MPa)	20E+06	3%	Normal	4,60E+07	5,10E+07	0%
H3.5	Sc+TMDAc	3E+06	3%	Logística	6,90E+06	7,77E+06	0%
H10.5	Sc+TMDAc	10E+06	3%	Normal	2,35E+07	2,60E+07	0%
H20.5	Sc+TMDAc	20E+06	3%	Lognormal	4,61E+07	5,11E+07	0%

* IC de 95%

Los resultados son presentados también en términos del período de vida útil en años hasta alcanzar la condición terminal de $PSI_t=2$, Figura 13 y 14, considerando la

referencia de 20 años del diseño base. La transformación de EE para años considera la tasa de crecimiento del tránsito con valor uniforme $i=4\%$ al año, los parámetros de FEE y FP variables según los valores presentados anteriormente en la Tabla 11: Variabilidad asociada a los parámetros, datos RM Santiago.

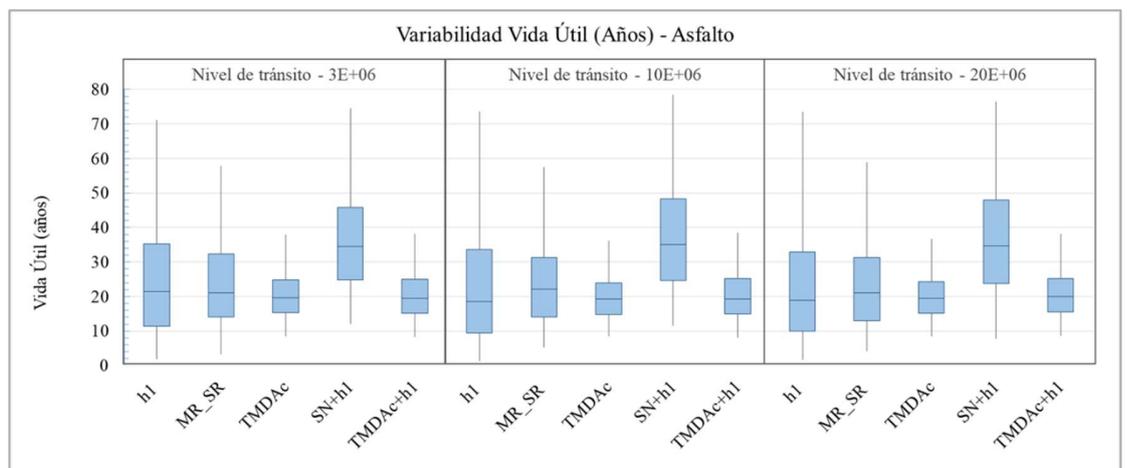


Figura 13: Variabilidad Vida Útil – Pavimento Asfalto

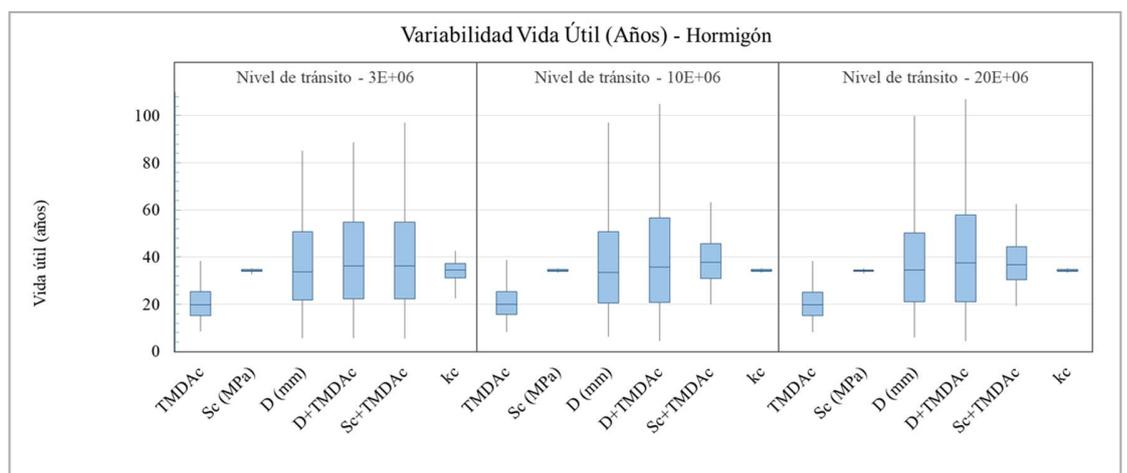


Figura 14: Variabilidad Vida Útil – Pavimento de hormigón

En las Tablas 21 para pavimentos de asfalto y la Tabla 22 para pavimentos de hormigón se presentan los valores obtenidos del desempeño simulado en términos del período de vida útil en años, las FDP ajustada a los datos y la probabilidad de que el pavimento no alcance la vida útil estimada cuando se considera el efecto de la variabilidad de los parámetros, en comparación a la referencia de 20 años del diseño base.

Tabla 21: Vida útil en año, pavimentos de asfalto

Escenario	Parámetro	W18	Vida Útil Años					% < 20 años
			FDP		Media	Años *		
			COV (%)	FDP		Mínimo	Máximo	
A3.1	h1 (mm)	3E+06	70%	Weibull	25	1,9	71,1	47%
A3.2	MR_SR (MPa)		57%	Weibull	24	3,3	57,8	45%
A3.4	TMDAc		35%	Gamma	20	8,5	37,9	52%
A3.5	SN+h1		42%	Gamma	36	12,1	74,6	14%
A3.6	TMDAc+h1		36%	Gamma	20	8,3	38,0	53%
A10.1	h1 (mm)		10E+06	79%	Weibull	24	1,4	73,6
A10.2	MR_SR (MPa)	54%		Gamma	24	5,2	57,4	43%
A10.4	TMDAc	35%		Gamma	20	8,5	36,2	55%
A10.5	SN+h1	44%		Gamma	37	11,5	78,5	14%
A10.6	TMDAc+h1	37%		Gamma	21	8,2	38,5	53%
A20.1	h1 (mm)	20E+06		77%	Gamma	24	1,7	73,4
A20.2	MR_SR (MPa)		58%	Gamma	24	4,2	58,9	47%
A20.4	TMDAc		35%	Gamma	20	8,5	36,7	55%
A20.5	SN+h1		46%	Weibull	37	7,9	76,4	16%
A20.6	TMDAc+h1		35%	Gamma	21	8,6	38,2	50%

* IC de 95%

Tabla 22: Vida útil en año, pavimentos de hormigón

Escenario	Parámetro	W18	Vida Útil Años					% < 20 años
			FDP		Media	Años *		
			COV (%)	FDP		Mínimo	Máximo	
H3.1	TMDAc	3E+06	35%	Gamma	21	8,6	38,4	50%
H3.2	Sc (MPa)		2%	Weibull	34	32,8	35,2	0%
H3.3	D (mm)		55%	Weibull	38	5,9	85,1	21%
H3.4	D+TMDAc		57%	Weibull	41	5,9	88,5	21%
H3.5	Sc+TMDAc		57%	Weibull	41	5,5	97,0	21%
H3.6	kc		14%	Weibull	34	22,6	42,7	1%
H10.1	TMDAc	10E+06	36%	Gamma	21	8,5	38,9	50%
H10.2	Sc (MPa)		2%	Gamma	34	33,4	35,3	0%
H10.3	D (mm)		59%	Gamma	38	6,2	97,0	24%
H10.4	D+TMDAc		62%	Weibull	41	4,4	104,8	23%
H10.5	Sc+TMDAc		27%	Gamma	39	19,9	63,3	3%
H10.6	Kc		2%	Normal	34	33,4	35,3	0%
H20.1	TMDAc	20E+06	36%	Gamma	21	8,3	38,4	51%
H20.2	Sc (MPa)		2%	Normal	34	33,3	35,3	0%
H20.3	D (mm)		60%	Gamma	38	6,0	99,8	23%
H20.4	D+TMDAc		62%	Weibull	42	4,6	107,0	23%
H20.5	Sc+TMDAc		28%	Gamma	38	19,3	62,4	3%
H20.6	kc		2%	Normal	34	33,4	35,3	0%

* IC de 95%

b) Impacto de la variabilidad en el diseño de los pavimentos

La variabilidad del tránsito o del suelo afecta el diseño del pavimento en términos de la estructura necesaria para garantizar la vida útil de 20 años y el número de ejes equivalentes admisibles. En resumen, es necesario cambiar el diseño del SN y D para garantizar la vida útil.

La Figura 15 muestra cuanto varía la estructura de pavimento de hormigón en términos del espesor de la losa D (mm) para que la vida útil se mantenga en 20 años frente a la variabilidad individual de los parámetros de tránsito TMDAc y suelo k_c .

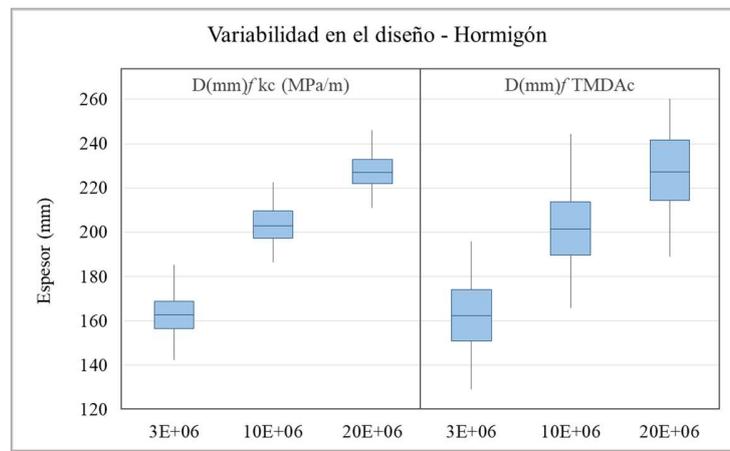


Figura 15: Variabilidad de tránsito y suelo en diseño – Pavimento de hormigón

La Figura 16 se presenta el resultado de la variabilidad en el diseño producto de la variabilidad combinada de los parámetros de tránsito TMDAc y suelo k_c .

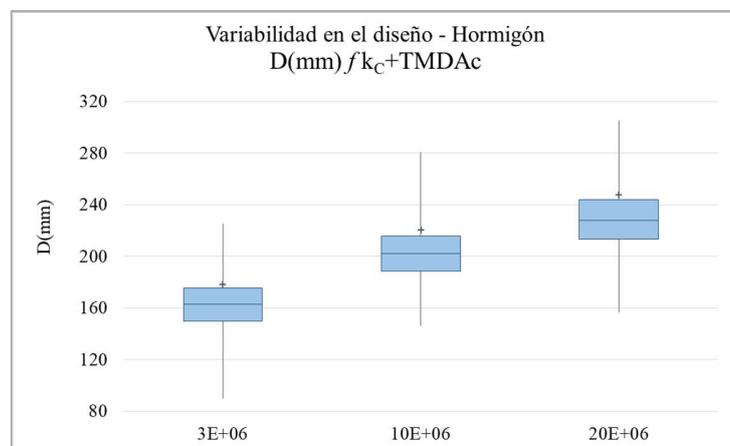


Figura 16: Variabilidad combinada en diseño – Pavimento de hormigón

La Figura 17 muestra cuanto varía la estructura de pavimento de asfalto en términos del SN (mm) para que la vida útil se mantenga en 20 años frente a la variabilidad individual de los parámetros de tránsito TMDAc y suelo MR_SR.

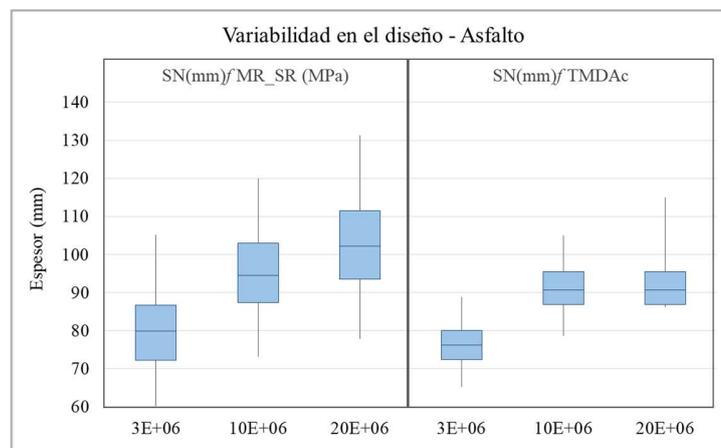


Figura 17: Variabilidad en diseño – Pavimento de asfalto

La Figura 18 se presenta el resultado de la variabilidad en el diseño producto de la variabilidad combinada de los parámetros de tránsito TMDAc y suelo MR_SR.

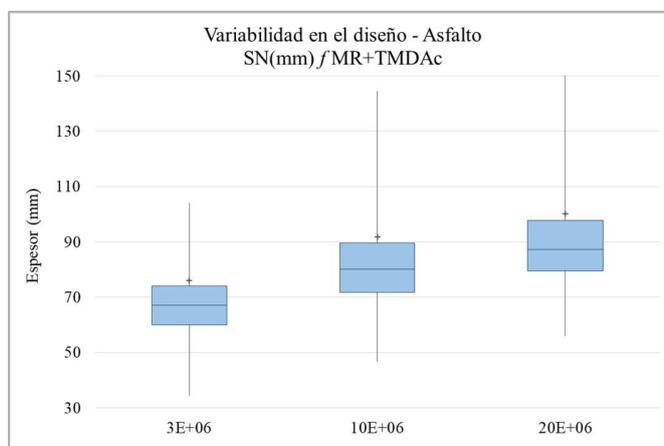


Figura 18: Variabilidad en diseño – Pavimento de asfalto

Comparativamente la variabilidad del suelo afecta más significativamente el diseño de pavimento asfáltico que de hormigón, mientras que para la variabilidad de tránsito no presenta diferencia significativa entre los tipos de pavimento, pero para el diseño de pavimento de hormigón es más significativa que la variabilidad del k_c .

En comparación al diseño según las recomendaciones del método AASHTO93 y Minvu, presentado anteriormente en la Tabla 10: Estructuras de referencia, los resultados obtenidos para SN(mm) y D(mm) simulados utilizando la variabilidad de los parámetros considerando el percentil 80 como seguridad, son entre 12 y 15% menores para los pavimentos de asfalto y entre 6 y 7% menores para los pavimentos de hormigón.

4.2 Discusión y análisis de los resultados

Los resultados demuestran la alta variabilidad en los parámetros estructurales de los pavimentos urbanos, principalmente el espesor de la capa superior h_1 (47%) y el número estructural SN (70%) en los pavimentos de asfalto. Para el pavimento de hormigón la variabilidad se ubica en niveles más bajos pero todavía es presente en el espesor de losa D (20%) y del módulo de ruptura Sc (18%).

Para los parámetros representativos del suelo, el módulo resiliente de la subrasante MR_{SR} presenta COV de 41% mientras que el módulo de reacción k_c presenta 60%, sin embargo hay que resaltar que el k_c representa la combinación del módulo de reacción de la sub-base y de la subrasante.

Todavía hay que destacar la gran variabilidad en el flujo de vehículos comerciales en la Región Metropolitana de Santiago, representada por el TMDAc, COV=54% y del Ejes Equivalentes, para 20 años, COV=59%. El principal efecto de la variabilidad en el flujo es la variabilidad y reducción de la vida útil en años.

La alta variabilidad de los parámetros estudiados explica el amplio rango de valores que asume el desempeño real N_t en términos de EE así como en la vida útil en años.

Análisis del efecto de la variabilidad de los parámetros

El efecto de la variabilidad producto del parámetro relativo a la capa superior, h_1 (mm) y D(mm) es más significativo en los pavimentos de hormigón que en los pavimentos de asfalto. Por otro lado, la variabilidad del SN (mm) se evalúa en

función únicamente de la variabilidad del h_1 (mm), y los efectos causados en el desempeño son menos significativos que la variabilidad del h_1 (mm).

Los resultados de la evaluación de la variabilidad del parámetro del suelo, MR_{SR} y k_c apuntan al efecto más significativo, causando más variabilidad en desempeño y en la vida útil en los pavimentos de asfalto en comparación a los pavimentos de hormigón.

En relación al parámetro relativo al material, Sc (MPa) el efecto de la variabilidad en el desempeño en ejes equivalentes y en la vida útil en años, es baja con $COV2\%$ y $COV3\%$ respectivamente, sin probabilidad significativa de falla, eso no significa que el Sc tiene poca importancia sino que es un parámetro que sufre pequeña variación en sus características, por tener restricciones en la variabilidad impuestas aun en la fase de producción del hormigón.

La variabilidad de los parámetros del tránsito, se aplica en la simulación con el objetivo de evaluar la variabilidad de la vida útil, es decir el tiempo en años hasta el límite $PSI_{Terminal}=2,0$.

Los resultados obtenidos demuestran que tanto para pavimentos de asfalto como de hormigón, el COV se ubica en los 35% y la vida útil en años alcanza valores entre 8 y 38 años, con probabilidad de falla entre 50 y 55% representado por el porcentaje de tramos que no alcanzaría los 20 años de vida útil ($\% < 20$ años).

El análisis de la variabilidad combinada de los parámetros de tránsito y espesor de la capa superior representando la variabilidad simultánea de oferta y demanda, para los pavimentos de asfalto $TMDAc+h_1$ (mm) presenta resultados bastante similares a

la evaluación del tránsito en términos de la variabilidad y pérdida de vida útil y para los pavimentos de hormigón TMDAc+D(mm) presenta resultados similares al del escenario con variabilidad de D.

El escenario en que varían Sc+TMDAc en conjunto, el comportamiento se asemeja a los resultados de la variación del TMDAc, tanto en variabilidad como en pérdida de vida útil.

En cuanto a las FDP, las más frecuentes son la Lognormal, para los resultados en Nt y Gamma para los resultados de vida útil en años.

Análisis del efecto por nivel de tránsito

Con el sentido de evaluar las posibles diferencias de variabilidad entre los distintos niveles de tránsito evaluados, los resultados en la vida útil simulada por del nivel de tránsito se aplica el test de análisis de varianza (ANOVA) evaluando como un experimento aleatorio del tipo *Randomized Block Design* (RBD), entre tratamientos (niveles de tránsito) y bloques (parámetros) aplicando el siguiente test de hipótesis (Ayyub & McCuen, 2011).

Hipótesis nula $\rightarrow H_0$ – no hay diferencia entre os niveles de tránsito

Hipótesis alternativa $\rightarrow H_A$ – no se puede afirmar que no hay diferencia entre los niveles de tránsito

La hipótesis nula se rechaza cuando $F_{crit} < F_{obs}$.

En los resultados presentados en la Tabla 23, se observa que no hay diferencias significativas entre los distintos niveles de tránsito para los pavimentos de asfalto y que para los pavimentos de hormigón el único parámetro en que la hipótesis nula se rechaza, es decir hay diferencia entre los niveles de tránsito, es para el Sc+TMDAc.

Tabla 23 – Análisis de variabilidad por nivel de tránsito

Tipo de Pavimento	Parámetro	F _{obs}	F _{crit.}	Valor-p	α	H ₀
Pavimento de Asfalto	h1	1,046332	3,000228	0,351416	0,05	Acepta
	MR_SR	0,811413	3,000228	0,444376	0,05	Acepta
	SN	1,7875	3,000228	0,167646	0,05	Acepta
	TMDAc	2,082857	3,000228	0,124844	0,05	Acepta
	SN+h1	0,671191	3,000228	0,511215	0,05	Acepta
	TMDAc+h1	1,046332	3,000228	0,351416	0,05	Acepta
Pavimento de Hormigón	TMDA	0,687253	3,000228	0,503074	0,05	Acepta
	Sc	1,94647	3,000228	0,143048	0,05	Acepta
	D	0,563651	3,000228	0,569218	0,05	Acepta
	D+TMDAc	0,735853	3,000228	0,479226	0,05	Acepta
	Sc+TMDAc	8,161695	3,000228	0,000295	0,05	Rechaza
	kc	1,963546	3,000228	0,140631	0,05	Acepta

Conforme presentado anteriormente en la Tabla 22, cuando aplicada la variabilidad combinada del Sc+TMDAc el nivel de tránsito 3E6 es afectado más significativamente con un 21% de posibilidad de no alcanzar los 20 años de vida útil, mientras que para los niveles de tránsito 10E6 y 20E6 la posibilidad no alcanzar 20 años es de solamente 3%.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Cuando que se aplica la variabilidad de los parámetros con el objetivo de evaluar el desempeño y la vida útil de un pavimento existente, los efectos ocurren en recurrencia de la capacidad de la estructura en soportar el tránsito, mismo que no sea considerado cambio en la sollicitación de tránsito.

La variabilidad de los parámetros de la estructura y materiales que más impactan en la vida útil, h_1 (mm) y D (mm), podría ser interpretada como un producto más bien de los procesos constructivos, y afecta de igual forma los pavimentos de asfalto y hormigón.

Por otro lado, la variabilidad inherente al ambiente en que se construye los pavimentos está fuertemente relacionada al suelo de subrasante y afecta más significativamente los pavimentos de asfalto.

Cuando se evalúa el efecto de la variabilidad en la fase de diseño, los resultados muestran que la necesidad estructural varía en función de la variabilidad, tanto en términos de tránsito como para el suelo.

Para los pavimentos de asfalto, el parámetro que más influye en el diseño es el módulo resiliente de la subrasante (MR_{SR}), a su vez los pavimentos urbanos de hormigón el parámetros más significativo en el diseño del espesor de la losa de hormigón (D), es el tránsito ($TMDAc$).

5.1 Conclusiones

A partir de los resultados presentados anteriormente se busca aceptar o rechazar la hipótesis de la investigación, la cual sostiene que los principales parámetros que explican la variabilidad del desempeño de pavimentos urbanos son la variabilidad del tránsito urbano, de la capacidad de soporte de los suelos de fundación y del módulo elástico de las capas que componen la estructura de los pavimentos.

La hipótesis planteada en la investigación se acepta en el sentido de que la variabilidad producto de la incertidumbre en la estimación de la capacidad de soporte de los suelos de fundación afecta el desempeño de los pavimentos, así como la variabilidad del desempeño está relacionada a la variabilidad del tránsito urbano. La precisión de los módulos elásticos de los materiales, E_1 y E_C , explica en parte la variabilidad del desempeño, sin embargo es dependiente del método de análisis utilizado, conforme conclusiones presentadas a la continuación.

- La variabilidad del tránsito urbano, en términos de flujo de vehículos comerciales TMDAc, impacta en la variabilidad del desempeño en términos de vida útil en años entre 8 y 38 años con un COV 35%, y probabilidad de falla entre 50 y 55%, además afecta igualmente ambos los tipos de pavimentos.
- La variabilidad producto incertidumbre en la estimación de la capacidad de soporte de los suelos de fundación influye directamente en la variabilidad en el desempeño de los pavimentos de asfalto COV entre 103 y 115% y probabilidad de falla entre 16 y 20%, y de forma indirecta, combinado con

la capa de subbase, en el desempeño de los pavimentos de hormigón COV entre 19 y 25% y probabilidad de falla entre 0,3 y 1,2%.

- La variabilidad de los módulos elásticos de los materiales de las capas de asfalto, representado por el coeficiente estructural a_i , y del hormigón E_c , no son determinantes en la variabilidad del desempeño cuando este es inferido por modelos empíricos, pero tiene importante efecto sobre las tensiones de tracción ϵ_t y deformación permanente ϵ_v en los pavimentos asfáltico, cuando evaluados por modelos empírico-mecanicistas.

Una observación importante se debe hacer en relación a los resultados obtenidos en la evaluación de la variabilidad del espesor de las capas de asfalto h_1 (mm) y hormigón D (mm), siendo una importante fuente de variabilidad en el desempeño y vida útil de los pavimentos urbanos.

5.2 Recomendaciones de futuras investigaciones

Los resultados obtenidos en la investigación explicitan la necesidad de estudiar y conocer mejor el comportamiento del tránsito urbano, siendo el parámetro que más afecta y restringe el desempeño de los pavimentos, además de limitar la aceptación de variabilidad en la capacidad de soporte del suelo.

- Verificar en la etapa de diseño el rango de valores que el tránsito en términos de Ejes Equivalentes podría variar durante el período de vida útil.
- Limitar durante la fase de construcción el rango de valores aceptables, mínimo y máximo del parámetro relativo a la capacidad de soporte del suelo,

MR (MPa) o k_c (MPa/m), para el cual cada estructura diseñada sigue siendo apropiada.

- Controlar, además de la variación aceptada en las características de los materiales y espesores, también la fracción defectuosa y la dispersión en la etapa de ejecución de las capas de los pavimentos.

Con la finalidad de seguir evolucionando en el tema de la variabilidad en ambiente urbano se recomienda que para las futuras investigaciones con la finalidad de desarrollar un método de diseño propio para pavimentos urbanos.

- Validar los resultados utilizando métodos empírico-mecanicistas, evaluando la variabilidad en términos de falla por fatiga y deformación permanente para pavimentos de asfalto y en términos de tensión en el borde de la losa en los pavimentos de hormigón.
- Evaluar la variabilidad y sus efectos en estructuras de pavimentos con distintos materiales.
- Monitorear y evaluar la variabilidad en las condiciones climáticas y cómo considerarla adecuadamente en el diseño conjuntamente a la variabilidad del tránsito, determinar sus efectos en las condiciones funcional y estructural de los pavimentos urbanos.
- Describir la evolución de los deterioros en función del clima y tránsito, en el sentido de avanzar para el desarrollo de un método de diseño propio para pavimentos urbanos.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abaza, K. A. (2002). Optimum flexible pavement life-cycle analysis model. *Journal of Transportation Engineering*, 128(6), 542–549.
- Alhasan, A., Ali, A., Offenbacher, D., Smadi, O., & Lewis-Beck, C. (2018). Incorporating spatial variability of pavement foundation layers stiffness in reliability-based mechanistic-empirical pavement performance prediction. *Transportation Geotechnics*, 17(May), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.001>
- Ali, B., Sadek, M., & Shahrour, I. (2009). Finite-Element model for urban pavement rutting: Analysis of pavement rehabilitation methods. *Journal of Transportation Engineering*, 135(4), 235–239.
- Augeri, M. G., Greco, S., & Nicolosi, V. (2019). Planning urban pavement maintenance by a new interactive multiobjective optimization approach. *European Transport Research Review*.
- Ayyub, B. M., & McCuen, R. H. (2011). *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists*. (Taylor & Francis Group (ed.); 3rd Editio).
- Bushman, R., Berthelot, C., & Taylor, B. (2003). Commercial Vehicle Loading in Urban Environments. *2003 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, November*.

- Carey Jr, W. N., & Irick, P. E. (1960). The pavement serviceability performance concept. *Highway Research Board Bulletin*, 250, 40–58.
- Carvalho, R. L. (2006). *Mechanistic-Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study*. University of Maryland.
- Carvalho, R. L. (2012). *Prediction of Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. Department of Civil and Environmental Engineering.
- CChC. (2018a). *Infraestructura Crítica para el Desarrollo 2018-2027. Anexos* (Cc. Cámara Chilena de la Construcción (ed.)). https://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/ICD_2018_anexo_con_tapas.pdf
- CChC. (2018b). *Infraestructura Crítica para el Desarrollo 2018-2027*. <https://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/ICDResumen2018.pdf>
- Chamorro, A., Osório, A., Videla, C., Videla, C., Tighe, S., Gillmore, R., Mourgues, C., & Godoy, P. (2015). *Proyecto FONDEF D09I1018 - Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile* (Vol. 1).
- Delatte, N. J. (2008). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance* (1 edition). Taylor & Francis.
- Dilip, D. M., Ravi, P., & Sivakumar Babu, G. L. (2013). System reliability analysis of flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 139(10), 1001–1009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000578)
- Ebels, L.-J. (2016). BRT and Public Transport Networks –Pavement Design Considerations for Bus Lanes. *80th IMESA CONFERENCE*.
- FAA. (2011). *AC 150/5370-11B: Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of*

Airport Pavements, 30 September 2011. www.faa.gov

- Fernandes, F. D. S. (2013). *Testes de Ajuste a Distribuições Estatísticas e Métodos para Estimação dos Parâmetros em Análises de Fiabilidade*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- FHWA. (2006). *Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual*. Publication No. FHWA NHI-05-037. https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_details.cfm?id=555
- Gupta, A., Kumar, P., & Rastogi, R. (2014). Critical review of flexible pavement performance models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), 142–148. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0255-2>
- Hall, K. T., Darter, M. I., Hoerner, T. E., & Khazanovich, L. (1997). LTPP Data Analysis. Phase I: Validation of Guidelines for K-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction. In *FHWA-RD-96-198*.
- Hall, K. T., & Mohseni, A. (1991). Backcalculation of Asphalt Concrete-Overlaid Portland Cement Concrete Pavement Layer Moduli. *Transportation Research Record 1293*, 112–123.
- Hastak, M., & Baim, E. J. (2001). Risk factors affecting management and maintenance cost of urban infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 7(2), 67–76.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (Second Edi). Pearson Prentice Hall.
- Hughes, C. S. (1996). *Synthesis of Highway Practice 232. Variability in Highway Pavement Construction*. National Cooperative Highway Research Program.
- INE, I. N. de E. (n.d.). *Parque de vehículos en circulación*. Retrieved November 2, 2020, from <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y->

comunicaciones/permiso-de-circulacion

- Jiang, Y. J., Selezneva, O., Mladenovic, G., Aref, S., & Darter, M. (2003). Estimation of Pavement Layer Thickness Variability for Reliability-Based Design. *Transportation Research Record, 1849*, 156–165. <https://doi.org/10.3141/1849-17>
- Kalita, K., & Rajbongshi, P. (2015). Variability characterisation of input parameters in pavement performance evaluation. *Road Materials and Pavement Design, 16*(1), 172–185.
- Kamplimath, H. M., M, V., Vijay, K., & Bhargav, Y. (2013). Traffic Growth Rate Estimation Using Transport Demand Elasticity Method: A Case Study For National Highway-63. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, 3*(2), 29–34. <https://doi.org/10.26634/jce.3.2.2272>
- Kim, H. B., & Buch, N. (2003). Reliability-Based Pavement Design Model Accounting For Inherent Variability Of Design Parameters. *82nd Transportation Research Board Annual Meeting*.
- Kim, H. B., & Lee, S. H. (2002). Reliability-based design model applied to mechanistic empirical pavement design. *KSCE Journal of Civil Engineering, 6*(3), 263–272. <https://doi.org/10.1007/bf02829149>
- Koorey, G. F., Mitchell, T. J., C.R.Fisk, S.F.Moynihan, & M.K.Mara. (2000). *Traffic Growth Prediction. Transfund New Zealand Research Report No. 191*.
- Liu, L. (2015). Characterisation of variability in highway pavement materials and construction. *International Journal of Pavement Engineering, 16*(9), 761–770.
- Llopis-Castelló, D., García-Segura, T., Montalbán-Domingo, L., Sanz-Benlloch, A., &

- Pellicer, E. (2020). Influence of pavement structure, traffic, and weather on urban flexible pavement deterioration. *Sustainability (Switzerland)*, 12(22), 1–20.
- Loprencipe, G., Pantuso, A., & Di Mascio, P. (2017). Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs. *Sustainability (Switzerland)*, 9(3).
- Lu, Q., Zhang, Y., & Harvey, J. T. (2009). Growth of truck traffic volume for mechanistic-empirical pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 161–172. <https://doi.org/10.1080/10298430802169408>
- Lundstrom, R., Ekblad, J., Isacson, U., & Karlsson, R. (2007). Fatigue modeling as related to flexible pavement design state of the art. *Road Materials and Pavement Design*, 8(2), 165–205. <https://doi.org/10.3166/rmpd.8.165-205>
- MINVU. (2008). *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*.
- MINVU. (2009). *Manual de Vialidad Urbana: Recomendaciones para el diseño de elementos de infraestructura vial urbana*.
- MINVU. (2017). *MINVU - Ministerio de vivienda y Urbanismo*. <https://www.minvu.cl/sobre-minvu/organigrama-minvu/>
- MINVU, M. de V. y U. (n.d.). *Pavel- Sistema de Pavimentación en Línea*. Retrieved June 2, 2020, from <http://pavel.metropolitana.minvu.cl/>
- MOP, D. de V. – C. (2020). Manual de Carreteras - Volumen N°3 - Instrucciones y Criterios de Diseño. In *Mop* (Vol. 4, Issue 1).
- MTT, M. de T. y T. (n.d.). *SECTRA - Programa de Vialidad y Transporte Urbano*.

Retrieved December 17, 2020, from
http://www.sectra.gob.cl/quienes_somos/que_es_sectra.htm

- Mun, S. (2014). Inversion analysis to determine design parameters for reliability assessment in pavement structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(10), 845–855. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0507>
- NCHRP, N. C. H. R. P. (2003). *Appendix EE-1: Input data for the calibration and validation of the design guide for new constructed flexible pavement sections*.
- Noureldin, A. S. (1993). New Scenario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavements. *Transportation Research Record 1384*, 23–28.
- Noureldin, A. S., Sharaf, E., Arafah, A., & Al-Sugair, F. (1994). Estimation of standard deviation of predicted performance of flexible pavements using AASHTO model. In *Transportation Research Record 1449* (Issue 1449, pp. 46–56).
- OCDE. (2017). *Brechas y estándares de gobernanza de la infraestructura pública en Chile. Análisis de Gobernanza de infraestructura* (Éditions OCDE (ed.)). OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264286948-es>
- Osorio, A. (2015). *Development of Performance Models and Maintenance Standards of Urban Pavements for Network Management*.
- Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S., & Videla, C. (2015). Calibration and Validation of Condition Indicator for Managing Urban Pavement Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2455(1), 28–36.
- Packard, R. G. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements - PCA 84. In *Portland Cement Association*.

- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). Pavement Design and Materials. In *Pavement Design and Materials*. John Wiley & Sons.
- Rodríguez Moreno, M. A. (2014). Determinación de la confiabilidad implícita en el método de diseño estructural de pavimentos flexibles AASHTO-93 en base a modelos de predicción del deterioro. In *Tesis Doctoral*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Roesler, J. R., Chavan, H., King, D., & Brand, A. S. (2016). Concrete slab analyses with field-assigned non-uniform support conditions. *International Journal of Pavement Engineering, 17*(7), 578–589. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1007231>
- Romanoschi, S. A., Momin, S., Bethu, S., & Bendana, L. (2011). Development of traffic inputs for new Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record, 2256*, 142–150. <https://doi.org/10.3141/2256-17>
- Sabih, G., & Tarefder, R. A. (2016a). Impact of variability of mechanical and thermal properties of concrete on predicted performance of jointed plain concrete pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology, 9*(6), 436–444. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.09.005>
- Sabih, G., & Tarefder, R. A. (2016b). Impact of variability of mechanical and thermal properties of concrete on predicted performance of jointed plain concrete pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology, 9*(6), 436–444.
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia, 126*(5), 1763–1768.
- Sebaaly, P. E., & Bazi, G. M. (2005). Impact of Construction Variability on Pavement

- Performance. In *NDOT Research Report RDT 06-004* (Issue December).
- SECTRA. (n.d.). *Biblioteca de Sectra*. Retrieved February 7, 2020, from http://www.sectra.gob.cl/biblioteca/listado_corto1.asp
- SECTRA. (2012). *Encuesta Origen Destino Santiago 2012 Informe Final Volumen II*. 1–291.
- SEDATU, S. de D. A. T. y U. (2013). *Manual de calles: diseño vial para ciudades mexicanas*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Selezneva, O., Darter, M., Zollinger, D., & Shoukry, S. (2003). Characterization of Transverse Cracking Spatial Variability: Use of Long-Term Pavement Performance Data for Continuously Reinforced Concrete Pavement Design. *Transportation Research Record, 1849*, 147–155. <https://doi.org/10.3141/1849-16>
- SERVIU. (2018). *Manual de obras viales, pavimentación y aguas lluvias* (p. 471).
- Shah, Y. U., Jain, S. S., Tiwari, D., & Jain, M. K. (2013). Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 104*, 332–341.
- Solminihac, H. D., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). Gestión de Infraestructura Vial. In *Gestión de Infraestructura Vial* (Tercera Ed, pp. 133–137).
- Tayabji, S. D., & Wu, C. L. (2002). Variability of concrete materials data in long-term pavement performance program. *Transportation Research Record, 1813*, 181–190.
- Theyse, H. L., & Muthen, M. (2000). Pavement Analysis and Design Software (Pads) Based on the South African Mechanistic-Empirical Design Method. *South African Transport Conference*, 1–41.

- Tighe, S. (2001). Guidelines for probabilistic pavement life cycle cost analysis. *Transportation Research Record*, 1769, 28–38. <https://doi.org/10.3141/1769-04>
- Tighe, S., Ken, H., & Haas, R. (2007). Environmental and traffic deterioration with mechanistic-empirical pavement design model: Canadian example. *Transportation Research Record*, 2(1989), 336–343. <https://doi.org/10.3141/1989-81>
- Timm, D. H., Newcomb, D. E., & Galambos, T. V. (2000). Incorporation of Reliability into Mechanistic-Empirical Pavement Design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1730(1), 73–80.
- Valle, P. D., & Thom, N. (2016). Variability in Pavement Design. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 16(2), 50–67.
- Valle, P. D., & Thom, N. (2020). Pavement layer thickness variability evaluation and effect on performance life. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(7), 930–938. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1517873>
- Vancura, M. (2013). *Evaluation of In-Situ Variability of Concrete Pavement Characteristics and Their Effect on Performance. Thesis (PhD)*. UNIVERSITY OF MINNESOTA.
- Vancura, M., Khazanovich, L., & Barnes, R. (2013). Concrete pavement thickness variation assessment with cores and nondestructive testing measurements. *Transportation Research Record*, 2347, 61–68.
- Weijermars, W. A. M. (2007). *Analysis of urban traffic patterns using clustering*. University of Twente. Enschede, Netherlands.
- Whiteley, L., Tighe, S., & Zhang, Z. (2005). Incorporating variability into life cycle cost

analysis and pay factors for performance-based specifications. *Transportation Research Record*, 2005(1940), 13–20.

Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). Principles of Pavement Design. In *Principles of Pavement Design*. <https://doi.org/10.1002/9780470172919>

Yogesh, U. S., Jain, S. S., & Devesh, T. (2016). Adaptation of HDM-4 Tool for Strategic Analysis of Urban Roads Network. *Transportation Research Procedia*, 17(December 2014), 71–80.

ANEXOS

A. TOMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

A.1. Tramos de estudio

Serán evaluados tramos de pavimentos de vías ubicadas en 9 comunas de Santiago, en los cuales en los pavimentos exista solamente un tipo de material en las capas superiores, asfalto u hormigón.

A.1.1. Espesor y materiales de las capas de rodado

Los espesores de las capas superiores de los pavimentos fueran obtenidos través la extracción de testigos de los materiales en terreno, los valores fueran registrados en milímetros, el resumen es presentado en la Tabla 24.

Tabla 24: Espesores por tipo de pavimento

Tipo	N	Media (mm)	Desviación Estándar (mm)	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Asfáltico	102	103,93	49,41	47,54	42,50	219,30
Hormigón	159	173,32	35,40	20,43	89,43	270,98

A.1.2. Deflectometría de impacto

Los datos de deflectometría de impacto fueron obtenidos por el levantamiento de deflectometría que se realizó entre mayo y julio de 2013, en los tramos de estudio en la Región Metropolitana de Santiago, listados en la Tabla 25.

Para el trabajo se utilizó un defleómetro pesado, *Heavy Weight Deflectometer*, modelo *Dynatest* HWD 8081, aplicando cargas de 40kN y 50kN registrando las lecturas en 9 puntos través de geófonos, incluido el punto de aplicación de carga.

Tabla 25: Cantidad de tramos con levantamiento defleométrico

Tipo	FWD
Asfáltico	44
Hormigón	69
Total	103

A.1.3. Datos de tránsito

Las informaciones de tránsito recopiladas de los informes disponibles en la biblioteca del Programa de Vialidad y Transporte Urbano SECTRA, de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), organismo técnico a cargo de la planificación de transporte, (MTT, n.d.), los documentos y los datos utilizados están listados a la secuencia.

Encuesta Origen Destino Santiago 2012

Fueron obtenidas informaciones sobre la evolución de población y tasa de motorización entre los años de 2001-2012, considerando la tasa de crecimiento del tránsito constante en el período y proyectando para el próximo período.

Además también se sacaron los datos de distribución tipo de camiones por número de eje y porcentaje de camiones cargados y vacíos, través de los resultados de encuesta de interceptación, realizada en 10 puntos de control.

Mediciones de Aforos de Tráfico y Perfiles de Carga en Servicios Troncales en el Gran Santiago – Informe Final

Del presente estudio se obtuvieron informaciones sobre la condición de utilización de los buses urbanos en la ciudad de Santiago, las tasas de ocupación y la flota de buses en circulación clasificada por tipo y tamaño de bus.

Actualización de perfiles de flujos del modelo modem para el Gran Santiago y Regiones

Fueron obtenidos valores de flujo de tránsito, en términos de TMDA, medido través de campañas de mediciones utilizando dos sistemas de recolección de información: un sistema automático de monitoreo de tráfico vehicular realizada durante 24 horas por 7 días en los meses de mayo a julio de 2015.

De la campaña de clasificación manual de flujo se obtuvieron información sobre las categorías de vehículos, incluso su variación por comuna de la Región Metropolitana de Santiago.

A.2. Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos disponibles permite la adquisición de los datos faltantes para la ejecución del experimento, conforme detallado en la Figura 19 y descrito a seguir.

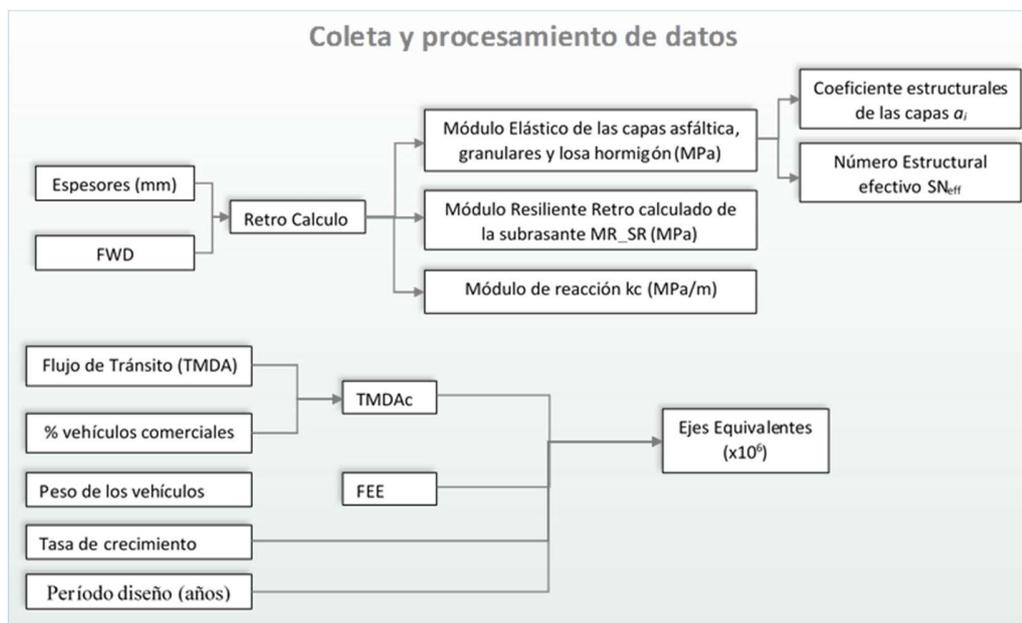


Figura 19: Flujo de procesamiento de datos

A.3. Parámetros relativos a los materiales y estructura

A.3.1. Retro cálculo

El proceso matemático del retro cálculo posibilita a la determinación de las propiedades de las capas del pavimento de forma a que las deflexiones medidas con el FWD ajusten a las deflexiones teóricas calculadas. (Huang, 2004)

Como resultado serán obtenidos valores de Módulo Resiliente retro calculado para la subrasante (MR_SR), Módulo de Reacción (kc) de subrasante de los pavimentos rígidos, módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E_p), módulo de elasticidad (E) de las capas de asfalto, granular y losa de hormigón.

Utilizando correlaciones establecidas en la literatura para determinación de los valores de los coeficientes estructurales de las capas a_i y el número estructural efectivo SN_{Eff} del pavimento asfáltico.

Pavimento Asfáltico

El proceso de retro cálculo presentado por Noureldin, (1993) considera dos escenarios distintos para evaluación y retro cálculo de cuenco deflectométrico, el primer (1) cuando la estructura del pavimento es conocida y segundo (2) cuando la estructura no es conocida o no está disponible. En este estudio se ha utilizado el escenario 2, pues son conocidos solamente los espesores de la capa asfáltica del pavimento.

Según Noureldin, (1993) existe un único punto en la superficie del pavimento ubicado a una distancia r_x del punto de aplicación de carga en que la deflexión D_x es exactamente igual a la deflexión de un punto en la parte superior del subsuelo debajo del centro de carga, conforme ilustrado en la siguiente Figura 20.

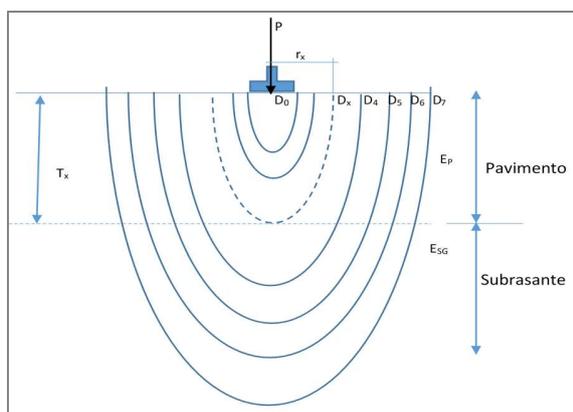


Figura 20: Líneas de contorno de deflexiones en el pavimento, Noureldin, (1993)

Cuando se encuentra este punto r_x , es posible calcular los valores del módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E_p), el módulo de subrasante (E_{SG}), el

espesor total efectivo (Tx), además de las deflexiones en el top de la subrasante y del pavimento en el punto de aplicación de la carga utilizando las ecuaciones presentadas en la secuencia.

Conceptualmente el método se basa en la definición de que el espesor total de un pavimento es la suma de los espesores individuales de cada una de las capas del pavimento que están por sobre la subrasante, o también se puede decir que es la distancia vertical entre el top de la superficie de rodado del pavimento y la parte superior de una capa más débil dentro del sistema de pavimento, teniendo en cuenta que las capas del pavimento sean más rígidas que la subrasante, las dos definiciones son equivalentes.

Las ecuaciones utilizadas por el método son presentadas detalladamente en la secuencia.

$$E_{SG} = \frac{2,149}{r_x * D_x} \quad (\text{ec. A1})$$

$$E_P = \frac{716 - \frac{2,149}{r_x}}{D_0 - D_x} \quad (\text{ec. A2})$$

$$T_x = \left[\frac{D_0 - D_x}{D_x * \left(\frac{r_x}{3} - 1 \right)} \right]^{1/3} * (4r_x^2 - 36)^{1/2} \quad (\text{ec. A3})$$

A partir de los valores de Tx es posible estimar el espesor de la capa granular, suponiendo que sean base y subbase, través de la diferencia entre Tx y el espesor conocido de la capa de rodado, conforme esquema presentado en la Figura 21. Los resultados obtenidos son representados gráficamente en la Figura 22.

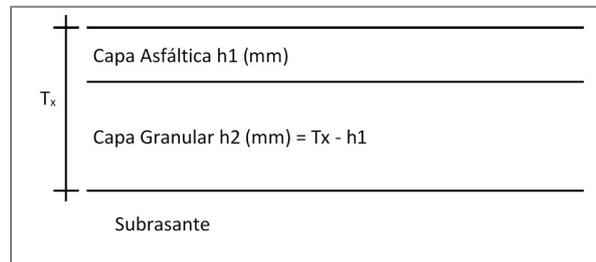


Figura 21: Espesor de las capas granulares

A partir de este conjunto de informaciones y con el soporte del software de análisis de pavimento que estima los módulos elásticos de las capas de pavimento Evercalc®, parte del Everseries® Pavement Analysis Programs del *Washington State Department of Transportation* (WSDOT), se inicia el retro cálculo con el objetivo de determinar los módulos resilientes de las capas asfálticas y granulares de la estructura del pavimento, sobretodo del revestimiento asfáltico.

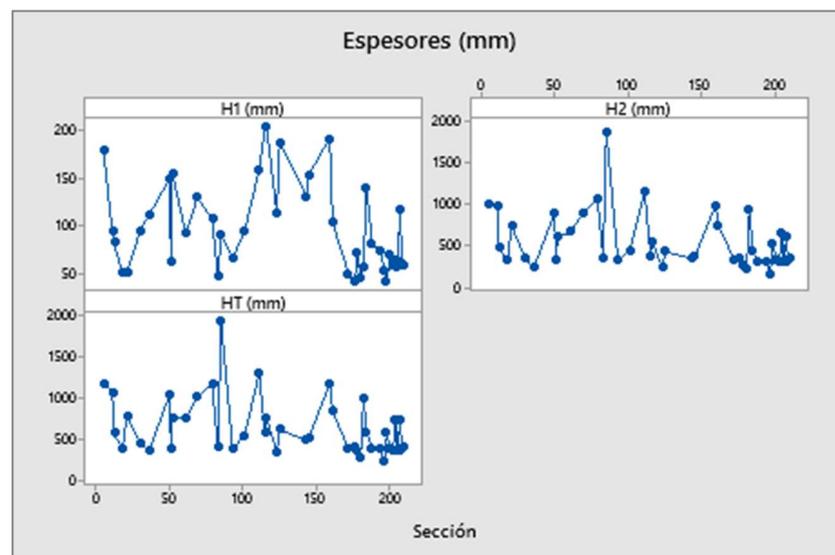


Figura 22: Espesores de las capas

El proceso de retro cálculo fuera realizado con los modelos de estructura, Figura 23, utilizando los valores obtenidos de los procesos descritos anteriormente, de modo que todas las capas tendrán sus módulos determinados por retro cálculo.

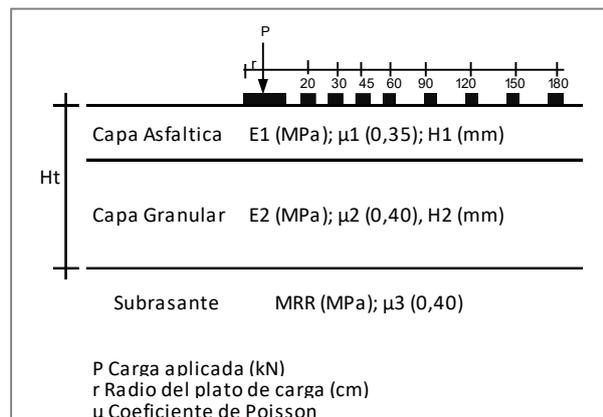


Figura 23: Modelo de estructura para retro cálculo

A.3.2. Root Mean Square – RMS (%)

El RMS es la diferencia entre los valores de deflexión medidos y los calculados por el proceso de retro cálculo y suele representar la bondad del ajuste del retro cálculo, sin embargo no es garantía de que los valores de módulos encontrados sean realistas. En este trabajo, por defecto, serán descartados los tramos que presenten RMS mayor a 20% por considerar que el retro cálculo no ha presentado solución válida.

Los resultados obtenidos son resumidos en la Figura 24.

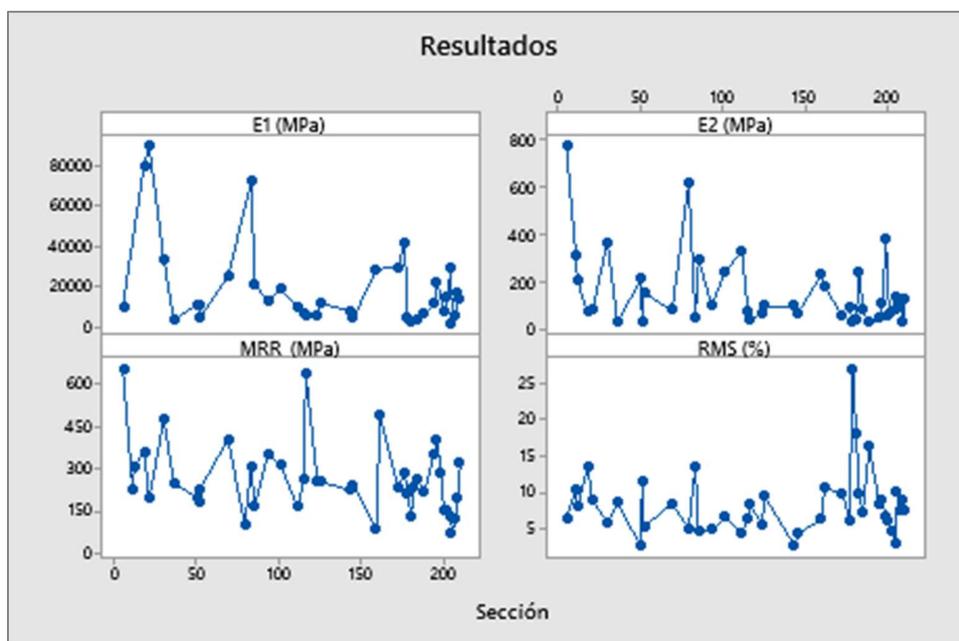


Figura 24: Resultados retro cálculo – pavimento asfáltico

Pavimentos de hormigón

Para el retro cálculo de los pavimentos de hormigón fuera utilizado el método analítico presentado en el *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* (AASHTO, 1993) citado por varios otros autores como Hall & Mohseni, (1991); Hall et al., (1997); FAA, (2011); Solminihac et al., (2018).

El proceso inicial por el cálculo del parámetro AREA del cuenco de deflexión, utilizando la ecuación presentada, través del radio de rigidez relativa (lk) el parámetro AREA puede ser relacionado al módulo de reacción de la subrasante (k) y al módulo elástico del hormigón (E_{PCC}).

$$AREA = 6 * \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad (\text{ec. A4})$$

$$l_k = \left[\frac{\ln\left(\frac{36-AREA}{1812,279}\right)}{-2,559} \right]^{0,228} \quad (\text{ec. A5})$$

$$k = \left(\frac{P}{8d_0 l_k^2} \right) * \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\ln \left(\frac{a}{2l_k} \right) + \gamma - 1,25 \right] \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right\} \quad (\text{ec. A6})$$

$$l_k = \left[\frac{E_{PCC} D_{PCC}^3}{12(1-\mu_{PCC}^2)k} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{ec. A7})$$

P= carga aplicada (9000lb)

d_i = deflexión medida

a=radio del plato de carga (5,9pul)

γ= constante de Euler (0,57721566490)

μ_{PCC} = coeficient de Poisson (0,15)

D_{PCC} = espesor de la losa de hormigón (pul)

El valor k obtenido por el proceso de retro cálculo es el k_{dinámico}, al paso que el valor k que se utiliza en el diseño de pavimentos de hormigón es el valor k_{estático}, eso es debido a las diferencias entre los ensayos de deflexión y de placa de carga. La corrección del valor es realizada por la relación $k_{estático} = k_{dinámico}/2$ (Huang, 2004).

A partir del valor del E_{PCC} y utilizando la correlación (ec. 8) determinada por el AASHTO, (1993) se puede determinar el valor del módulo de ruptura del hormigón S'_c, necesario para el diseño de la estructura de pavimento como para evaluación de desempeño por el método AASHTO93.

$$S'_c = 43,5 * \left(\frac{E}{10^6} \right) + 488,5 \quad (\text{ec. A8})$$

E=E_{PCC} (psi)

Los resultados obtenidos son presentados en la Figura 25.

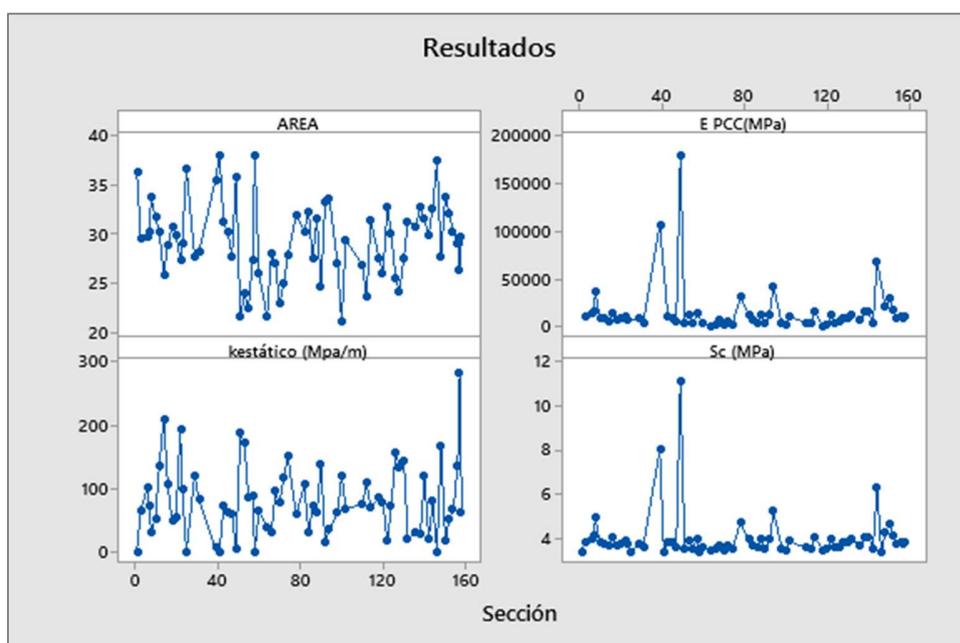


Figura 25: Resultado retro calculo pavimento hormigón

A.3.3. Tratamiento de outliers

La identificación de valores atípicos, *outliers*, se realizó través de análisis de los datos en gráficas de tipo *Box Plot*, o Grafica de Caja como los presentados en la Figura 26.

Esta grafica presenta los datos agrupados en el rango inter cuartil representados por la caja azul, Q1-Q3, la línea horizontal dentro de la caja es la mediana.

Las líneas verticales son los bigotes representan los 25% de los valores menores que el Q1 y mayores que el Q3, los limites inferiores y superiores de los bigotes son el

equivalente a $1,5 \times (Q1-Q3)$, los valores que se ubican fuera de estos límites son los *outliers* y son retirados de los análisis.

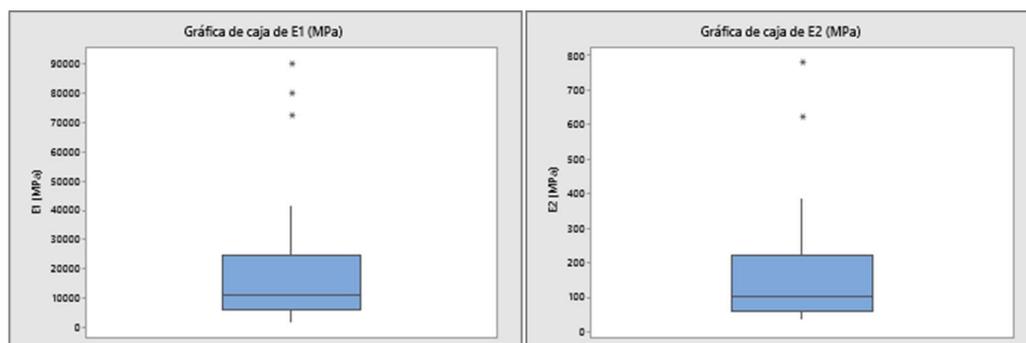


Figura 26: Identificación de *outliers*

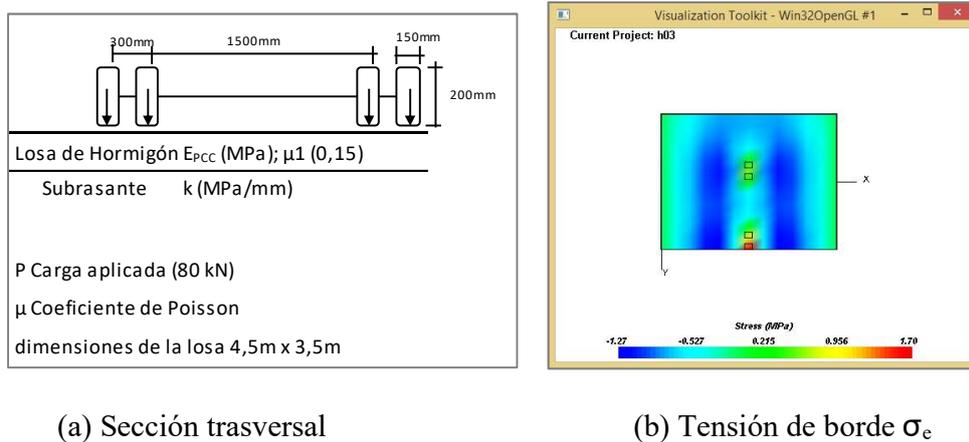
A.3.4. Análisis de vida remanente

Parte del proceso para determinar cuál es el cambio en el desempeño de los pavimentos producto de la variabilidad es evaluar que se espera del pavimento, según los análisis de vida remanente, es decir, cuanto más este pavimento puede servir al tránsito antes que alcanzar el límite de falla.

Para el pavimento asfáltico, el límite de falla es establecido por la fatiga de revestimiento (ϵ_t) y por la deformación permanente (ϵ_v), para el pavimento de hormigón el límite de falla es el Stress Ratio (SR).

La determinación del SR pasa por el proceso previo de determinación de la tensión de borde σ_e , que se realiza con el soporte del software EverFE 2.25. El análisis parte de la modelación de la estructura, con informaciones de la geometría, materiales y la carga aplicada, Figura 27. La carga es aplicada longitudinalmente en el centro de

la losa y transversalmente en la borda externa, simulando la situación de tensión en el punto crítico de la losa conforme teoría desarrollada por Westergaard (Huang, 2004).



(a) Sección transversal

(b) Tensión de borde σ_e

Figura 27: Estructura del pavimento de hormigón

Los resultados son presentados en la Figura 28. Para el σ_e no está establecido el límite de falla, para el SR los estudios han indicado que el $SR < 0,45$ indica que el número de ejes equivalente N_f es ilimitado.

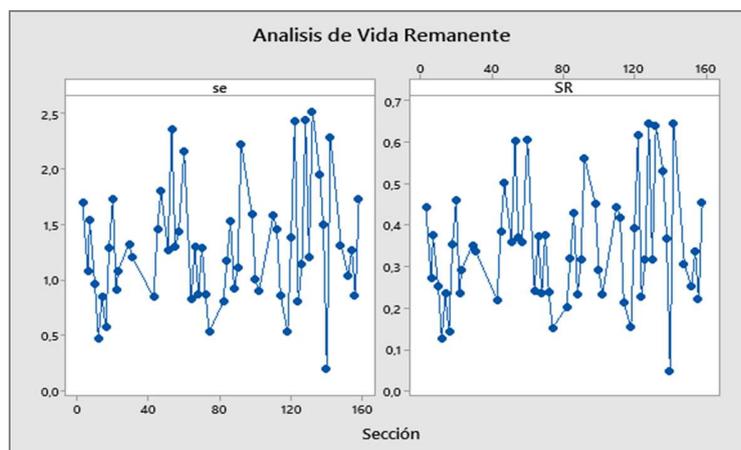


Figura 28: Resultados σ_e (MPa) y SR

Para la determinación del ϵ_t y ϵ_v de los pavimentos asfálticos la modelación parte de una estructura de 3 capas, asfáltica, granular y subrasante, utilizando los valores de módulos retro calculados E1, E2 y MRR., la Figura 29 ilustra la estructura, las carga del semi-eje estándar y puntos críticos de análisis. El análisis se realiza con soporte del software Elsym5 para análisis mecanicista.

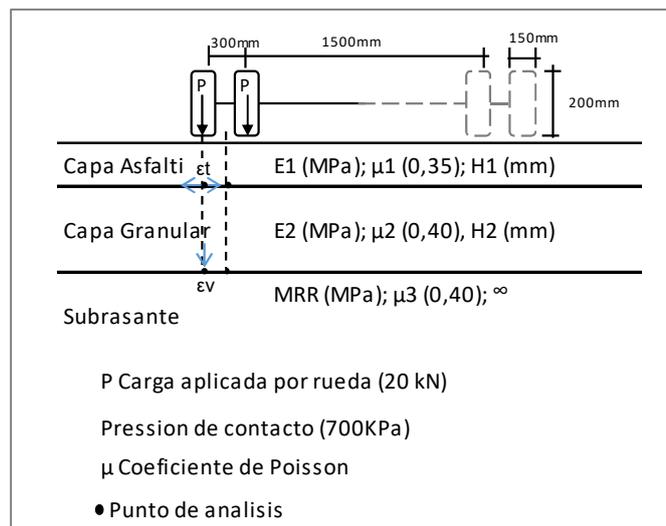


Figura 29: Estructura del pavimento asfáltico

Los resultados obtenidos son presentados en las Figuras 30 y 31.

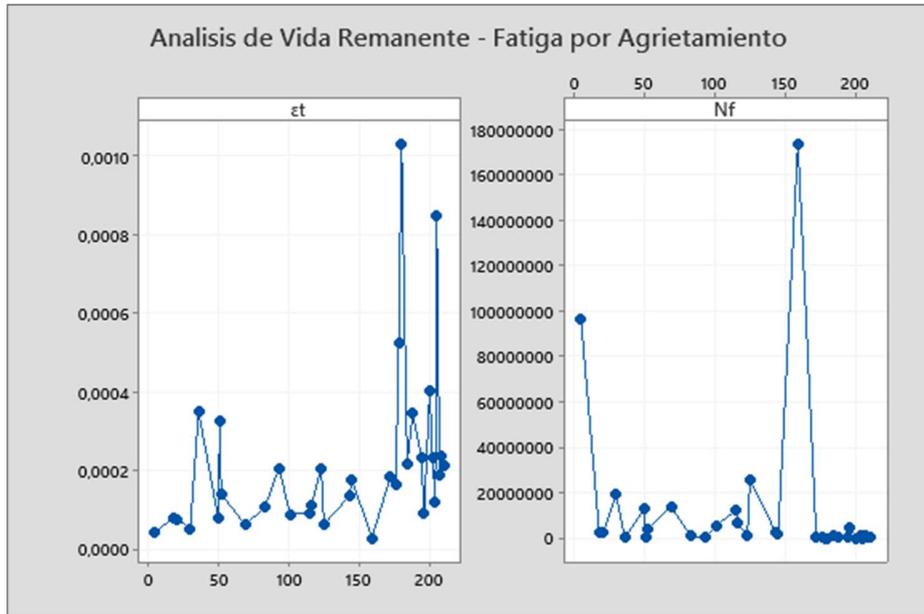


Figura 30: Resultados ϵ_t y N_f

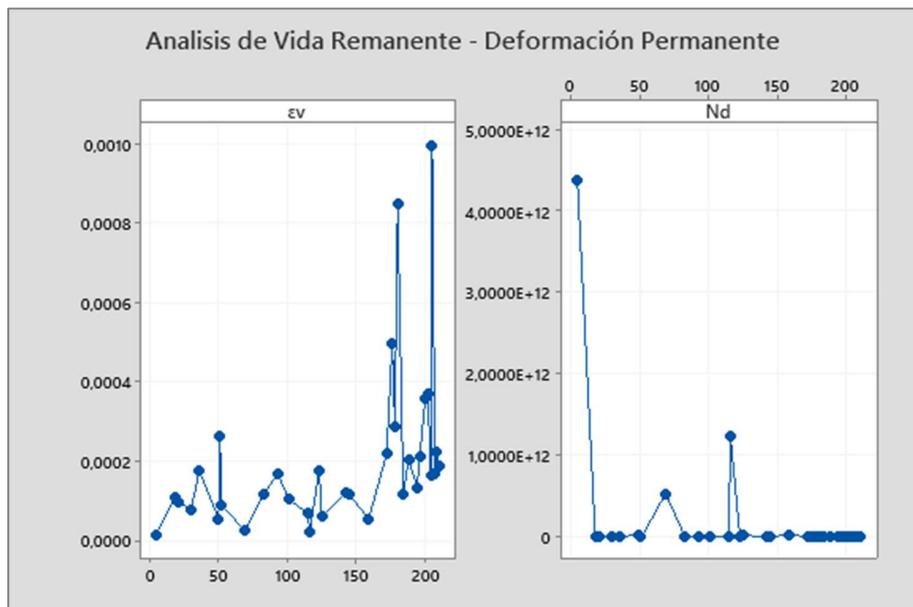


Figura 31: Resultados ϵ_v y N_R

A.4. Parámetros relativos al tránsito

A.4.1. Cálculo del Transito Medio Diario Anual – TMDA y TMDAc

A partir de los datos obtenidos, fueron calculados los valores de TMDAc a partir de la expansión de los datos de flujo diario medidos por 24 horas durante 7 días y la aplicación del porcentaje de vehículos comerciales en cada comuna, Figura 32 fueron determinados los valores de TMDAc para cada tramo, Figura 33.

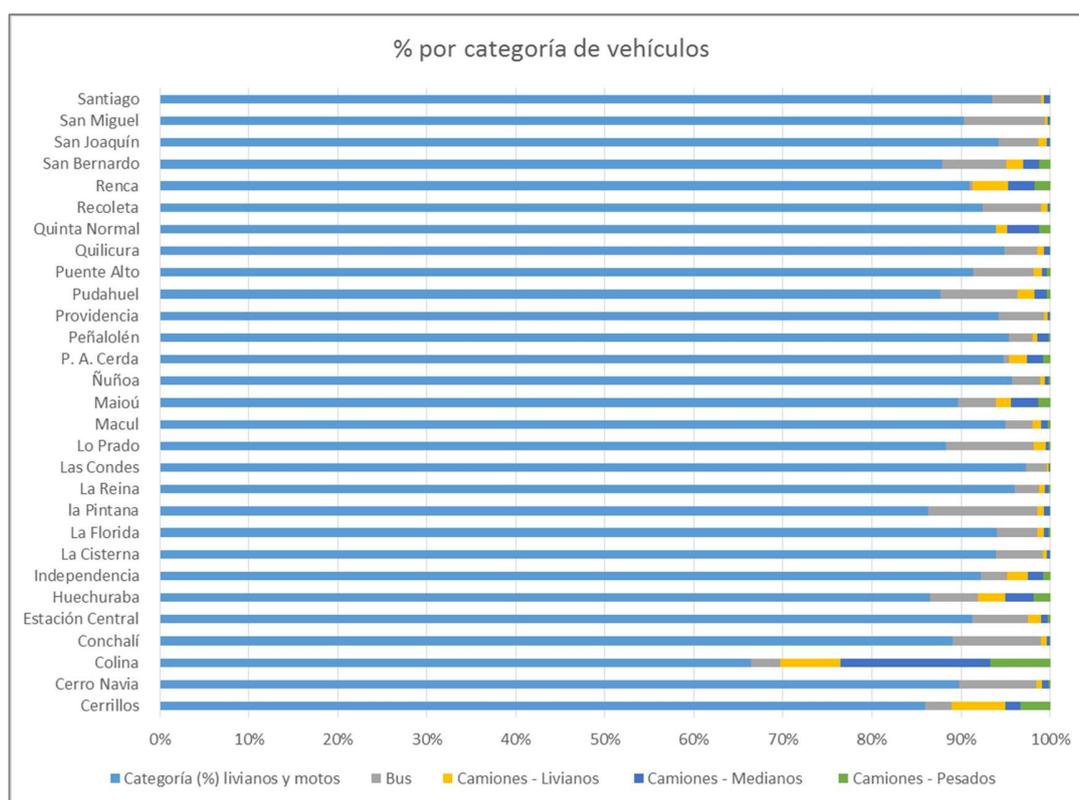


Figura 32: Distribución % por categoría de vehículo por comuna

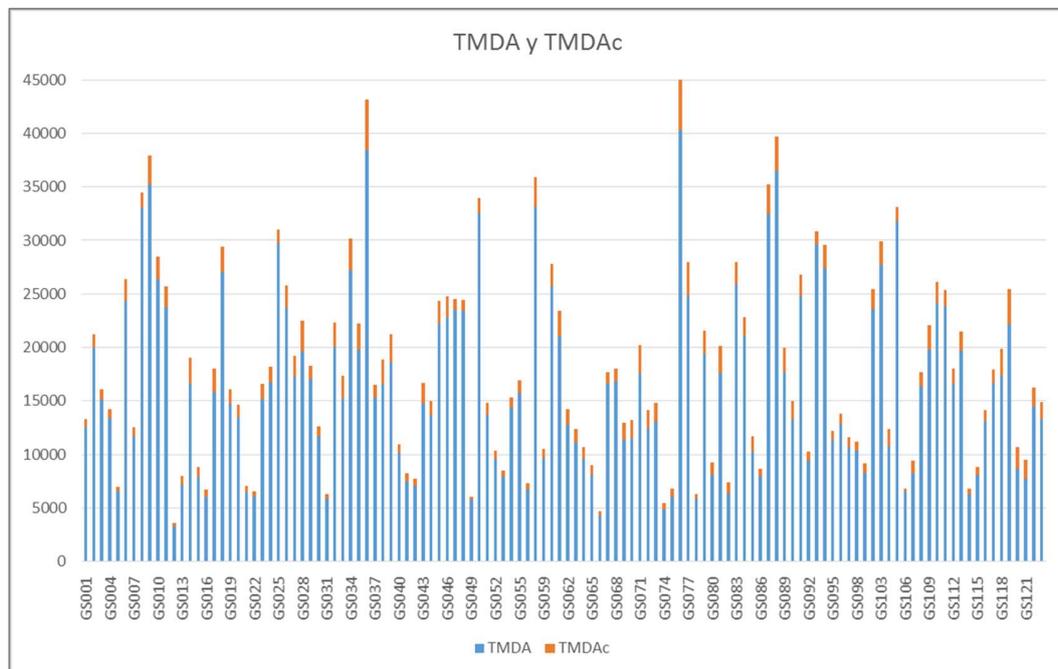


Figura 33 – TMDA y TMDAc (vehículos por día)

A.4.2. Calculo del Factor de Eje Equivalente – FEE y Truck Factor Tf

La determinación de los valores de FEE ($EALF$) se realizó según el método AASHTO93, descrito a seguir.

$$EALF = \frac{W_{tx}}{W_{18}} \quad (\text{ec. A9})$$

Pavimento flexible

$$\text{Log} \left(\frac{W_{tx}}{W_{18}} \right) = 4,79 \log(18 + 1) - 4,79 \log(L_x + L_2) + 4,33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (\text{ec. A10a})$$

$$G_t = \log \frac{4,2 - p_t}{4,2 - 1,5} \quad (\text{ec. A10b})$$

$$\beta_x = 0,4 + \frac{0,081(L_x+L_2)^{3,23}}{(SN+1)^{5,19}L_2^{3,23}} \quad (\text{ec. A10c})$$

Pavimento rígido

$$\text{Log} \left(\frac{W_{tx}}{W_{18}} \right) = 4,62 \log(18 + 1) - 4,62 \log(L_x + L_2) + 3,28 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (\text{ec. A11a})$$

$$G_t = \log \frac{4,5-p_t}{4,5-1,5} \quad (\text{ec. A11b})$$

$$\beta_x = 1 + \frac{3,63(L_x+L_2)^{5,20}}{(D+1)^{8,46}L_2^{3,52}} \quad (\text{ec. A11c})$$

L_x : Peso eje x (simple, doble o triple) en kips.

L_2 : Código del tipo de eje (1,2 y 3 respectivamente)

p_t : PSI_{terminal}

SN : Número estructural del pavimento asfáltico (pul.)

D : Espesor de la losa de hormigón

Para cada tipo de camión fue calculado el FEE en la condición 67% Lleno y 33% Vacío según información del EOD 2012 y la configuración de eje de los vehículos es presentada en la Tabla 26, los valores porcentuales por número de eje fueron utilizados para calcular el FEEc, ponderando el valor de FEE de cada tipo de camión por su % en la flota, este valor es utilizado para calcular los ejes equivalentes.

Tabla 26: Composición de la flota de camiones y FEEc

Tipo	No de eje	Cant	%	Peso Bruto Total	Tipo de Eje				FEE	
					ES RS	ES RD	ED RD	ET RD	Asfalto	Hormigón
Liviano	2	1824	32,4	< 7,5t	1	1			0,058	0,067
Mediano	3	454	8,1	7,5t – 16t	1		1		1,764	2,748
	4	872	15,5		1	1	1		4,343	5,059
Pesado	5	1529	27,1	>16t	1	2	1		6,941	7,391
	6	947	16,8		1	1	2		5,788	7,473
	7	8	0,1		1		3		4,635	7,555
	8	0	0,0						0,000	0,000
	9	1	0,0		1		1	2	4,208	8,569
FEEc									3,696	4,300

ESRS – Eje simples rodado simples, ESRD – Eje simples rodado doble, EDRD – Eje doble rodado doble, ETRD – Eje triple rodado doble

Fueron considerados valores de SN= 9,6pul y D=7pul., PSIt = 2,0.

Para el cálculo del FEEb para los buses, fueron utilizados los datos de nivel ocupacional por tipo de bus y la cantidad de bus por tipo en circulación con la finalidad de determinar el peso de los buses en servicio, y calcular el FEE para cada bus por nivel de ocupación Figura 34. A partir de entonces determinar el FEEb, ponderando el valor de FEE de cada tipo de bus por su % en la flota y nivel ocupacional, este valor es utilizado para calcular los ejes equivalentes, los valores son presentados en la Tabla 27.

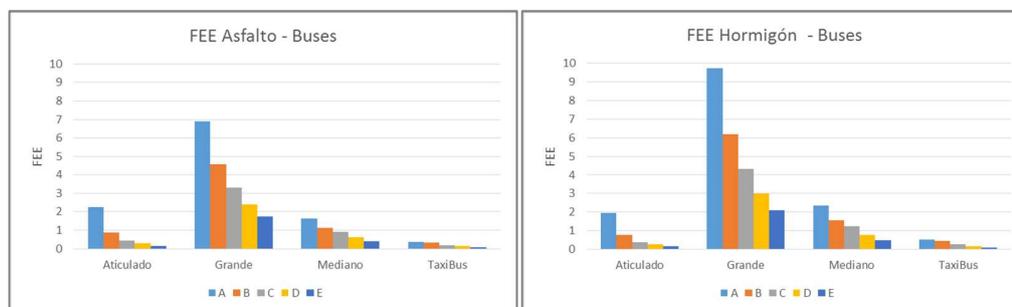


Figura 34: FEE por tipo de bus y nivel de ocupación.

Tabla 27: Resumen FEEb – Asfalto y Hormigón

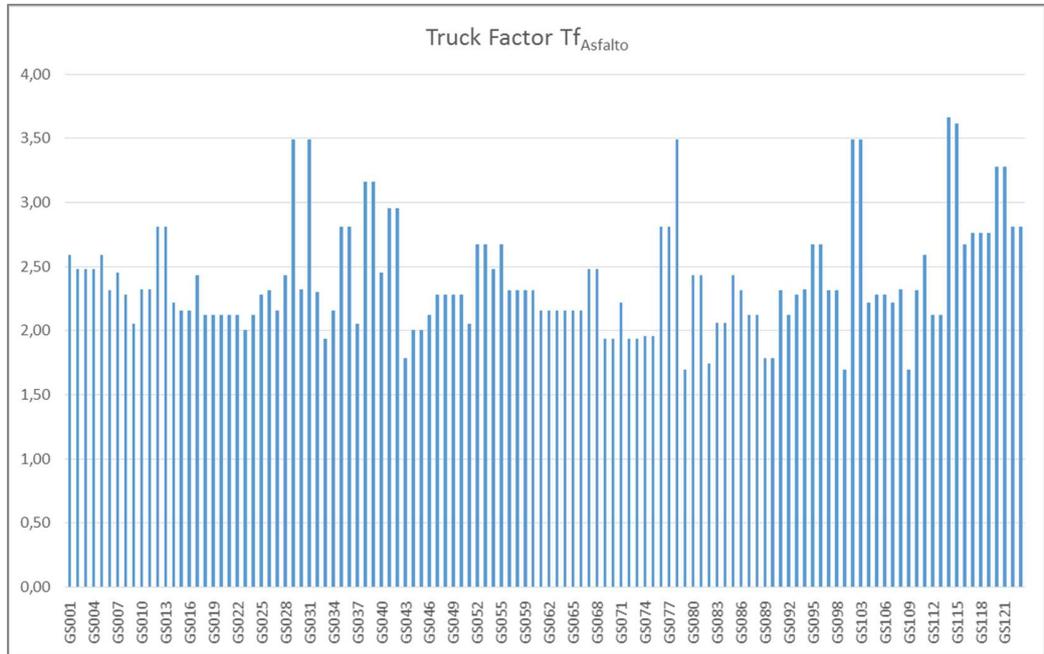
TIPO DE BUS	PASAJERO/BUS					BUS/CATEGORIA					TIPO BUS %	FEE Asfalto	FEE Hormigón
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E			
Articulado	139	83,1	48,7	30,6	9,5	24	57	114	168	184	17%	0,425	0,371
Grande	88,7	61,8	42,4	24,3	7,5	65	97	174	165	684	36%	2,587	3,297
Mediano	67,5	50,3	41,7	24,6	7,5	13	26	58	94	236	13%	0,592	0,765
Taxi Bus	51,2	47,4	30,5	21,1	5,4	64	46	78	140	822	35%	0,112	0,147
FEEb											100%	1,11	1,39

Para el cálculo de los Ejes Equivalentes acumulados, los FEE calculados son convertidos en el *Truck Factor* T_f , conforme descrito en la ec.A12, utilizando el porcentaje de cada tipo, bus o camión, para cada uno de los 120 tramos de estudio obteniendo la variación del FEE, en la muestra que representa la variabilidad de tránsito en ambiente urbano, Figura 35.

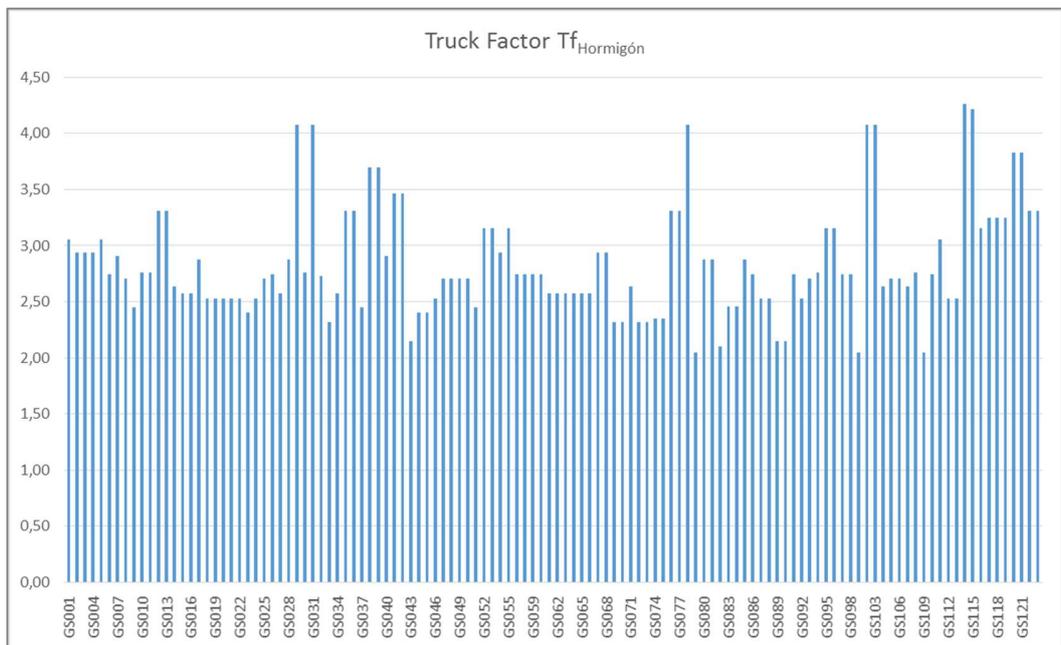
$$T_f = \sum_i (p_i * EALF_i) \quad (\text{ec.A12})$$

EALF: *Equivalent Axle Load Factor* para el grupo de eje i

p_i : % de camiones en el grupo i



(a) asfalto



(b) Hormigón

Figura 35: Truck Factor – variación

A.4.3. Tasa de crecimiento r%

Fueron valores de tasa de crecimiento diferentes para los buses y camiones. El crecimiento de los buses fue calculado con base a datos históricos de números de vehículos en circulación disponible en la biblioteca del INE – Instituto Nacional de Estadística (INE, n.d.).

Para los camiones el crecimiento fuera calculado con base en los datos de la EOD2012 en comparación a EOD2001, (SECTRA, 2012).

$r\% \text{ bus} = 4\%$

$r\% \text{ camiones} = 5\%$

Estos valores se utilizan para calcular el Factor de crecimiento G (ec. A13), para el período de proyección de tránsito.

$$G = \frac{(1+r)^Y - 1}{r} \quad (\text{ec. A13})$$

r : tasa de crecimiento %

Y : período en años (20 años)

A.4.4. Factor de pista – Fp

El Fp representa de la distribución del volumen de tránsito en las pistas existentes de una vía, según ASSHTO93, para determinación del Fp es necesario tener en cuenta la cantidad de pistas por sentido.

El caso los tramos de estudio la cantidad de pistas por vía se determina por estándar por la clasificación funcional de la vía asumido a través del TMDA calculado para la hora punta utilizando el $F_{hp}=0,10$, en comparación a los valores presentes en Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU, 2008) y Manual de Vialidad Urbana: Recomendaciones para el diseño de elementos de infraestructura vial urbana (MINVU, 2009) y Manual de Carreteras - Volumen N°3 - Instrucciones y Criterios de Diseño (MOP, 2020). Los valores utilizados son presentados en la Tabla 28.

Tabla 28: Factor de Pista, según clasificación funcional

Vehículos por hora	Clasificación	Numero de Pistas	Fp
600	Servicio	2	0,94
1500	Colectora	2	0,94
2000	Troncal	3	0,82
4000	Expresa	3	0,82 – 0,76

En los casos de las vías urbanas no necesariamente los vehículos se distribuyen de la misma forma que en las carreteras, pero se adoptó este supuesto para seguir con los cálculos.

A.4.5. Ejes Equivalentes – EE (ESAL – Equivalent Single Axel Load)

La solicitud de tránsito para pavimentos flexible y rígido es representada por la carga equivalente al eje estándar, que consiste en convertir la carga de los vehículos

que transitan por el pavimento en una única carga estándar, ec. A14 (Huang, 2004), los valores son presentados en las Figuras 36 (a) y (b).

$$ESAL = AADT * T * T_f * G * D * L * 365 \quad (\text{ec. A14})$$

AADT: annual average daily traffic o TMDA – tránsito diario medio anual

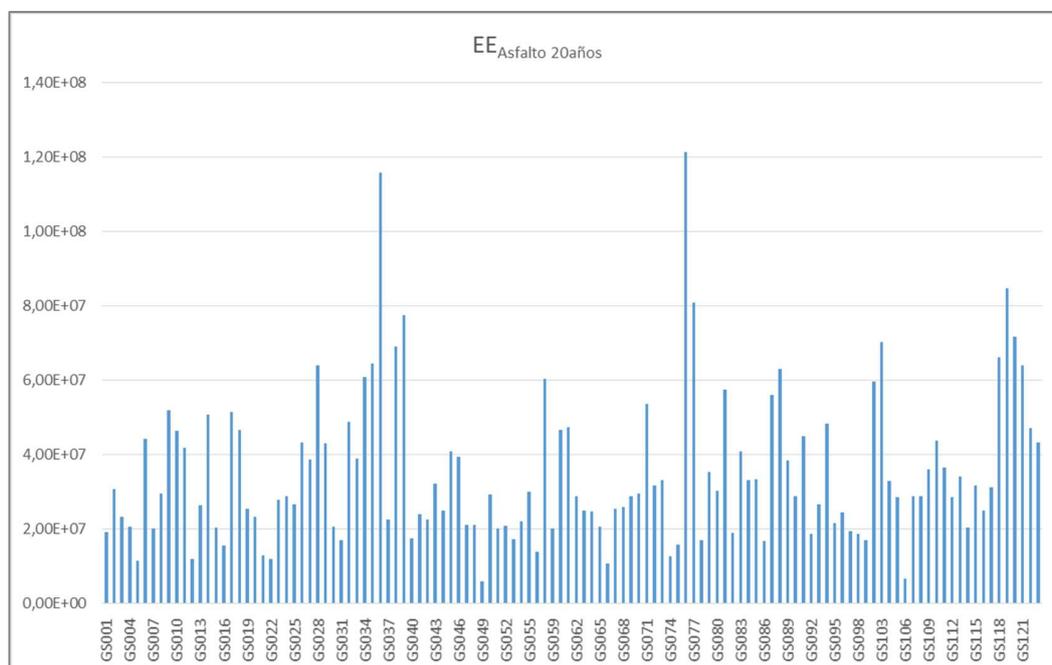
T: % de camiones

T_f : Truck factor

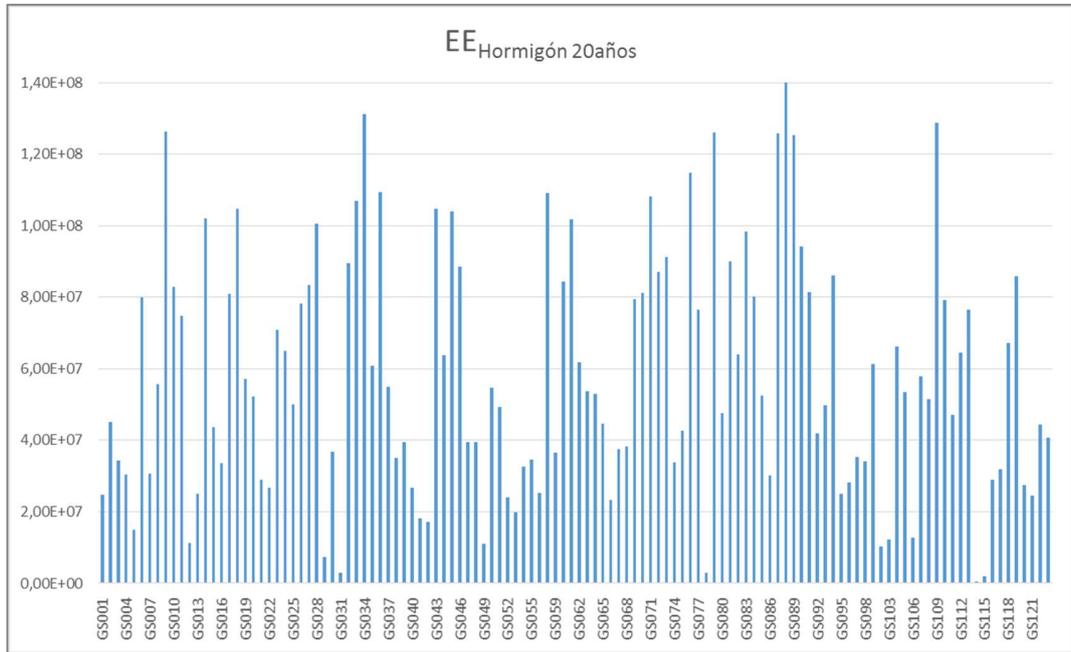
G: Factor de crecimiento

D: % de tránsito por sentido da vía

L: % de camiones en la pista de diseño (Fp)



(a) Pavimento de asfalto



(b) Pavimento de Hormigón

Figura 36: Ejes Equivalentes

A.5. Resultados

Los análisis realizados tienen como objetivo describir el comportamiento de los factores de diseño en el ambiente urbano, como se distribuyen y como varían.

La variabilidad está expresada en términos de coeficiente de variación (COV) para todos los datos, uniformizando los resultados.

El ajuste de la función distribución de probabilidades (FDP), utilizado para comprender como se comportan las variables. Fueron testeadas las distribuciones Normal, Lognormal y Weibull, considerando el mejor ajuste por análisis de *p-value* $> \alpha$, siendo $\alpha=1$ -Índice de Confiabilidad (95%) y el teste de Anderson-Darling $AD_{\text{Observado}} < AD_{\text{Crítico}} (2,492)$ para $\alpha=5\%$ (Fernandes, 2013), en esta orden siempre que posible.

A.5.1. Variabilidad de los parámetros relativos a materiales y estructura

Espesores de las capas de rodado, asfáltico y hormigón.

Los espesores de la capa asfáltica presentan mayor COV entre los pavimentos por tipo 47%. Cuando agrupados por clasificación funcional están entre 36 – 53%. El pavimento de hormigón presenta menor variabilidad COV 20%, y entre 13 – 21% por clasificación funcional. Los datos están presentados en la Tabla 29.

Los datos han demostrado que no hay un comportamiento simétrico en la dispersión de los espesores cuando evaluado el ajuste de FDP, además de presentar un difícil ajuste, ver Tabla 30, es la distribución Lognormal la que mejor se ajusta en ambos los casos. Los histogramas con el ajuste de FDP son presentados en la Figura 37.

Tabla 29: Variabilidad espesor de capa de rodado

Grupo		N	Media	Desv. Estándar	COV	Mínimo	Mediana	Máximo
Tipo de pavimento	Asfáltico	102	101,93	48,39	47,47	42,50	90,93	203,40
	Hormigón	159	173,32	35,40	20,43	89,43	165,85	270,98
	Colectora	12	90,03	31,82	35,34	50,17	98,26	131,60
Clasificación funcional Asfalto h1 (mm)	Expresa	15	140,3	53,2	37,91	56,7	158,2	203,4
	Local	21	75,67	39,84	52,65	46,98	58,45	187,35
	Servicio	27	74,38	30,64	41,19	42,50	67,33	149,35
	Troncal	24	137,89	37,78	27,40	54,00	153,97	191,75
	Colectora	42	175,45	32,48	18,51	119,13	169,05	270,98
Clasificación funcional Hormigón D (mm)	Expresa	16	221,46	34,96	15,79	171,70	226,16	266,08
	Local	43	151,86	31,68	20,86	89,43	149,68	251,03
	Servicio	24	162,83	22,62	13,89	144,88	153,28	223,95
	Troncal	34	182,59	24,55	13,45	144,55	181,42	230,95

Tabla 30: Prueba de bondad del ajuste

Distribución	Pavimento asfáltico		Pavimento Hormigón	
	AD _{observado}	p-value	AD _{observado}	p-value
Normal	3,228	<0,005	3,654	<0,005
Lognormal	1,988	<0,005	1,762	<0,005
Weibull	2,384	<0,010	5,375	<0,010
Gamma	2,234	<0,005	2,232	<0,005
Asimetría	0,563748		0,774759	

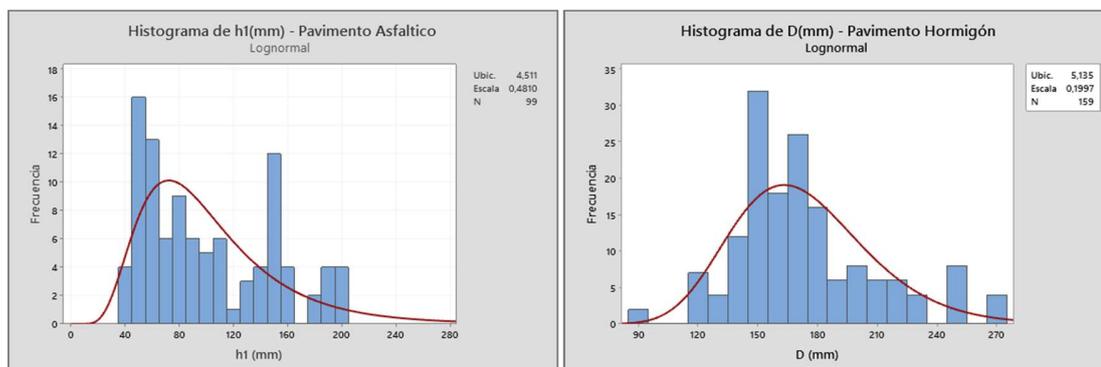


Figura 37: Histograma FDP para espesor de capa, h1 (mm) y D (mm)

Módulo Elástico de capas de rodado, asfáltico E1 y hormigón EPCC.

Los pavimentos asfálticos el módulo elástico E1 ha presentado un alto COV 74,7% cuando evaluado sin agrupamiento, y entre 37 – 100% cuando agrupado por clasificación funcional. Para los pavimentos de hormigón el EPCC presenta el COV 56% y entre 45 – 64% cuando agrupado por clasificación funcional. Los resultados están resumido en la Tabla 31.

Tabla 31: Variabilidad de los módulos elásticos E de las capas de rodado

Grupo		N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo
Tipo pavimento	Asfalto E1 (MPa)	33	13622	10178	74,72	1698	11174	41646
	Hormigón EPCC (MPa)	57	8607	4863	56,50	810	8993	21446
Clasificación funcional Asfalto E1 (MPa)	Colectora	3	13949	14008	100,42	3861	8044	29943
	Expresa	4	6564	2441	37,19	3976	6231	9820
	Local	5	14011	4323	30,85	11174	12000	21517
	Servicio	13	13498	11464	84,93	1698	11194	41646
	Troncal	8	16986	11721	69,00	4727	16070	33476
Clasificación funcional Hormigón EPCC (MPa)	Colectora	19	8761	5155	58,85	1236	9406	17820
	Expresa	1	9572,7	*	*	9572,7	9572,7	9572,7
	Local	19	8953	5764	64,38	810	8993	21446
	Servicio	9	7614	3839	50,42	3148	9286	13467
	Troncal	9	8439	3826	45,33	4801	7169	15749

Los pavimentos asfálticos presentan un muy buen ajuste a la distribución Lognormal. Los datos del pavimento de hormigón presentan mejor ajuste a la distribución Weibull, ambas son distribuciones no simétricas para datos no-normales pero la lognormal tiende presentar una cola más larga a la derecha ajustando mejor

la asimetría alta del pavimento asfáltico. Los resultados son presentados en la Tabla 32 y los histogramas con el ajuste de las curvas en la Figura 38.

Tabla 32: Prueba de bondad del ajuste – E1 (MPa) E_{PCC} (MPa)

Distribución	Pavimento asfáltico		Pavimento Hormigón	
	AD _{observado}	p-value	AD _{observado}	p-value
Normal	1,435	<0,005	0,594	0,118
Lognormal	0,191	0,891	1,181	<0,005
Weibull	0,430	>0,250	0,438	>0,250
Gamma	0,361	>0,250	0,626	0,114
Asimetría	1,11778		0,396174	

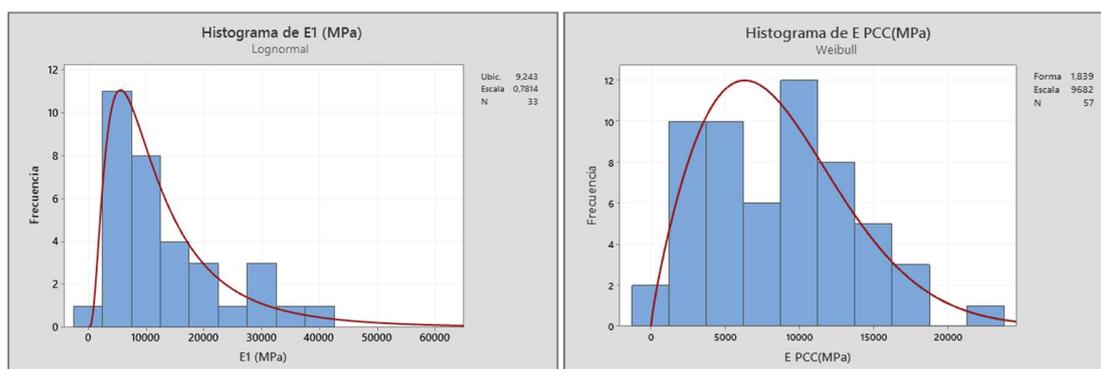


Figura 38: Ajuste FDP para E1 (MPa) y E_{PCC} (MPa)

Módulo Resiliente Retro calculado MR_{SR}, pavimento asfáltico.

El MR_{SR} ha presentado el COV de 40,7% en general y entre 19 – 52% para clasificación funcional, los resultados está en la Tabla 33, en el ajuste de FDP la distribución normal ha presentado mejor ajuste en ambos los criterio, AD_{observado} y p-value, aunque los datos presenten alguna asimetría, los resultados de la prueba

de bondad de ajuste están presentados en la Tabla 34, el histograma con la curva Normal ajustada es presentado en la Figura 39.

Tabla 33: Variabilidad de los módulos resiliente de la subrasante MR_SR (MPa)

Grupo	N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo
Pavimento asfáltico	MR_SR (MPa)	40	246,2	100,2	40,69	73,7	495,3
	Colectora	4	300,3	130,4	43,44	223,5	495,3
Clasificación funcional Asfalto MR_SR (MPa)	Expresa	6	242,4	47,0	19,40	164,0	305,2
	Local	8	269,3	79,4	29,47	170,2	364,4
	Servicio	14	201,8	81,5	40,41	73,7	349,7
	Troncal	8	276,5	145,2	52,53	84,1	477,8

Tabla 34: Prueba de bondad del ajuste – MR_SR (MPa)

Distribución	AD _{observado}	p-value
Normal	0,320	0,520
Lognormal	0,360	0,431
Weibull	0,214	>0,250
Gamma	0,168	>0,250
Asimetría	0,565492	

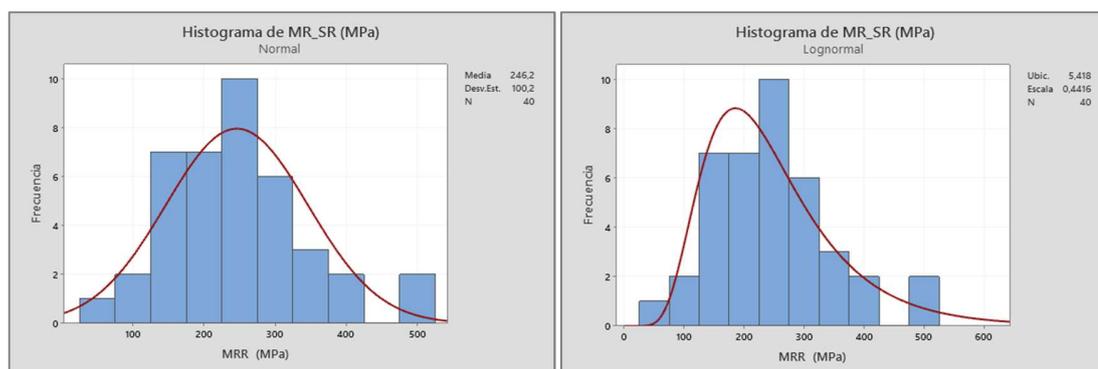


Figura 39: Ajuste FDP para MR_SR (MPa)

Módulo de Reacción de la subrasante k, pavimento de hormigón.

El $k_{estático}$, nombrado “k_c” cuando utilizado en las simulaciones, presenta el COV de 59% en general y COV entre 35 – 82% cuando agrupado por clasificación funcional, los valores es presentado en la Tabla 35. El ajuste de la FDP presenta de ajuste para la distribución Weibull, nuevamente demuestra que los datos son asimétricos, los resultados están presentados en la Tabla 36 y Figura 40.

Tabla 35: Variabilidad de los módulos de reacción de la subrasante – k_c (MPa/m)

Grupo		N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo
Pavimento hormigón	k _c (MPa/m)	63	82,96	49,16	59,26	4,86	73,75	211,84
	Colectora	19	81,09	41,08	50,66	14,94	72,26	158,63
Clasificación funcional Hormigón k _c (MPa/m)	Expresa	2	41,8	14,7	35,08	31,5	41,8	52,2
	Local	20	87,4	51,7	59,16	17,2	75,6	194,6
	Servicio	10	98,0	49,1	50,07	20,4	93,2	188,8
	Troncal	12	72,8	59,9	82,24	4,9	65,6	211,8

Tabla 36: Prueba de bondad del ajuste – k_c (MPa/m)

Distribución	AD _{observado}	p-value
Normal	0,778	0,039
Lognormal	1,529	<0,005
Weibull	0,308	>0,250
Gamma	0,534	0,198
Asimetría	0,636198	

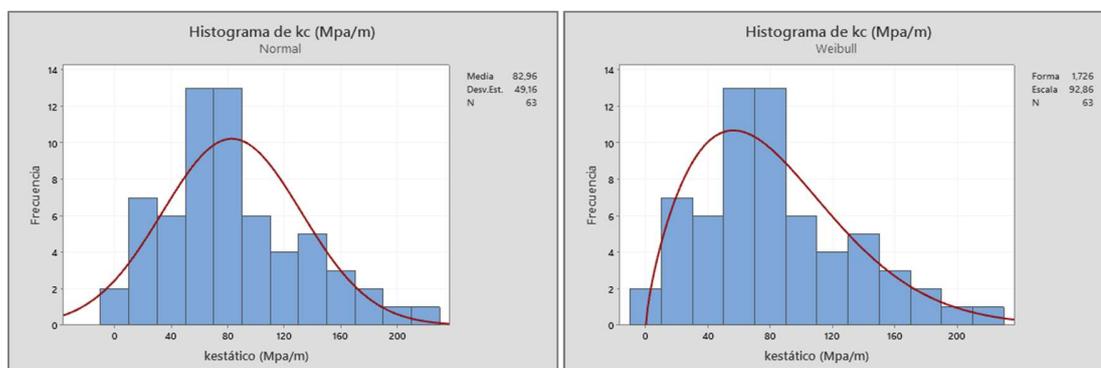


Figura 40: Ajuste FDP para kc (MPa/m)

Módulo de ruptura del hormigón S_c , pavimento de hormigón.

El módulo de ruptura de hormigón S_c es también encontrado en la literatura como resistencia media a la flexo tracción, medido través de prueba de flexión en vigas de tres puntos (ASTM C78 2002) o de punto central (ASTM C293 2002) (Delatte, 2008), presenta el COV de 9,6% en general y COV entre 6 – 20% cuando agrupado por clasificación funcional, los valores es presentado en la Tabla 37. El ajuste de la FDP presenta difícil de ajuste, siendo mejor representado por la distribución Lognormal, demostrando que los datos son asimétricos, los resultados están presentados en la Tabla 38 y Figura 41.

Tabla 37: Variabilidad de los módulos de ruptura – Sc (MPa)

Grupo	N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo
Pavimento hormigón	Sc (MPa)	65	3,7907	0,3635	9,59	3,3681	5,2158
	Colectora	20	3,7301	0,2343	6,28	3,3681	4,1433
Clasificación funcional Hormigón Sc (MPa)	Expresa	3	4,041	0,832	20,58	3,368	4,971
	Local	21	3,7826	0,3246	8,58	3,3681	4,6725
	Servicio	10	3,803	0,365	9,59	3,505	4,739
	Troncal	11	3,836	0,494	12,86	3,368	5,216

Tabla 38: Prueba de bondad del ajuste – Sc (MPa)

Distribución	AD _{observado}	p-value
Normal	2,596	<0,005
Lognormal	1,809	<0,005
Weibull	5,312	<0,010
Gamma	2,032	<0,005
Asimetría	1,88411	

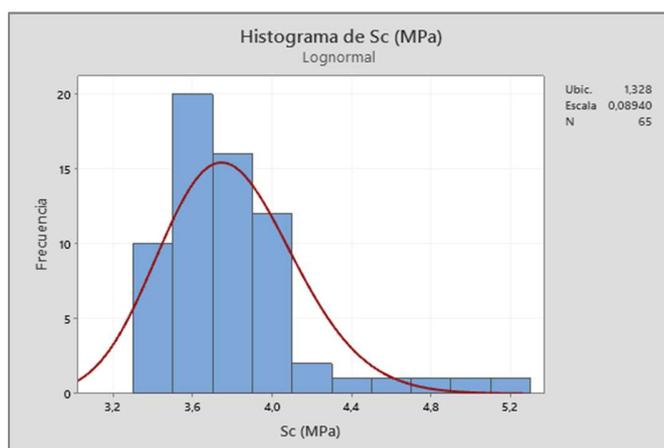


Figura 41: Ajuste FDP para Sc (MPa)

Numero estructural efectivo SN_{Eff} , pavimento asfáltico.

El numero estructural SN_{Eff} , presenta el COV de 70% en general y COV entre 40 – 92% cuando agrupado por clasificación funcional, los valores es presentado en la Tabla 39. El ajuste de la FDP presenta difícil de ajuste, siendo mejor representado por la distribución Lognormal, demostrando que los datos son asimétricos, los resultados están presentados en la Tabla 40 y Figura 42.

Tabla 39: Variabilidad de los módulos de ruptura – Sc (MPa)

Grupo		N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo
Pavimento asfáltico	SN_{Eff} (mm)	43	144,1	100,7	69,90	30,5	123,2	408,1
	Colectora	5	147,6	99,5	67,41	59,7	107,3	264,9
Clasificación funcional Asfalto MR_SR (MPa)	Expresa	7	204,6	82,1	40,14	106,7	164,7	315,0
	Local	8	128,4	118,8	92,52	54,2	72,8	408,1
	Servicio	14	88,4	54,3	61,50	30,5	64,5	233,8
	Troncal	9	195,6	119,2	60,96	48,2	153,8	358,4

Tabla 40: Prueba de bondad del ajuste – SN_{EFF} (mm)

Distribución	$AD_{observado}$	p-value
Normal	2,245	<0,005
Lognormal	0,831	0,029
Weibull	1,170	<0,010
Gamma	1,119	0,008
Asimetría	1,06202	

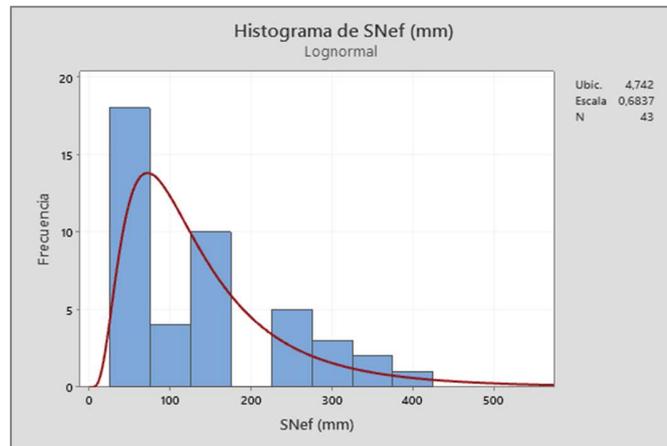


Figura 42: Ajuste FDP para SN_{EFF} (mm)

Vida Remanente de los pavimentos.

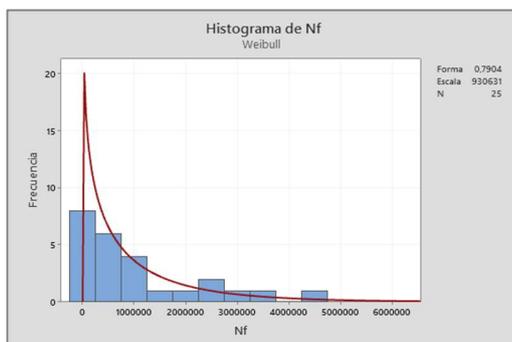
La vida remanente de los pavimentos en servicio, presentan el COV entre 118 y 370% en general, los valores son presentados en la Tabla 41. El ajuste de la FDP demuestra que los datos son asimétricos, los resultados están presentados en la Tabla 42 y Figuras 43.

Tabla 41: Variabilidad de la vida remanente

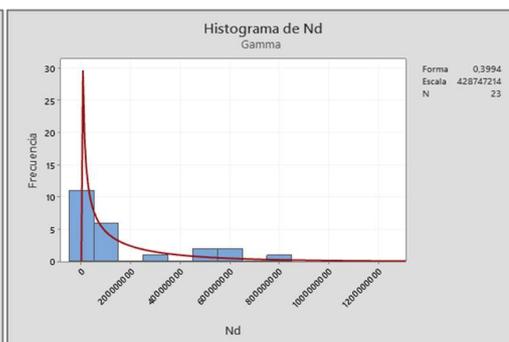
Grupo	N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo	
Pavimento asfáltico	Nf	25	1,06E+06	1,25E+06	118	8,77E+03	4,07E+05	4,74E+06
	Nd	23	1,71E+08	2,35E+08	137,26	3,77E+04	6,46E+07	8,02E+08
	et	34	2,19E-04	2,15E-04	98,49	2,80E-05	1,69E-04	1,03E-03
	ev	34	2,03E-04	2,11E-04	104,01	1,60E-05	1,50E-04	9,94E-04
Pavimento de hormigón	Nf	19	2,46E+09	9,12E+09	370,76	1,16E+03	3,58E+06	3,98E+10
	SR	40	0,35	0,1682	48,05	0,05	0,28	0,65
	se	40	1,31	0,63	48,10	0,19	1,08	2,52

Tabla 42: Prueba de bondad del ajuste – vida remanente

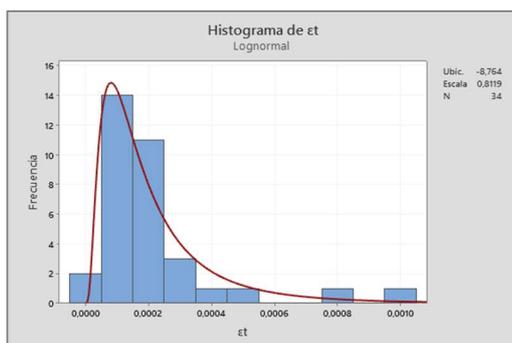
Grupo	Distribución	AD _{observado}	p-value	Asimetría	
Pavimento	Nf Weibull	0,207	>0,250	1,58297	(a)
	Nd Gamma	0,298	>0,250	1,48155	(b)
asfáltico	et Lognormal	0,203	0,866	2,49982	(c)
	ev Lognormal	0,399	0,345	2,59486	(d)
Pavimento de hormigón	Nf Lognormal	0,529	0,154	4,23997	(e)
	SR Gamma	0,853	0,033	0,380763	(f)
	se Gamma	0,629	0,107	0,452315	(g)



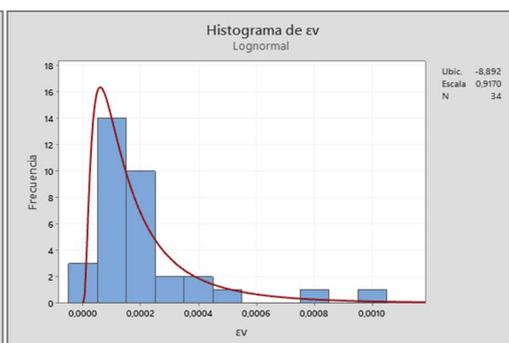
(a)



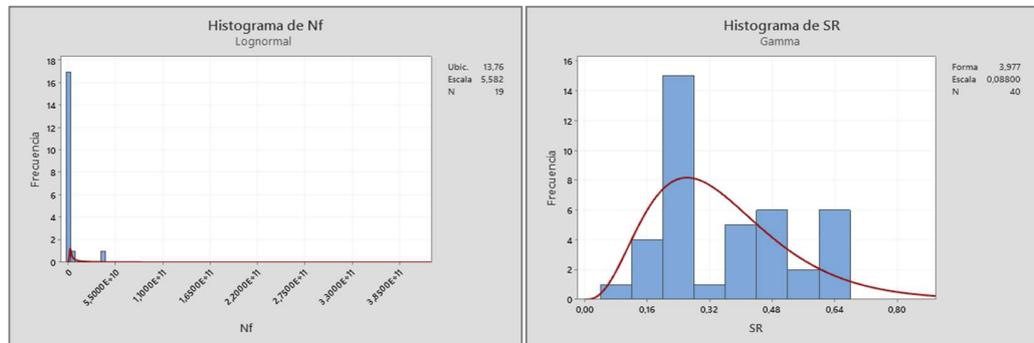
(b)



(c)

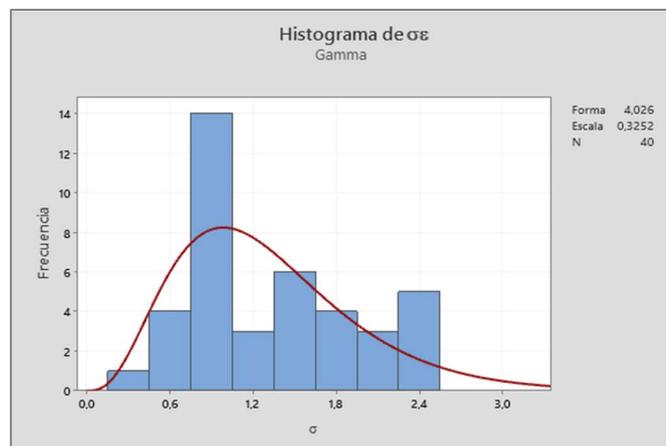


(d)



(e)

(f)



(g)

Figura 43: Ajuste FDP para vida remanente

El análisis de correlación de la vida remanente desde punto de vista mecanicista-empírico, a través de la determinación del coeficiente de correlación de Pearson, que para los pavimentos de hormigón y para los pavimentos de asfalto son presentados en las tablas 43 hasta 45.

Tabla 43: Análisis de correlación vida remanente RM Santiago – Hormigón

	se	H (mm)	kc (MPa/m)	Sc (MPa)
D (mm)	-0,670			
kc (MPa/m)	-0,423	0,180		
S _c (MPa)	-0,028	-0,097	-0,005	
E PCC(MPa)	-0,028	-0,097	-0,005	1,000

Tabla 44: Análisis de correlación vida remanente RM Santiago – Asfalto ϵ_t

	ϵ_t	E1 (MPa)	E2 (MPa)	MR_SR (MPa)	H1 mm
E1 (MPa)	-0,453				
E2 (MPa)	-0,398	0,401			
MR_SR (MPa)	-0,457	0,315	0,126		
H1 mm	-0,399	-0,262	0,086	-0,094	
H2 mm	-0,448	0,201	0,614	-0,239	0,304

Tabla 45: Análisis de correlación vida remanente RM Santiago – Asfalto ϵ_v

	ϵ_v	E1 (MPa)	E2 (MPa)	MR_SR (MPa)	H1 mm
E1 (MPa)	-0,146				
E2 (MPa)	-0,267	0,401			
MR_SR (MPa)	-0,448	0,315	0,126		
H1 mm	-0,525	-0,262	0,086	-0,094	
H2 mm	-0,434	0,201	0,614	-0,239	0,304

A.5.2. Variabilidad de los parámetros relativos al tránsito

Variabilidad del TMDA y TMDAc

El TMDA y TMDAc han presentado el COV de 51% y 54% respectivamente, en general y entre 8 – 19% para TMDA y entre 35 – 40% para TMDAc por clasificación funcional, los resultados están en la Tabla 46.

El ajuste de FDP para el TMDA y TMDAc han presentado mejor ajuste para la distribución Gamma en ambos los criterios, A_D observado y p-value, aunque los datos presenten alguna asimetría, los resultados de la prueba de bondad de ajuste están presentados en la Tabla 47, para estos parámetros son presentados dos histogramas, ajustados para curva Lognormal y Gamma, que por motivo de limitaciones de la herramienta de simulación en este estudio del se utiliza la curva Lognormal, las gráficas son presentadas en la Figura 44 para TMDA y 45 para TMDAc.

Tabla 46: Variabilidad del TMDA y TMDAc

Grupo	N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo	Modo
TMDA	120	16335	8384	51,33	3229	15114	40282	16575
TMDAc	120	1543,6	840,4	54,44	242,4	1350,4	4954,7	
TMDA	Colectora	14	8507	732	8,60	7694	8160	9691
	Expresa	34	27330	5261	19,25	20071	25749	40282
	Servicio	18	6023	1036	17,20	3229	6188	7452
	Troncal	54	14878	2846	19,13	10141	14937	19945
TMDAc	Colectora	14	1031	415	40,27	601	887	2029
	Expresa	34	2237	895	40,00	985	2127	4955
	Servicio	18	569,2	200,1	35,16	242,4	542,9	1012,0
	Troncal	54	1564,7	575,7	36,80	760,6	1450,5	2810,1

Tabla 47: Prueba de bondad del ajuste –TMDA y TMDAc

Distribución	TMDA		TMDAc	
	AD _{observado}	p-value	AD _{observado}	p-value
Normal	1,716	<0,005	1,628	<0,005
Lognormal	0,671	0,078	0,696	0,067
Weibull	0,624	0,102	0,536	0,184
Gamma	0,459	>0,250	0,379	>0,250
Asimetría	0,727230		1,15605	

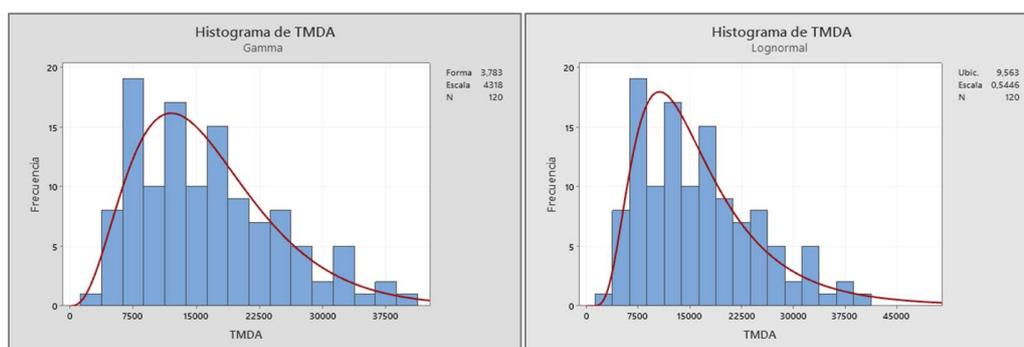


Figura 44: Ajuste FDP para TMDA

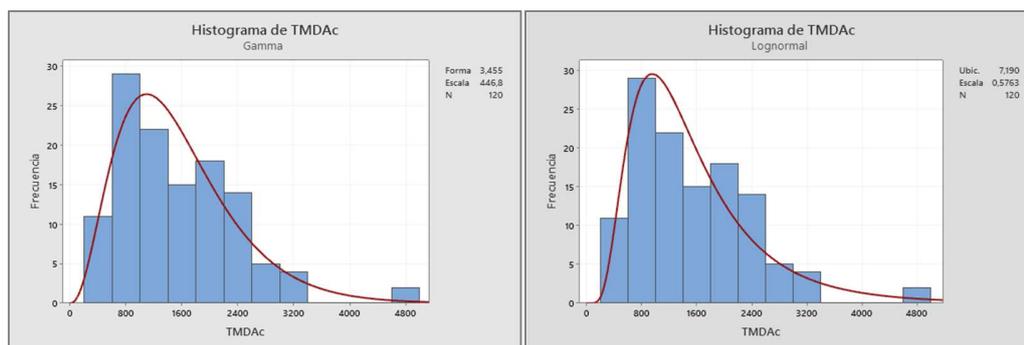


Figura 45: Ajuste FDP para TMDAc

Variabilidad del Tf

El Tf presenta variabilidad principalmente debido a la composición de la flota de vehículos comerciales que transitan por la vía, el Tf para pavimentos de asfalto presenta COV de 18% y para pavimentos de hormigón presenta COV de 17% en general y por clasificación funcional entre 14 – 22% para asfalto y entre 14 – 21% para hormigón, los resultados están en la Tabla 48.

El Tf presenta dificultades para el ajuste de FDP, sobre todo evaluando distribuciones típicas de variables continuas, los resultados de la prueba de bondad de ajuste utilizando el test Anderson-Darling (AD_{observado} y p-value) están presentados en la Tabla 49, para estos parámetros son presentados dos histogramas con curva ajustadas Valor Extremo por Máximos, las gráficas son presentadas en la Figura 46.

Tabla 48: Variabilidad del Tf

Grupo	N	Mediana	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo	Modo
Tf Asfalto	12	2,400	0,4323	18,0	1,6964	2,3119	3,6647	2,3119
Tf Hormigón	12	2,841	0,4865	17,1	2,0492	2,7419	4,2643	2,5282
Tf Asfalto	Colector	14	2,507	0,542	21,6	1,696	2,312	3,619
	Expresa	34	2,378	0,3555	14,9	2,0087	2,2913	3,4949
	Servicio	18	2,549	0,580	22,7	1,746	2,297	3,665
	Troncal	54	2,336	0,3824	16,3	1,6964	2,3182	3,4949
Tf Hormigón	Colector	14	2,962	0,610	20,5	2,049	2,742	4,213
	Expresa	34	2,817	0,4001	14,2	2,4006	2,7186	4,0731
	Servicio	18	3,009	0,652	21,6	2,105	2,725	4,264
	Troncal	54	2,769	0,4303	15,5	2,0492	2,7489	4,0731

Tabla 49: Prueba de bondad del ajuste – Tf

Distribución	Tf Asfalto		Tf Hormigón	
	AD _{observado}	p-value	AD _{observado}	p-value
Normal	3,674	<0,005	3,674	<0,005
Lognormal	2,002	<0,005	2,065	<0,005
Weibull	5,474	<0,010	5,589	<0,010
Valor Extremo Máximos	1,066	<0,010	1,066	<0,010
Asimetría	1,08779		1,08779	

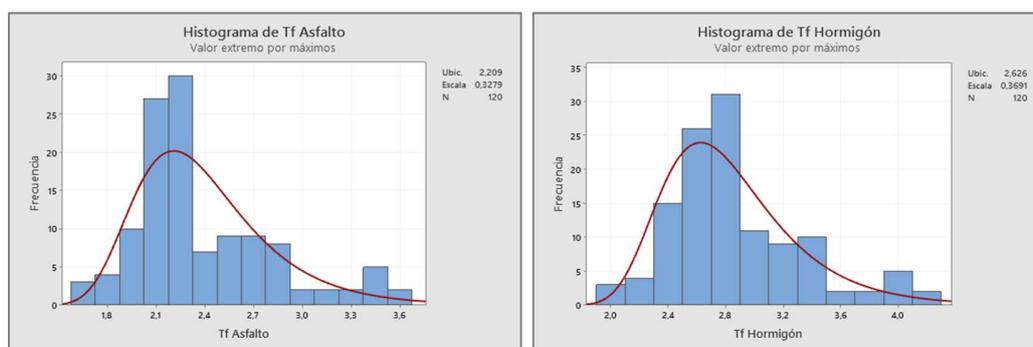


Figura 46: Ajuste FDP para Tf – Asfalto y Hormigón

Variabilidad de los EE (ESAL – Equivalent Single Axle Load)

La variabilidad de los EE para asfalto presenta COV de 57% y para hormigón presenta COV de 58% en general y por clasificación funcional entre 36 – 60% para asfalto y entre 39 – 71% para hormigón, los resultados se presentan en la Tabla 50. El el ajuste de FDP presenta mejor ajuste para la distribución Lognormal para EE para asfalto y Weibull para hormigón, en ambos los criterios, AD_{observado} y p-value, los resultados de la prueba de bondad de ajuste están presentados en la Tabla

51, para estos parámetros son presentados dos histogramas con curva ajustadas Valor Extremo por Máximos, las gráficas son presentadas en la Figura 47.

Tabla 50: Variabilidad de EE – Asfalto y Hormigón

Grupo	N	Media	Desv. Estándar	COV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo	
EEA20AÑOS total	120	3,52E+07	2,02E+07	57,26	5,94E+06	2,91E+07	1,21E+08	
EEH20AÑOS (Total)	120	5,78E+07	3,38E+07	58,53	5,28E+05	5,24E+07	1,42E+08	
EE Asfalto	Colectora	14	2,88E+07	1,73E+07	60,09	1,67E+07	2,09E+07	7,18E+07
	Expresa	34	5,01E+07	2,31E+07	46,14	2,11E+07	4,58E+07	1,21E+08
	Servicio	18	1,54E+07	5,59E+06	36,37	5,94E+06	1,48E+07	2,65E+07
	Troncal	54	3,41E+07	1,44E+07	42,36	1,75E+07	2,92E+07	7,76E+07
EE Hormigón	Colectora	14	3,68E+07	1,64E+07	44,63	2,02E+06	3,92E+07	6,14E+07
	Expresa	34	8,08E+07	3,18E+07	39,38	1,03E+07	8,21E+07	1,42E+08
	Servicio	18	2,19E+07	1,56E+07	71,29	5,28E+05	2,08E+07	6,40E+07
	Troncal	54	6,07E+07	2,99E+07	49,24	7,44E+06	5,43E+07	1,29E+08

Tabla 51: Prueba de bondad del ajuste – EE

Distribución	EE Asfalto		EE Hormigón	
	AD _{observado}	p-value	AD _{observado}	p-value
Normal	3,857	<0,005	1,374	<0,005
Lognormal	0,310	0,550	3,562	<0,005
Weibull	1,803	<0,010	0,518	0,201
Gamma	0,828	0,036	1,029	0,013
Asimetría	1,62246		0,457936	

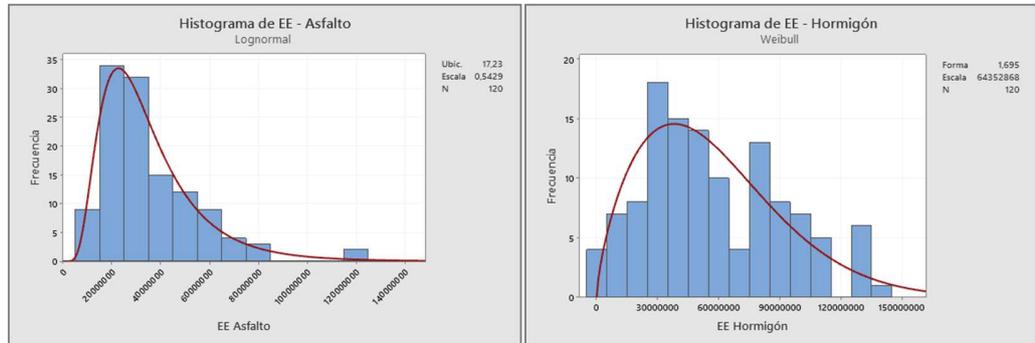


Figura 47: Ajuste FDP para EE – Asfalto y Hormigón

B. SIMULACION Y CUANTIFICACION DEL IMPACTO

B.1. ESCENARIOS SIMULACION

B.1.1. Diseño base

Las comparaciones se han realizados de forma comparativa utilizando como referencia el diseño base, para cada nivel de tránsito e tipo de pavimento, presentados en las Tablas 52 y 53, diseñados según las recomendaciones de la Guía AASHTO93 y del Manual de obras viales, pavimentación y aguas lluvias versión 2018 del SERVIU Metropolitano.

Tabla 52: Diseño base Asfalto

Tipo	Estructura	Niveles de tránsito		
		3E+6	10E+6	20E+6
Asfalto	h1 (mm)	120	145	161
	h2 (mm)	150	150	150
	h3 (mm)	150	200	200
	SN (mm)	90	107	114
	MR SR (MPa)	87	87	87
	a1		0,44	
	a2		0,14	
	a3		0,11	
	m2		1	
	m3		1	
$Z_R = -0,841$; $S_0 = 0,45$; $PSI_{inicial} = 4,5$; $PSI_{terminal} = 2,0$				

Tabla 53: Diseño base – Hormigón

Tipo	Estructura	Niveles de tránsito		
		3E+6	10E+6	20E+6
Hormigón	D (mm)	191	235	262
	h2 (mm)	200	200	200
	Kc (MPa/m)	77	77	77
	Cd		1	
	Sc (MPa)		5	
	J		3,6	
	E (MPa)		30.000	
	$Z_R = -0,841$; $S_0 = 0,45$; $PSI_{inicial} = 4,5$; $PSI_{terminal} = 2,0$			

B.1.2. Modelación de las Simulaciones de Monte Carlo

Etapa 1 – análisis de correlaciones

Las simulaciones en la etapa 1 tienen como objetivo evaluar las correlaciones entre los parámetros de diseño y la vida útil, además de las correlaciones entre los parámetros considerando la variabilidad de todos los parámetros relativos a los materiales, estructura y tránsito, para pavimento de asfalto y de hormigón, utilizando valores de variabilidad obtenidos en la literatura.

A partir de la respuesta obtenida se calcula los ejes equivalentes y las correlaciones entre los parámetros, los resultados son presentados en las Tablas 54 y 56 para pavimento de asfalto y las Tablas 55 y 57 para pavimento de hormigón.

Para los parámetros de tránsito las correlaciones fueron evaluadas utilizando los datos reales de tránsito para la RM Santiago.

Tabla 54: Coeficiente de correlaciones r – Pavimento Asfalto

	Nt	TMDAc	SN	Fp	Tf	MR_SR	a1	a2	a3	h1	h2
TMDAc	0,982										
SN	0,612	0,593									
Fp	-0,002	-0,034	0,015								
FEE	0,026	-0,082	0,018	0,003							
MR_SR	0,522	0,513	0,011	-0,031	0,015						
a1	0,218	0,214	0,305	-0,011	0,006	0,014					
a2	0,143	0,136	0,216	0,024	0,028	-0,005	0,03				
a3	0,159	0,149	0,25	0,029	-0,017	-0,001	0,03	0,028			
h1	0,496	0,481	0,829	-0,001	0,018	0,017	0,009	-0,012	0,017		
h2	0,112	0,111	0,206	-0,003	-0,02	-0,01	-0,013	0,006	-0,048	-0,018	
h3	0,365	0,353	0,648	0,02	0,021	-0,002	0,012	-0,005	-0,002	0,514	-0,027

Tabla 55: Coeficiente de correlaciones r – Pavimento Hormigón

	Nt	TMDAC	k_c (pci)	Fp	Tf	Ec (psi)	Sc (psi)	D (pul)
TMDAC	0,967							
k_c (pci)	0,022	0,02						
Fp	0,002	-0,063	-0,003					
Tf	-0,019	-0,203	0,012	0,035				
Ec (psi)	-0,003	0	0	-0,015	-0,029			
Sc (psi)	0,443	0,427	0,002	-0,01	0,01	0,006		
D (pul)	0,814	0,79	-0,028	0,01	-0,029	-0,011	0,003	
h2 (pul)	0,018	0,021	0,353	-0,005	-0,01	-0,021	0,015	-0,004

Tabla 56: Correlaciones en Pareja – Pavimento Asfalto

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
TMDAc	Nt	3000	0,982	(0,981; 0,983)	0
SN	Nt	3000	0,612	(0,590; 0,634)	0
Fp	Nt	3000	-0,002	(-0,037; 0,034)	0,931
TF	Nt	3000	0,026	(-0,010; 0,062)	0,155
MR_SR	Nt	3000	0,522	(0,496; 0,548)	0
a1	Nt	3000	0,218	(0,183; 0,251)	0

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
a2	Nt	3000	0,143	(0,108; 0,178)	0
a3	Nt	3000	0,159	(0,124; 0,194)	0
h1	Nt	3000	0,496	(0,468; 0,522)	0
h2	Nt	3000	0,112	(0,076; 0,147)	0
h3	Nt	3000	0,365	(0,333; 0,395)	0
SN	TMDAc	3000	0,593	(0,570; 0,616)	0
Fp	TMDAc	3000	-0,034	(-0,070; 0,002)	0,062
TF	TMDAc	3000	-0,082	(-0,117; -0,046)	0
MR_SR	TMDAc	3000	0,513	(0,486; 0,538)	0
a1	TMDAc	3000	0,214	(0,179; 0,248)	0
a2	TMDAc	3000	0,136	(0,100; 0,171)	0
a3	TMDAc	3000	0,149	(0,114; 0,184)	0
h1	TMDAc	3000	0,481	(0,453; 0,508)	0
h2	TMDAc	3000	0,111	(0,075; 0,146)	0
h3	TMDAc	3000	0,353	(0,322; 0,384)	0
Fp	SN	3000	0,015	(-0,021; 0,051)	0,406
TF	SN	3000	0,018	(-0,018; 0,054)	0,318
MR_SR	SN	3000	0,011	(-0,025; 0,047)	0,541
a1	SN	3000	0,305	(0,272; 0,337)	0
a2	SN	3000	0,216	(0,182; 0,250)	0
a3	SN	3000	0,25	(0,216; 0,283)	0
h1	SN	3000	0,829	(0,817; 0,839)	0
h2	SN	3000	0,206	(0,171; 0,240)	0
h3	SN	3000	0,648	(0,626; 0,668)	0
TF	Fp	3000	0,003	(-0,033; 0,039)	0,868
MR_SR	Fp	3000	-0,031	(-0,067; 0,005)	0,088
a1	Fp	3000	-0,011	(-0,047; 0,025)	0,541
a2	Fp	3000	0,024	(-0,011; 0,060)	0,182
a3	Fp	3000	0,029	(-0,006; 0,065)	0,108
h1	Fp	3000	-0,001	(-0,037; 0,035)	0,959
h2	Fp	3000	-0,003	(-0,039; 0,033)	0,867
h3	Fp	3000	0,02	(-0,016; 0,056)	0,27
MR_SR	TF	3000	0,015	(-0,021; 0,051)	0,402
a1	TF	3000	0,006	(-0,029; 0,042)	0,728
a2	TF	3000	0,028	(-0,008; 0,063)	0,131
a3	TF	3000	-0,017	(-0,053; 0,019)	0,347
h1	TF	3000	0,018	(-0,018; 0,054)	0,328
h2	TF	3000	-0,02	(-0,056; 0,016)	0,272

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
h3	TF	3000	0,021	(-0,015; 0,057)	0,246
a1	MR_SR	3000	0,014	(-0,022; 0,049)	0,458
a2	MR_SR	3000	-0,005	(-0,041; 0,031)	0,777
a3	MR_SR	3000	-0,001	(-0,037; 0,035)	0,949
h1	MR_SR	3000	0,017	(-0,019; 0,052)	0,363
h2	MR_SR	3000	-0,01	(-0,045; 0,026)	0,602
h3	MR_SR	3000	-0,002	(-0,037; 0,034)	0,929
a2	a1	3000	0,03	(-0,006; 0,065)	0,105
a3	a1	3000	0,03	(-0,006; 0,065)	0,105
h1	a1	3000	0,009	(-0,027; 0,044)	0,636
h2	a1	3000	-0,013	(-0,048; 0,023)	0,487
h3	a1	3000	0,012	(-0,024; 0,047)	0,521
a3	a2	3000	0,028	(-0,008; 0,063)	0,13
h1	a2	3000	-0,012	(-0,048; 0,023)	0,5
h2	a2	3000	0,006	(-0,030; 0,042)	0,74
h3	a2	3000	-0,005	(-0,041; 0,030)	0,764
h1	a3	3000	0,017	(-0,018; 0,053)	0,343
h2	a3	3000	-0,048	(-0,084; -0,012)	0,009
h3	a3	3000	-0,002	(-0,038; 0,034)	0,923
h2	h1	3000	-0,018	(-0,053; 0,018)	0,338
h3	h1	3000	0,514	(0,488; 0,540)	0
h3	h2	3000	-0,027	(-0,063; 0,009)	0,14

Tabla 57: Correlaciones en Pareja – Pavimento Hormigón

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
TMDAC	Nt	3000	0,967	(0,965; 0,970)	0
k_c (pci)	Nt	3000	0,022	(-0,014; 0,057)	0,234
Fp	Nt	3000	0,002	(-0,034; 0,038)	0,904
TF	Nt	3000	-0,019	(-0,055; 0,017)	0,297
Ec (psi)	Nt	3000	-0,003	(-0,039; 0,033)	0,863
Sc (psi)	Nt	3000	0,443	(0,414; 0,471)	0
D (pul)	Nt	3000	0,814	(0,801; 0,826)	0
h2 (pul)	Nt	3000	0,018	(-0,018; 0,053)	0,335
k_c (pci)	TMDAC	3000	0,02	(-0,016; 0,056)	0,275
Fp	TMDAC	3000	-0,063	(-0,099; -0,027)	0,001
TF	TMDAC	3000	-0,203	(-0,237; -0,168)	0
Ec (psi)	TMDAC	3000	0	(-0,035; 0,036)	0,981

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
Sc (psi)	TMDAC	3000	0,427	(0,397; 0,456)	0
D (pul)	TMDAC	3000	0,79	(0,776; 0,803)	0
h2 (pul)	TMDAC	3000	0,021	(-0,015; 0,056)	0,262
Fp	k_c (pci)	3000	-0,003	(-0,039; 0,033)	0,862
TF	k_c (pci)	3000	0,012	(-0,024; 0,048)	0,501
Ec (psi)	k_c (pci)	3000	0	(-0,036; 0,036)	0,989
Sc (psi)	k_c (pci)	3000	0,002	(-0,034; 0,038)	0,909
D (pul)	k_c (pci)	3000	-0,028	(-0,064; 0,007)	0,119
h2 (pul)	k_c (pci)	3000	0,353	(0,321; 0,384)	0
TF	Fp	3000	0,035	(-0,000; 0,071)	0,053
Ec (psi)	Fp	3000	-0,015	(-0,051; 0,021)	0,412
Sc (psi)	Fp	3000	-0,01	(-0,046; 0,026)	0,583
D (pul)	Fp	3000	0,01	(-0,025; 0,046)	0,568
h2 (pul)	Fp	3000	-0,005	(-0,041; 0,031)	0,774
Ec (psi)	TF	3000	-0,029	(-0,065; 0,007)	0,11
Sc (psi)	TF	3000	0,01	(-0,026; 0,046)	0,579
D (pul)	TF	3000	-0,029	(-0,065; 0,007)	0,112
h2 (pul)	TF	3000	-0,01	(-0,046; 0,026)	0,586
Sc (psi)	Ec (psi)	3000	0,006	(-0,030; 0,041)	0,757
D (pul)	Ec (psi)	3000	-0,011	(-0,046; 0,025)	0,563
h2 (pul)	Ec (psi)	3000	-0,021	(-0,057; 0,015)	0,25
D (pul)	Sc (psi)	3000	0,003	(-0,033; 0,039)	0,882
h2 (pul)	Sc (psi)	3000	0,015	(-0,021; 0,050)	0,427
h2 (pul)	D (pul)	3000	-0,004	(-0,040; 0,032)	0,819

Etapa 2 – Caso de estudio

Los escenarios creados para el caso de estudio utilizan los parámetros que presentan una mayor correlación con el desempeño N_t , las correlaciones son obtenidas de la Etapa 1.

Las simulaciones se corrieron con soporte de software Minitab Workspace y los resultados se procesaron en el MS Excel de forma que fuera posible determinar la

vida útil en años y la estructura en SN (mm) o D (mm), conforme detallado y presentado en las Figuras 48 y 49.

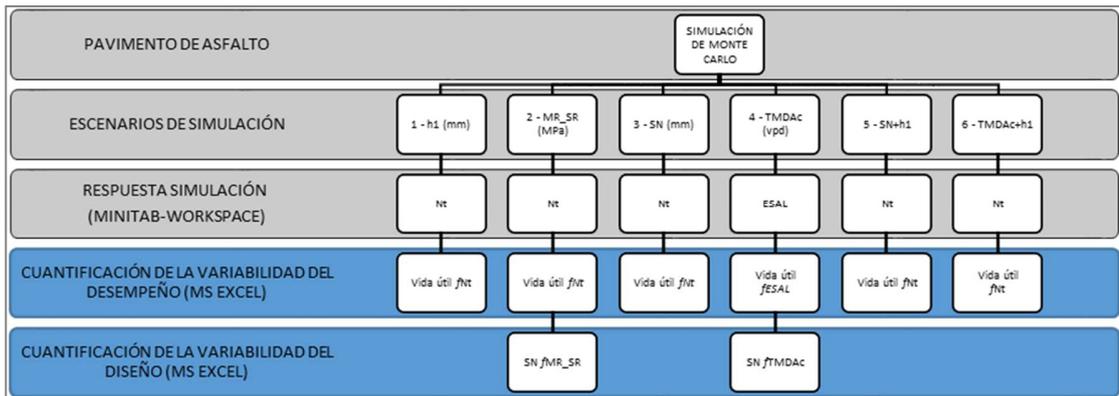


Figura 48: Flujo de trabajo – Simulación y Cuantificación – Pavimento de Asfalto

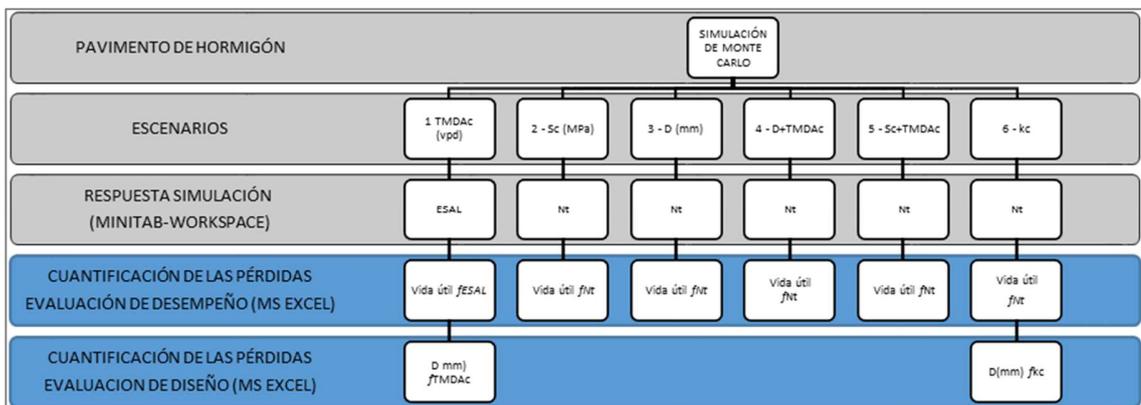


Figura 49: Flujo de trabajo – Simulación y Cuantificación – Pavimento de Hormigón

ESAL: Número de ejes equivalentes que solicitan el pavimentos en la vida útil en función de la variabilidad de los parámetros de tránsito.

N_t : Desempeño real del pavimento, en términos de número de ejes equivalentes hasta alcanzar el valor de $PSI_t(2,0)$ en función de la variabilidad de los parámetros de material y estructura.

B.2. CUANTIFICACIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Para la cuantificación de la vida útil en años, se utilizan los resultados de las simulaciones para calcular el Y en años que corresponde a la igualdad de las ecuaciones (ec. 1) y (ec. 6) para los pavimentos de asfalto y para los pavimentos de hormigón las ecuaciones (ec. 3) y (ec. 6).

La parcela a la izquierda representa la sollicitación de tránsito $ESAL$, y la de la derecha la cantidad de tránsito N_t que la estructura tiene capacidad de soportar.

$$\left(AADT * T * T_f * \left(\frac{(1+r)^Y - 1}{r} \right) * D * L * 365 \right) \\ = 10^{Z_R * S_0 + 9,36 * \log(SN+1) - 0,20 \frac{\log(\Delta PSI)/(4,2-1,5)}{0,4+109/(SN+1)} + 2,32 * \log(MR) - 8,07}$$

$$\left(AADT * T * T_f * \left(\frac{(1+r)^Y - 1}{r} \right) * D * L * 365 \right) \\ = 10^{Z_R * S_0 + 7,35 * \log(D+1) - 0,06 \frac{\log[\Delta PSI/(4,5-1,5)]}{1+1624x10^7/(D+1)^{6,46}} + (4,22 - 0,32 * PSI_t) * \log\left\{ \frac{S_c D_c (D^{0,75} - 1132)}{215,63 [D^{0,75} - 18,42/(E_c/k)^{0,25}]} \right\}}$$

MR: Modulo Resiliente de la Subrasante

Z_R : Coeficiente estadístico relativo confiabilidad

S_0 : Desviación estándar combinada

PSI_i : *Present Serviceability Index* Inicial

PSI_t : *Present Serviceability Index* Terminal

SN: *Structural Number* (Numero estructural)

$\Delta PSI = PSI_{inicial} - PSI_{terminal}$

k: Modulo de Reacción del suelo (pci)

D: Espesor de la losa

J: coeficiente de transferencia de carga

Cd: coeficiente de drenaje de capas granulares

Sc: Modulo de ruptura del hormigón

Ec: Modulo elástico del hormigón

AADT: annual average daily traffic o TMDA – transito diario medio anual (vpd)

T: % de camiones

T_f : Truck factor

D: % de tránsito por sentido da vía

L: % de camiones en la pista de diseño

r: tasa de crecimiento %

Y: período en años

Para la cuantificación de las pérdidas en la fase de diseño los resultados de las simulaciones de los escenarios que evalúan la variabilidad del tránsito y del

parámetro representativo de la subrasante MR_SR y k_c son utilizados para determinar la estructura necesaria, SN (mm) o D (mm) para soportar el tránsito.

Los resultados de los cálculos son presentados en las próximas tablas.

Tabla 58: Variabilidad del desempeño – Pavimento de Asfalto

Escenario		Nt – Desempeño real					
		FDP				Int. tolerancia IC95%	
		COV (%)	FDP	AD	P-value	Mínimo	Máximo
A3.1	h1 (mm)	154%	Lognormal	0,317	0,538	6,46E+05	8,99E+07
A3.2	MR_SR (MPa)	115%	Lognormal	0,581	0,130	3,35E+06	1,62E+08
A3.3	SN (mm)	2271%	Lognormal	0,036	0,140	3,09E+03	2,01E+11
A3.5	SN+h1	102%	Lognormal	0,743	0,053	4,80E+06	1,32E+08
A3.6	TMDAc+h1	189%	Lognormal	1,719	0,005	5,67E+05	1,01E+08
A10.1	h1 (mm)	182%	Lognormal*	0,841		1,70E+06	3,10E+08
A10.2	MR_SR (MPa)	103%	Lognormal	0,269	0,679	1,34E+07	4,62E+08
A10.3	SN (mm)	1040%	Lognormal*	1,203		1,07E+04	7,42E+11
A10.5	SN+h1	106%	Lognormal*	0,390		1,52E+07	5,00E+08
A10.6	TMDAc+h1	183%	Lognormal	0,423	0,320	1,65E+06	3,40E+08
A20.1	h1 (mm)	191%	Lognormal	0,343	0,489	3,42E+06	6,23E+08
A20.2	MR_SR (MPa)	109%	Lognormal	0,229	0,808	1,79E+07	7,85E+08
A20.3	SN (mm)	1987%	Lognormal*	0,909		1,10E+04	2,35E+08
A20.5	SN+h1	121%	Lognormal*	0,266		2,21E+07	8,65E+08
A20.6	TMDAc+h1	304%	Lognormal	0,642	0,094	3,11E+06	8,08E+08

A3.3 - Bondad de Ajuste por Kolmogorov-Smimov

*para determinados casos la distribución se ajusta con la inclusión del parámetro de umbral.

Tabla 59: Variabilidad del desempeño – Pavimento de hormigón

Escenario		Nt – Desempeño real					
		Variabilidad				Int. tolerancia IC95%	
		COV (%)	FDP	AD	P-value	Mínimo	Máximo
H3.2	Sc (MPa)	3%	Normal	0,604	0,117	6,95E+06	7,71E+06
H3.3	D (mm)	194%	Lognormal	0,740	0,054	8,21E+05	6,76E+07
H3.4	D+TMFAc	161%	Lognormal	1,219	0,005	8,58E+05	5,36E+07
H3.5	Sc+TMFAc	3%	Logística	0,491	0,179	6,90E+06	7,77E+06
H3.6	kc+h2 (mm)	25%	Normal	0,551	0,155	3,71E+06	1,11E+07
H10.2	Sc (MPa)	3%	Normal	0,346	0,481	2,35E+07	2,60E+07
H10.3	D (mm)	233%	Lognormal	0,446	0,281	2,16E+06	2,86E+08
H10.4	D+TMDAc	186%	Lognormal	0,624	0,104	2,06E+06	2,90E+08
H10.5	Sc+TMDAc	3%	Normal	0,548	0,158	2,35E+07	2,60E+07
H10.6	kc+h2 (mm)	21%	Weibull	0,306	>0,250	1,32E+07	3,42E+07
H20.2	Sc (MPa)	3%	Normal	0,197	0,888	4,60E+07	5,10E+07
H20.3	D (mm)	214%	Lognormal	0,637	0,097	4,04E+06	6,01E+08
H20.4	D+TMDAc	201%	Lognormal	0,681	0,075	3,86E+06	6,77E+08
H20.5	Sc+TMFAc	3%	Lognormal	0,636	0,097	4,61E+07	5,11E+07
H20.6	kc+h2 (mm)	19%	Weibull	0,882	0,024	2,77E+07	6,52E+07

Tabla 60: Variabilidad de la vida útil en años – pavimento de asfalto

Parámetro		Vida Util Años					
		FDP				Int tolerancia IC95%	
		COV (%)	FDP	AD	P-value	Mínimo	Máximo
A3.1	h1 (mm)	70%	Weibull	0,65	0,099	1,931	71,107
A3.2	MR_SR (MPa)	57%	Weibull*	0,499	0,221	3,278	57,813
A3.3	SN (mm)	121%				-0,226	311,515
A3.4	TMDAc	35%	Gamma	0,254	>0,250	8,474	37,935
A3.5	SN+h1	42%	Gamma	0,496	0,228	12,071	74,577
A3.6	TMDAc+h1	36%	Gamma	0,247	>0,250	8,298	38,04
A10.1	h1 (mm)	79%	Weibull*	0,041	0,0636	1,399	73,633
A10.2	MR_SR (MPa)	54%	Gamma	0,417	>0,250	5,212	57,43
A10.3	SN (mm)	121%				-0,207	316,282
A10.4	TMDAc	35%	Gamma	0,32	>0,250	8,466	36,188

A10.5	SN+h1	44%	Gamma	0,87	>0,250	11,467	78,497
A10.6	TMDAc+h1	37%	Gamma	0,498	0,226	8,205	38,459
A20.1	h1 (mm)	77%	Gamma	0,607	0,136	1,671	73,43
A20.2	MR_SR (MPa)	58%	Gamma	0,485	0,241	4,233	58,933
A20.3	SN (mm)	122%				-0,302	354,278
A20.4	TMDAc	35%	Gamma	0,288	>0,250	8,516	36,719
A20.5	SN+h1	46%	Weibull*	0,653	0,093	7,862	76,424
A20.6	TMDAc+h1	35%	Gamma	0,384	>0,250	8,619	38,177

A10.1 - Bondad de Ajuste por Kolmogorov-Smimov

*para determinados casos la distribución se ajusta con la inclusión del parámetro de umbral.

Tabla 61: Variabilidad de la vida útil en años – pavimento de hormigón

Escenario		Vida Útil Años					
		FDP				Int. tolerancia IC95%	
		COV (%)	FDP	AD	P-value	Mínimo	Máximo
H3.1	TMDAc	35%	Gamma	0,7	0,073	8,637	38,436
H3.2	Sc (MPa)	2%	Weibull *	0,594	0,079	32,825	35,226
H3.3	D (mm)	55%	Weibull *	0,658	0,091	5,888	85,124
H3.4	D+TMFAc	57%	Weibull *	0,729	0,062	5,9	88,527
H3.5	Sc+TMFAc	57%	Weibull	0,675	0,082	5,498	97,023
H3.6	kc (MPa/m)	14%	Weibull *	0,799	0,018	22,625	42,698
H10.1	TMDAc	36%	Gamma	0,574	0,156	8,452	38,901
H10.2	Sc (MPa)	2%	Gamma	0,492	0,229	33,413	35,288
H10.3	D (mm)	59%	Gamma	0,632	0,107	6,222	96,969
H10.4	D+TMDAc	62%	Weibull *	0,601	0,124	4,433	104,829
H10.5	Sc+TMDAc	27%	Gamma	0,664	0,087	19,934	63,339
H10.6	kc (MPa/m)	2%	Normal	0,427	0,312	33,407	35,281
H20.1	TMDAc	36%	Gamma	0,271	>0,250	8,269	38,406
H20.2	Sc (MPa)	2%	Normal	0,205	0,874	33,33	35,286
H20.3	D (mm)	60%	Gamma	0,439	>0,205	5,977	99,764
H20.4	D+TMDAc	62%	Weibull	0,489	0,233	4,634	106,993
H20.5	Sc+TMFAc	28%	Gamma	0,287	>0,250	19,346	62,36
H20.6	kc (MPa/m)	2%	Normal	0,427	0,312	33,407	35,281

*para determinados casos la distribución se ajusta con la inclusión del parámetro de umbral

Tabla 62: Estadística descriptiva del desempeño Nt – Pavimento de asfalto

Escenario	Parámetro	Nt – Desempeño real - Ejes Equivalentes					
		Media	Desv.Est.	COV(%)	Mediana	Asimetría	Curtosis
3.1	h1 (mm)	1,56E+07	2,40E+07	154,01	7,86E+06	4,13	23,43
3.2	MR_SR (MPa)	3,64E+07	4,18E+07	114,7	2,28E+07	3,73	20,45
3.3	SN (mm)	1,50E+11	3,41E+12	2270,54	1,86E+07	31,17	980,55
3.5	SN+h1	3,56E+07	3,62E+07	101,63	2,45E+07	3,81	26,86
3.6	TMDAc+h1	1,74E+07	3,09E+07	177,91	6,74E+06	4,95	33,15
10.1	h1 (mm)	5,27E+07	8,79E+07	166,84	2,15E+07	3,97	20,93
10.2	MR_SR (MPa)	1,15E+08	1,18E+08	102,53	7,97E+07	2,9	11,9
10.3	SN (mm)	2,31E+11	2,12E+12	914,2	6,57E+07	13,64	201,41
10.5	SN+h1	1,26E+08	1,23E+08	97,43	8,51E+07	2,37	7,2
10.6	TMDAc+h1	5,66E+07	1,04E+08	183,43	2,40E+07	4,64	28,55
20.1	h1 (mm)	1,07E+08	2,03E+08	190,8	4,47E+07	6,49	67,15
20.2	MR_SR (MPa)	1,79E+08	1,95E+08	108,77	1,17E+08	2,93	12,06
20.3	SN (mm)	1,15E+12	1,73E+13	1509,44	1,34E+08	24,93	682,95
20.5	SN+h1	2,13E+08	2,58E+08	121,31	1,34E+08	4,33	28,51
20.6	TMDAc+h1	1,34E+08	4,06E+08	304,34	4,80E+07	19,69	507,79

Tabla 63: Estadística descriptiva de la vida útil – Pavimento de asfalto

Escenario	Parámetro	Vida Útil - Años					
		Media	Desv.Est.	COV(%)	Mediana	Asimetría	Curtosis
3.1	h1 (mm)	24,956	17,56	70,36	21,348	1,07	0,98
3.2	MR_SR (MPa)	24,138	13,805	57,19	21,13	0,91	0,91
3.3	SN (mm)	60,36	71,84	119,03	28,33	1,3	0,83
3.4	TMDAc	20,52	7,246	35,31	19,631	0,61	0,25
3.5	SN+h1	36,532	15,394	42,14	34,495	0,67	0,26
3.6	TMDAc+h1	20,418	7,295	35,73	19,457	0,61	0,43
10.1	h1 (mm)	23,849	18,61	78,03	18,443	1,19	0,97
10.2	MR_SR (MPa)	24,141	12,991	53,81	22,151	0,9	0,66
10.3	SN (mm)	61,36	72,57	118,27	29,33	1,3	0,86
10.4	TMDAc	19,875	6,867	34,55	19,29	0,67	0,6

10.5	SN+h1	37,335	16,434	44,02	35,071	0,63	0,05
10.6	TMDAc+h1	20,502	7,539	36,77	19,235	0,71	0,37
20.1	h1 (mm)	23,82	18,306	76,85	18,94	1,29	1,7
20.2	MR_SR (MPa)	23,472	13,523	57,61	20,98	0,91	0,63
20.3	SN (mm)	68,07	81,32	119,48	34,64	1,36	1,19
20.4	TMDAc	20,111	7,042	35,01	19,402	0,74	0,72
20.5	SN+h1	37,193	17,122	46,04	34,705	0,76	0,49
20.6	TMDAc+h1	20,722	7,249	34,98	20,02	0,57	0,28

Tabla 64: Estadística descriptiva del desempeño Nt – Pavimento de hormigón

Escenario	Parámetro	Nt – Desempeño real - Ejes Equivalentes					
		Media	Desv.Est.	CoefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
3.2	Sc (MPa)	7,33E+06	1,88E+05	2,56	7,33E+06	-0,11	0,04
3.3	D (mm)	1,34E+07	1,82E+07	136,02	7,09E+06	3,72	18,6
3.4	D+TMFAc	1,11E+07	1,18E+07	106,62	6,53E+06	1,94	3,63
3.5	Sc+TMFAc	7,33E+06	2,34E+05	3,19	7,33E+06	-6,04	108,85
3.6	kc+h2 (mm)	7,41E+06	1,82E+06	24,5	7,35E+06	0,09	0,07
10.2	Sc (MPa)	2,48E+07	6,03E+05	2,44	2,48E+07	-0,07	-0,12
10.3	D (mm)	5,22E+07	8,88E+07	170,16	2,36E+07	4,95	35,02
10.4	D+TMDAc	5,29E+07	9,83E+07	185,96	2,40E+07	6,79	71,51
10.5	Sc+TMDAc	2,48E+07	6,21E+05	2,51	2,48E+07	0,08	-0,05
10.6	kc+h2 (mm)	2,46E+07	5,08E+06	20,65	2,49E+07	-0,21	-0,17
20.2	Sc (MPa)	4,85E+07	1,23E+06	2,55	4,85E+07	0,05	-0,14
20.3	D (mm)	1,08E+08	1,92E+08	178,27	4,89E+07	5,23	38,73
20.4	D+TMDAc	1,20E+08	2,41E+08	200,6	4,85E+07	6,21	52,2
20.5	Sc+TMFAc	4,85E+07	1,22E+06	2,51	4,85E+07	0,05	-0,1
20.6	kc+h2 (mm)	4,84E+07	8,98E+06	18,56	4,90E+07	-0,31	0,13

Tabla 65: Estadística descriptiva de la vida útil – Pavimento de hormigón

Escenario	Parámetro	Vida Util - Años					
		Media	Desv.Est.	CoefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
3.1	TMDAc	20,835	7,397	35,5	19,866	0,62	0,04
3.2	Sc (MPa)	34,344	0,484	1,41	34,357	-0,16	0,07
3.3	D (mm)	37,358	19,983	53,49	33,742	0,72	0,1
3.4	D+TMFAc	38,53	20,721	53,78	35,314	0,55	-0,3
3.5	Sc+TMFAc	40,515	23,11	57,04	36,41	0,78	0,29
3.6	kc (MPa/m)	34,13	4,791	14,04	34,419	-0,5	0,56
10.1	TMDAc	20,851	7,422	35,6	20,05	0,61	0,63
10.2	Sc (MPa)	34,344	0,46	1,34	34,348	-0,13	-0,1
10.3	D (mm)	37,659	22,017	58,46	33,455	0,86	0,52
10.4	D+TMDAc	40,769	25,374	62,24	35,749	0,82	0,25
10.5	Sc+TMDAc	38,533	10,542	27,36	37,787	0,37	0,11
10.6	kc (MPa/m)	34,344	0,46	1,34	34,348	-0,13	-0,1
20.1	TMDAc	20,528	7,376	35,93	19,813	0,55	0,03
20.2	Sc (MPa)	34,308	0,48	1,4	34,323	0	-0,15
20.3	D (mm)	38,203	22,953	60,08	34,542	0,94	0,77
20.4	D+TMDAc	41,864	25,842	61,73	37,701	0,86	0,51
20.5	Sc+TMFAc	37,742	10,487	27,78	36,912	0,42	0,16
20.6	kc (MPa/m)	34,344	0,46	1,34	34,348	-0,13	-0,1

Tabla 66: Variabilidad en el diseño – número estructural SN(mm)

Parámetro	SN (mm)					
	COV (%)	FDP			Int. tolerancia IC95%	
		FDP	AD	P-value	Mínimo	Máximo
A3.2 MR_SR (MPa)	14%	Lognormal	0,401	0,359	59,978	105,176
A3.4 TMDAc	8%	Lognormal	0,359	0,451	65,184	88,876
A10.2 MR_SR (MPa)	12%	Gamma	0,23	>0,250	73,238	119,966
A10.4 TMDAc	7%	Lognormal	0,284	0,632	78,66	105,01
A20.2 MR_SR (MPa)	13%	Gamma	0,243	>0,250	77,818	131,312
A20.4 TMDAc	7%	Gamma	0,274	>0,250	86,261	114,957

Tabla 67: Variabilidad en el diseño – espesor de losa D(mm)

Escenario		D(mm)					
		COV (%)	FDP			Int. tolerancia IC95%	
			FDP	AD	P-value	Mínimo	Máximo
H3.1	TMDAc	10%	Normal	0,501	0,207	129,173	195,793
H3.6	kc (MPa/m)	6%	Loglogística	0,302	>0,250	142,482	185,269
H10.1	TMDAc	10%	Lognormal	0,519	0,187	165,871	244,281
H10.6	kc (MPa/m)	4%	Lognormal*	0,313	*	186,565	222,455
H20.1	TMDAc	9%	Lognormal	0,177	0,921	189,084	273,429
H20.6	kc (MPa/m)	4%	Lognormal*	0,836	*	211,174	245,909

Tabla 68: Variabilidad combinada en el diseño – número estructural SN(mm)

Nivel de tránsito (ref)	SN (mm)		Nivel de tránsito admisible (10^6)		MR_SR (MPa)	
	P80%	Ref	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3E06	76	90	0,61	4,65	62	291
10E06	92	107	1,89	16,7		
20E06	100	114	3,90	31,9		

Tabla 69: Variabilidad combinada en el diseño – espesor de losa D(mm)

Nivel de tránsito (ref)	D (mm)		Nivel de tránsito admisible (10^6)		kc (MPa/m)	
	P80%	Ref	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3E06	178	191	0,73	4,80	111	209
10E06	220	235	1,44	15,50		
20E06	248	262	3,52	32,60		