UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE

SENSIBILIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS POR LA GUÍA EMPÍRICO – MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS GEMDP AASHTO 2008

FERNANDO SOTOMAYOR ALEJANDRE

Memoria para optar al Título de
Ingeniería Civil

Profesor Guía
Rodrigo Delgadillo Sturla

Agosto de 2017

RESUMEN

La Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos y el programa de diseño basado en ésta, son resultado de los proyectos de investigación catalogados NCHRP1-37A, NCHRP1-40D y NCHRP1-40E. La guía y el software fueron adoptados oficialmente por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) el año 2008 y actualizados el año 2015.

Durante los últimos años, a nivel regional y nacional, se han desarrollado varios estudios y memorias de título relacionados con la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos. En dichas memorias, principalmente, se han realizado calibraciones de los modelos de deterioro, y los datos necesarios, utilizados por la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos para la realidad chilena, ya que, dado que esta fue concebida en Estados Unidos de América, los modelos de deterioro y distintos parámetros están calibrados para esa realidad.

El presente estudio surge de la necesidad de evaluar el método propuesto por la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos bajo las condiciones reales de nuestro país. Esto es, emplear los datos y calibraciones realizadas en estudios y memorias anteriores, para, mediante la utilización del software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos, analizar, diseñar y comparar con las metodologías tradicionales (AASHTO 98 y Manual de Carreteras) actualmente utilizadas en Chile.

Se desarrollará una breve descripción de ambos métodos y la metodología que utilizan para el diseño de pavimentos rígidos nuevos. También se explicarán los beneficios, principales innovaciones del método empírico – mecanicista y consideraciones importantes a tomar en cuenta al momento de diseñar con la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos.

Los datos de clima, tránsito y parámetros necesarios para la caracterización de los materiales obtenidos en estudios previos, tal como se comentó, serán procesados y se establecerán valores base y rangos de variación para generar distintos análisis de sensibilidad, donde se medirá la respuesta de los criterios de desempeño propuestos por el método empírico – mecanicista a un parámetro dado. Este análisis de sensibilidad se centrará en los parámetros requeridos para caracterizar el hormigón.

Se realizará también, un análisis de sensibilidad, donde se medirá la incidencia del largo de losa y el Alabeo permanente por construcción, en los criterios de desempeño. Este último parámetro no es utilizado en Chile para el diseño de pavimentos rígidos, por lo que conocer el efecto teórico que tiene sobre el diseño de pavimentos es importante.

Finalmente, se concluirá sobre los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de esta memoria y la relevancia que tienen en el diseño de pavimentos rígidos nuevos utilizando la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos.

ABSTRACT

The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide and the design program based on it, are the result of the research projects cataloged NCHRP1-37A, NCHRP1-40D and NCHRP1-40E. The guide and software were officially adopted by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) in 2008 and updated in 2015.

During the last years, at regional and national level, several studies and thesis related to the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide have been developed. In these thesis, mainly, calibrations of the models of deterioration and the necessary data used by the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide have been made for the Chilean reality, since it was conceived in the United States of America, deterioration models and different parameters are calibrated for this reality.

The present study arises from the need to evaluate the method proposed by the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide under the real conditions of our country. That is, to use the data and calibrations made in studies and previous thesis, to analyze, design and compare with traditional methodologies (AASHTO 98 and Manual de Carreteras) currently used in Chile.

A brief description of both methods and the methodology used for the design of new rigid pavements will be developed. The benefits, main innovations of the Mechanistic-Empirical method and important considerations to be taken into account when designing with the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide will also be explained.

The climate data, transit data and parameters necessary for the characterization of the materials obtained in previous studies, as mentioned, will be processed and base values and ranges of variation will be established to generate different sensitivity analyzes, where the response of the Performance criteria proposed by the Mechanistic-Empirical method to a given parameter will be measure. This sensitivity analysis will focus on the parameters required to characterize the concrete.

A sensitivity analysis will also be carried out, where the incidence of slab length and construction permanent curl will be measured in the performance criteria. This last parameter is not used in Chile for the rigid pavements design, so knowing the theoretical effect that it has on the design of pavements is important.

Finally, it will conclude on the results obtained throughout the development of this thesis and the relevance that they have in the new rigid pavements design using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide.

GLOSARIO

AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportación)

CBR : California Bearing Ratio (Ensayo de Relación de Soporte de California)

CDFs : Cumulative Distribution Functions (Funciones de Distribución Acumulada)

DCV : Distribución por Clase Vehicular

DS : Decreto Supremo

EALF : Equivalent Axle Load Factor (FEE: Factor Eje Equivalente en español)

ESAL : Equivalent Simple Axle Load (EE: Eje Equivalente en español)

FAM : Factor de Ajuste Mensual

FDD : Factor de Distribución Direccional

FDH : Factor de Distribución Horaria

FDP : Factor de Distribución por Pista

FECV : Factor de Equivalencia de Carga Vehicular

FHWA : Federal Highway Administration

IRI : International Roughness Index (Indicador de Rugosidad Internacional)

JPCP : Jointed Plain Concrete Pavement (Pavimento de hormigón con juntas simples)

LTPP : Long-Term Pavement Performance (Programa de comportamiento de Pavimento a Largo Plazo)

MOP : Ministerio de Obras Públicas

MEPDG : Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista)

NCHRP : National Cooperative Highway Research Program (Programa Nacional Corporativo de Investigación de Carreteras)

NEC : Número de Ejes por tipo de Camión

TDMAC : Transito Diario Medio Anual de Camiones

°C : Grados Celsius

cm : Centímetro

ft : Pie (unidad de medida de longitud equivalente a 0.3048 metros)

hr : Hora

in : Pulgada (unidad de medida de longitud equivalente a 2.54 centímetros)

J : Joule (unidad de medida de energía en el sistema internacional)

K	**:** Grados Kelvin
kg	**:** Kilogramo
kip	**:** Kilo libra (unidad de medida de masa equivalente a 1000 libras)
kN	**:** Kilo newton
lb	**:** Libra (unidad de medida de masa equivalente a 0.4563 kilógramos)
m	**:** Metro
mm	**:** Milímetro
MM	**:** Millón
MPa	**:** Mega Pascal
psi	**:** Libra por pulgada cuadrada
s	**:** Segundo
T	**:** Tonelada
μ	**:** Módulo de Poisson de un material

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL V
ÍNDICE DE TABLAS VIII
ÍNDICE DE FIGURAS X
1. INTRODUCCIÓN 13
1.1. ANTECEDENTES GENERALES 13
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO 15
1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO 16
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO 16
2. MÉTODO DISEÑO DE PAVIMENTOS NUEVOS DE HORMIGÓN SIMPLE CON JUNTAS 18
2.1. MÉTODO DE DISEÑO DEL MANUAL DE CARRETERAS 18
2.1.1. DESARROLLO DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS 18
2.1.2. FACTORES DE DISEÑO DEL MÉTODO AASHTO 93 25
2.1.3. GUÍA SUPLEMENTARIA AASHTO 1998 46
2.1.4. MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 3 51
2.2. MÉTODO DE DISEÑO SEGÚN LA GUÍA EMPÍRICO – MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS GEMDP AASHTO 2008 62
2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO 62
2.2.2. DATOS DE ENTRADA DE DISEÑO 64
2.2.3. MODELO DE RESPUESTA ESTRUCTURAL 66
2.2.4. ACUMULACIÓN DE DAÑO INCREMENTAL 67
2.2.5. PREDICCIÓN DE DETERIOROS 67
2.2.6. PREDICCIÓN DE LA REGULARIDAD (IRI) 71
2.2.7. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y MODIFICACIÓN DEL DISEÑO 71
2.2.8. CONFIABILIDAD DE DISEÑO 71
3. INFORMACIÓN DE TRÁNSITO REQUERIDA EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS 76
3.1. INTRODUCCIÓN 76
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO 76
3.2.1. VOLUMEN DE TRÁFICO REFERIDO AL AÑO BASE 79
3.2.2. FACTORES DE AJUSTE DEL VOLUMEN DE TRÁFICO 80
3.2.3. FACTORES DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR EJE 82
3.2.4. DATOS DE ENTRADA GENERALES DEL TRÁFICO 84
3.3. COMENTARIOS 87
4. INFORMACIÓN DE MATERIALES REQUERIDA EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS 90
4.1. INTRODUCCIÓN 90
4.2. MATERIALES 90
4.2.1. HORMIGÓN 91
4.2.2. SUB-RASANTE Y BASE 97
4.3. NIVEL DE JERARQUÍA 101
4.4. COMENTARIOS 102
5. VALORES BASE Y RANGO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES (HORMIGÓN, BASE Y SUB-

RASANTE) EN LA GUÍA EMPÍRICO-MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS. 103
5.1. INTRODUCCIÓN 103
5.2. PARÁMETROS 103
5.3. CONSIDERACIONES INICIALES 104
5.4. RANGOS DE VALORES PARA PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN 105
5.4.1. PESO UNITARIO 106
5.4.2. RAZÓN DE POISSON 106
5.4.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA 107
5.4.4. CAPACIDAD CALORÍFICA 107
5.4.5. ABSORCIÓN SUPERFICIAL DE ONDAS CORTAS 107
5.4.6. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA 108
5.4.7. CONTENIDO DE CEMENTO 108
5.4.8. RAZÓN AGUA/CEMENTO 108
5.4.9. TEMPERATURA DE ESFUERZO CERO 109
5.4.10. RETRACCIÓN REVERSIBLE 109
5.4.11. MÓDULO DE ELASTICIDAD 109
5.4.12. MÓDULO DE RUPTURA 110
5.4.13. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA 110
5.5. OTRAS VARIABLES CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS 110
5.5.1. TIPO DE AGREGADO 110
5.5.2. TIPO DE CEMENTO 111
5.5.3. VIDA DE DISEÑO 111
5.6. VALORES PARA PARÁMETROS DE LA SUB-RASANTE Y BASE 111
5.6.1. SUB-RASANTE 111
5.6.2. BASE GRANULAR 111
5.7. VALORES BASE PARA LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO 113
5.7.1. IRI 113
5.7.2. ESCALONAMIENTO 113
5.7.3. AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL 113
5.7.4. CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO 114
6. SENSIBILIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO UTILIZANDO EL SOFTWARE DE LA GUÍA EMPÍRICO-MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS. 115
6.1. INTRODUCCIÓN 115
6.2. BASES DE DATOS Y CRITERIOS NECESARIOS PARA MATRIZ DE CASOS 115
6.2.1. ESTACIONES CLIMÁTICAS 115
6.2.2. ESPECTROS DE CARGA 115
6.2.3. EJES EQUIVALENTES 116
6.2.4. LARGO DE LOSA 116
6.2.5. ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN 117
6.3. FORMATO DE ARCHIVOS UTILIZADOS EN MATRIZ DE CASOS 117
6.4. MATRIZ DE CASOS PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 118

7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN LA GEMDP AASHTO 2008 124
7.1. INTRODUCCIÓN 124
7.2. SENSIBILIDAD EN EL AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL 125
7.3. SENSIBILIDAD EN EL ESCALONAMIENTO 131
7.4. SENSIBILIDAD EN EL IRI 135
7.5. RESUMEN DE RESULTADOS DE SENSIBILIDAD 139
8. SENSIBILIDAD (TEÓRICA) DEL LARGO DE LOSA Y ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN 142
8.1. INTRODUCCIÓN 142
8.2. SENSIBILIDAD EN EL AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL 142
8.3. SENSIBILIDAD EN EL ESCALONAMIENTO 152
8.4. SENSIBILIDAD EN EL IRI 161
9. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS 169
10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA 173

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1-1: PERÍODOS DE ANÁLISIS SEGÚN GUÍA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS AASHTO 93 28
TABLA 2.1-2: FACTOR DE CARRIL 30
TABLA 2.1-3: PERIODO DE ANÁLISIS 31
TABLA 2.1-4: NIVEL DE CONFIABILIDAD PARA DISTINTAS CLASIFICACIONES FUNCIONALES 32
TABLA 2.1-5: DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL. 34
TABLA 2.1-6: VALORES PARA EL ERROR ESTÁNDAR COMBINADO S_O 35
TABLA 2.1-7: COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA (J) 45
TABLA 2.1-8: CALIDAD DE DRENAJE 45
TABLA 2.1-9: COEFICIENTE DE DRENAJE 46
TABLA 2.1-10: ÍNDICES DE SERVICIABILIDAD 54
TABLA 2.1-11: VIDA DE DISEÑO 55
TABLA 2.1-12: NIVEL DE CONFIANZA Y VALOR DEL S_0 56
TABLA 2.1-13: RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN (PROMEDIO A LOS 28 DÍAS) 58
TABLA 2.1-14: MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE LAS BASES 58
TABLA 2.1-15: FACTOR DE AJUSTE POR TIPO DE BERMA 59
TABLA 2.2-1: VALORES RECOMENDADOS DE CONFIABILIDAD 75
TABLA 3.3-1: NIVEL DE INFLUENCIA DE LAS VARIABLES 88
TABLA 3.3-2: LEYENDA TABLA 3.3-1 88
TABLA 4.2-1: MODELOS RELACIONADOS AL ÍNDICE DE MATERIALES Y PROPIEDADES DE RESISTENCIA PARA MÓDULO RESILIENTE 100
TABLA 4.2-2: VALORES TÍPICOS PARA EL MÓDULO RESILIENTE 100
TABLA 4.3-1: NIVEL JERÁRQUICO DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA CARACTERIZAR LOS MATERIALES 101
TABLA 5.3-1: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS CONSTANTES EN LA SENSIBILIZACIÓN 105
TABLA 5.3-2: PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN CONSTANTES EN LA SENSIBILIZACIÓN 105
TABLA 5.4-1: RANGO DE VALORES PARA PESO UNITARIO 106
TABLA 5.4-2: RANGO DE VALORES PARA RAZÓN DE POISSON 106
TABLA 5.4-3: RANGO DE VALORES PARA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA 107
TABLA 5.4-4: RANGO DE VALORES PARA CAPACIDAD CALORÍFICA 107
TABLA 5.4-5: RANGO DE VALORES PARA ABSORCIÓN SUPERFICIAL DE ONDAS CORTAS 107
TABLA 5.4-6: RANGO DE VALORES PARA COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA 108
TABLA 5.4-7: RANGO DE VALORES PARA CONTENIDO DE CEMENTO 108
TABLA 5.4-8: RANGO DE VALORES PARA RAZÓN AGUA/CEMENTO 108
TABLA 5.4-9: RANGO DE VALORES PARA TEMPERATURA ESFUERZO CERO 109
TABLA 5.4-10: RANGO DE VALORES PARA RETRACCIÓN REVERSIBLE 109
TABLA 5.4-11: RANGO DE VALORES PARA MÓDULO DE ELASTICIDAD 109
TABLA 5.4-12: RANGO DE VALORES PARA MÓDULO DE RUPTURA 110
TABLA 5.4-13: RANGO DE VALORES PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA 110
TABLA 5.5-1: VALORES PARA TIPO DE AGREGADO 110
TABLA 5.5-2: VALORES PARA TIPO DE CEMENTO 111
TABLA 5.5-3: VALORES PARA VIDA DE DISEÑO 111
TABLA 5.6-1: VALORES DE PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA SUB-RASANTE 111
TABLA 5.6-2: VALORES DE PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA BASE GRANULAR 112
TABLA 5.7-1: VALORES BASE PARA IRI 113
TABLA 5.7-2: VALORES BASE PARA ESCALONAMIENTO 113

TABLA 5.7-3: VALORES BASE PARA AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL 113
TABLA 5.7-4: VALORES BASE PARA CONFIABILIDAD 114
TABLA 6.2-1: ESTACIONES CLIMÁTICAS UTILIZADAS 115
TABLA 6.2-2: ESPECTROS DE CARGA COMPLETOS POR EJE UTILIZADOS 115
TABLA 6.2-3: EQUIVALENCIA ENTRE EE Y ESPECTROS DE CARGA COMPLETOS POR EJE . 116
TABLA 6.2-4: VALORES DE LARGOS DE LOSA UTILIZADOS..... 116
TABLA 6.2-5: VALORES DE ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS 117
TABLA 7.5-1: RESUMEN DE SENSIBILIDAD DE CRITERIOS DE DESEMPEÑO RESPECTIVO A CADA PARÁMETRO..... 139
TABLA 7.5-2: RESUMEN DE SENSIBILIDAD DE CRITERIOS DE DESEMPEÑO RESPECTIVO A CADA PARÁMETRO (ESTUDIO INTERNACIONAL) 140
TABLA 7.5-3: RESUMEN DE PARÁMETROS MÁS SENSIBLES SEGÚN AUTORES..... 140
TABLA 7.5-4: RESUMEN PARÁMETROS MÁS SENSIBLES "SENSITIVITY QUANTIFICATION OF JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT MECHANISTIC-EMPIRICAL PERFORMANCE PREDICTIONS" (2013). CEYLAN, KIM, GOPALAKRISHNAN, SCHWARTZ AND LI. 141
TABLA 8.1-1: VALORES DE LARGO DE LOSA Y ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN USADOS EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 142

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1-1: UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO VIAL DE LA AASHO SOBRE LA FUTURA AUTOPISTA INTERURBANA I-80, DE LA RED INTERESTATAL DE LOS ESTADOS UNIDOS .. 20
FIGURA 2.1-2: CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES DE PRUEBA EN LOS CIRCUITOS 21
FIGURA 2.1-3: CIRCUITOS DE PRUEBA DE AASHO ROAD TEST 21
FIGURA 2.1-4: ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LAS PISTAS DE PRUEBA DEL EXPERIMENTO VIAL DE LA AASHO 22
FIGURA 2.1-5: TIPOS DE CARGA POR "EJE SIMPLE" Y "EJE DOBLE" UTILIZADOS EN LOS DIFERENTES CIRCUITOS DEL EXPERIMENTO VIAL DE LA AASHO 23
FIGURA 2.1-6: NOMOGRAMA DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS. CON MODELACIÓN DE SU USO SEGÚN GUÍA AASHTO 93 26
FIGURA 2.1-7: CONTINUACIÓN DE NOMOGRAMA DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS SEGÚN GUÍA AASHTO 93 27
FIGURA 2.1-8: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PERÍODO DE ANÁLISIS 28
FIGURA 2.1-9: DEFINICIÓN GRÁFICA DE LA CONFIABILIDAD (R) Y EL FACTOR DE SEGURIDAD DE DISEÑO (F_R) 33
FIGURA 2.1-10: NIVEL ÓPTIMO DE CONFIABILIDAD 36
FIGURA 2.1-11: PLANILLA DE EVALUACIÓN DEL VALOR DEL PSR 37
FIGURA 2.1-12: SIGNIFICADO DE LOS PRINCIPALES TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN DEL PSI 38
FIGURA 2.1-13: TENDENCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS 40
FIGURA 2.1-14: RELACIÓN APROXIMADA ENTRE LOS VALORES K Y OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO 41
FIGURA 2.1-15: TRANSFERENCIA DE CARGA 44
FIGURA 2.1-16: PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE ESPESOR DE LOSA 52
FIGURA 2.1-17: VERIFICACIÓN DE ESCALONAMIENTO EN JUNTAS TRANSVERSALES 60
FIGURA 2.1-18: VERIFICACIÓN DEL ESPESOR POR CARGA DE ESQUINA 61
FIGURA 2.2-1: POSIBLE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN 64
FIGURA 2.2-2: POSICIÓN CRÍTICA PARA AGRIETAMIENTO DE ABAJO HACIA ARRIBA 69
FIGURA 2.2-3: POSICIÓN CRÍTICA PARA AGRIETAMIENTO DE ARRIBA HACIA ABAJO 70
FIGURA 2.2-4: POSICIÓN CRÍTICA PARA ESCALONAMIENTO 71
FIGURA 2.2-5: CONCEPTO DE LA CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO PARA LA RUGOSIDAD (IRI) . 73
FIGURA 2.2-6: EJEMPLO DEL CONCEPTO DE LA CONFIABILIDAD DEL 80% PARA LA PREDICCIÓN DEL AGRIETAMIENTO 74
FIGURA 3.2-1: DIFERENCIA ENTRE EL ESPESOR OBTENIDO POR MC Y LOS ESPESORES OBTENIDOS POR LA GEMDP AASHTO 2008 BAJO EL CRITERIO DE AGRIETAMIENTO (E[MC] – E[GEMDPAGRIET]) (MEMORIA ITURRIAGA 2014) 84
FIGURA 4.2-1: ESTRUCTURA COMÚN DE UN PAVIMENTO RÍGIDO 90
FIGURA 6.2-1: REPRESENTACIÓN ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN 117
FIGURA 6.3-1: FORMATO DE NOMBRE DE ARCHIVOS PARA MATRIZ DE CASOS 118
FIGURA 6.4-1: MATRIZ DE CASOS (EE, TRÁFICO, CLIMA) 119
FIGURA 6.4-2: MATRIZ DE CASOS PARA TRÁFICO: ARICA Y CLIMA: ARICA 119
FIGURA 6.4-3: MATRIZ DE CASOS PARA TRÁFICO: ARICA Y CLIMA: SANTIAGO 120
FIGURA 6.4-4: MATRIZ DE CASOS PARA TRÁFICO: ARICA Y CLIMA: PUNTA ARENAS 120
FIGURA 6.4-5: MATRIZ DE CASOS PARA TRÁFICO: SANTIAGO Y CLIMA: ARICA 121
FIGURA 6.4-6: MATRIZ DE CASOS PARA TRÁFICO: SANTIAGO Y CLIMA: SANTIAGO 121
FIGURA 6.4-7: MATRIZ DE CASOS PARA TRÁFICO: SANTIAGO Y CLIMA: PUNTA ARENAS ... 122

FIGURA 7.2-1: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 127
FIGURA 7.2-2: SENSIBILIZACIÓN MÓDULO DE RUPTURA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 128
FIGURA 7.2-3: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 129
FIGURA 7.2-4: SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 130
FIGURA 7.3-1: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE EXPANSIÓN TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 133
FIGURA 7.3-2: SENSIBILIZACIÓN CONTENIDO DE CEMENTO - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 133
FIGURA 7.3-3: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 134
FIGURA 7.3-4: SENSIBILIZACIÓN CONDUCTIVIDAD TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 134
FIGURA 7.4-1: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE EXPANSIÓN TÉRMICA - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 137
FIGURA 7.4-2: SENSIBILIZACIÓN CONTENIDO DE CEMENTO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 137
FIGURA 7.4-3: SENSIBILIZACIÓN CONDUCTIVIDAD TÉRMICA - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 138
FIGURA 7.4-4: SENSIBILIZACIÓN ABSORCIÓN SUPERFICIAL DE ONDAS CORTAS - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: TODOS) 138
FIGURA 8.2-1: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 146
FIGURA 8.2-2: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 146
FIGURA 8.2-3: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 147
FIGURA 8.2-4: SENSIBILIZACIÓN RESIST. A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 147
FIGURA 8.2-5: SENSIBILIZACIÓN RESIST. A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 148
FIGURA 8.2-6: SENSIBILIZACIÓN RESIST. A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 148
FIGURA 8.2-7: SENSIBILIZACIÓN PESO UNITARIO - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 149
FIGURA 8.2-8: SENSIBILIZACIÓN PESO UNITARIO - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 149
FIGURA 8.2-9: SENSIBILIZACIÓN PESO UNITARIO - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 150
FIGURA 8.2-10: SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 150
FIGURA 8.2-11: SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 151
FIGURA 8.2-12:SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 151

FIGURA 8.3-1: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 154
FIGURA 8.3-2: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 155
FIGURA 8.3-3: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 155
FIGURA 8.3-4: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 156
FIGURA 8.3-5: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 156
FIGURA 8.3-6: SENSIBILIZACIÓN COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 157
FIGURA 8.3-7: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 157
FIGURA 8.3-8: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 158
FIGURA 8.3-9: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 158
FIGURA 8.3-10: SENSIBILIZACIÓN CONDUCTIVIDAD TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 159
FIGURA 8.3-11: SENSIBILIZACIÓN CONDUCTIVIDAD TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 159
FIGURA 8.3-12: SENSIBILIZACIÓN CONDUCTIVIDAD TÉRMICA - ESCALONAMIENTO (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 160
FIGURA 8.4-1: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 163
FIGURA 8.4-2: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 163
FIGURA 8.4-3: SENSIBILIZACIÓN TEMPERATURA ESFUERZO CERO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 164
FIGURA 8.4-4: SENSIBILIZACIÓN CONTENIDO DE CEMENTO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 164
FIGURA 8.4-5: SENSIBILIZACIÓN CONTENIDO DE CEMENTO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 165
FIGURA 8.4-6: SENSIBILIZACIÓN CONTENIDO DE CEMENTO - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 165
FIGURA 8.4-7: SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 166
FIGURA 8.4-8: SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 166
FIGURA 8.4-9: SENSIBILIZACIÓN CAPACIDAD CALORÍFICA - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 167
FIGURA 8.4-10: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: ARICA) 167
FIGURA 8.4-11: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: PUNTA ARENAS) 168
FIGURA 8.4-12: SENSIBILIZACIÓN RETRACCIÓN REVERSIBLE - IRI (TRÁFICO: TODOS, CLIMA: SANTIAGO) 168

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

El desarrollo de una nación se refleja enormemente en el desarrollo de la infraestructura del mismo. Este punto toca directamente el desarrollo del sistema vial del país, el cual, con su modernización, permite fortalecer las comunicaciones, el transporte y por ende mejorar la competitividad nacional. En Chile, el cambio ha sido notorio y ha tomado énfasis en las últimas dos décadas, con el desarrollo y mejoramiento de la infraestructura vial acorde a las exigencias internacionales.

El diseño y mantenimiento de la infraestructura vial del país es una responsabilidad esencial. Un buen diseño en los pavimentos refleja un menor mantenimiento y reparación del mismo, otorgando beneficios tanto al Estado a través del ahorro en costo y tiempo, como a los usuarios de la vía, entregándoles un mejor confort en la conducción.

Es así como las exigencias en los métodos de diseño también se han elevado, requiriendo cada vez más de procedimientos de diseño precisos. La evolución de estos ha sido desde aquellos métodos puramente empíricos, desarrollados a partir de experimentos de rodado a escala real y basados en ecuaciones de desempeño empíricas limitadas, los que están siendo reemplazados paulatinamente por aquellos métodos que presentan un enfoque del tipo mecanicista y que incorporan conceptos de la ciencia de materiales y ciencias de la ingeniería.

En materia de diseño estructural, en la actualidad el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados en el país es realizado en base fundamentalmente a las recomendaciones establecidas en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportación) edición 1993 junto a su suplemento para pavimentos rígidos de 1998, los cuales corresponden a una metodología empírica, que tiene sus fundamentos principalmente en la prueba “AASHO Road Test”, desarrollada entre los años 1958 y 1960. Esta metodología utiliza ejes equivalentes de carga (ESAL) de 80 [kN] (18 [kip]) que se basan en factores de ejes equivalentes (FEE) que son una función del (i) tipo de pavimento, (ii) espesor de la losa o número estructural, (iii) tipo de eje y carga, y (iv) el índice de serviciabilidad terminal.

A partir de la década del 90 se visualizó la necesidad de tener una nueva guía de diseño de pavimentos basada en una metodología Empírico - Mecanicista la cual, en base a la mecánica de los materiales, determinara la respuesta del pavimento (esfuerzos y deformaciones) ante situaciones críticas de carga y clima, usando modelos matemáticos que relacionaran la respuesta del pavimento con su comportamiento (predicción de deterioros y rugosidad). Fue entonces que la “AASHTO Joint Task Force on Pavements”, la “Federal Highway Administration” y el “National Cooperative Highway Research Program”, patrocinaron el desarrollo del proyecto denominado NCHRP 1-37A junto a los proyectos NCHRP1-40D y NCHRP1-40E, dando como resultado la guía denominada “MEPDG” (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide). De aquí en adelante, nos referiremos a la Guía Empírico - Mecanicista de Diseño de Pavimentos por su sigla en español “GEMDP”. Finalmente, en el año 2008, AASHTO publicó en calidad de Guía Interina la “GEMDP”, para el uso práctico de este nuevo método de diseño de pavimentos.

El desarrollo de la GEMDP AASHTO 2008 ha cambiado los requisitos de caracterización del tráfico para el diseño de pavimentos, utilizando los espectros normalizados de carga en lugar de los ejes equivalentes. Además, la GEMDP AASHTO 2008 no desarrolla el performance del pavimento en términos de la serviciabilidad, sino que se basa en deterioros

a lo largo de la vida útil del pavimento, como el porcentaje de losas agrietadas, escalonamiento y deterioros funcionales como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). En consecuencia, el uso de los ejes equivalentes de carga no es compatible con la GEMPD AASHTO 2008 y existe una necesidad de caracterizar el tráfico directamente. También, la GEMPD AASHTO 2008 ha cambiado los requisitos en cuanto a los parámetros necesarios para la caracterización de los materiales, generando una gran diferencia en cuanto a cantidad y calidad de los datos respecto al método de diseño actual.

Reconociendo la importancia de la modernización de los métodos de diseño, se realizó entre los años 2011 y 2014 una calibración chilena de la GEMDP AASHTO 2008 (Delgadillo et al. 2014). En este trabajo, además de calibrar los modelos de deterioro, se desarrolló una base de datos inicial de estaciones climáticas, de tráfico y de algunas propiedades fundamentales de los materiales para pavimentos rígidos. Esta base de datos, dados los alcances y los recursos del proyecto, no consideró mediciones de todas las propiedades locales de los materiales. Sin embargo, dentro de las conclusiones del mismo, se indica la necesidad de utilizar los modelos calibrados y la información disponible para estudiar la sensibilidad del resto de las variables incorporadas en el diseño y proponer de esta manera la caracterización futura en Chile de las propiedades que se determine más sensibles o relevantes.

Es importante notar que el Volumen 3 del Manual de Carreteras basa el diseño de pavimentos rígidos en el método AASHTO del año 98, el cual a su vez basa las indicaciones y formulas en experiencias y materiales de la época cuando el test fue realizado, por lo que no ha mantenido una evolución a la par de los requerimientos actuales de ingeniería.

Actualmente en Chile, los hormigones de pavimentos se especifican solamente mediante la resistencia característica a la flexotracción asociada a una fracción defectuosa y a una cierta edad, datos que han pasado a ser insuficientes en la medida que los métodos de diseño de pavimentos han ido evolucionando. Métodos de diseño de pavimentos como la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos “GEMDP” requieren de una especificación más detallada de los hormigones, que incluyan propiedades mecánicas y térmicas de sus hormigones.

En el ámbito internacional se han realizado distintos estudios de sensibilidad de los parámetros requeridos por la GEMDP AASHTO 2008 referidos a los criterios de falla, entre los cuales podemos mencionar los trabajos desarrollados por Tanesi et al. (2007)[1], Buch et al. (2008)[2], Haider et al. (2009)[3], Ceylan et al. (2009), Hiller and Roesler (2009)[4], Kampmann (2008)[5], McCracken et al. (2009)[6], Oh and Fernando (2008)[7], Puertas (2008)[8],

[1] Effect of Coefficient of Thermal Expansion Test Variability on Concrete Pavement Performance as Predicted by Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, Transportation Research Record Journal, Tanesi et al., 2007

[2] Evaluation of the 1-37A Design Process for New and Rehabilitated JPCP and HMA Pavements Final Report, The Michigan Department of Transportation, Buch et al., 2008

[3] Evaluation of M-E PDG for Rigid Pavements—Incorporating the State-of-the-Practice in Michigan, 9th International Conference on Concrete Pavements, Haider et al., 2009

[4] Comparison of Mechanistic-Empirical Thickness Design Methods and Predicted Critical Fatigue Locations, 9th International Conference on Concrete Pavements, Hiller and Roesler, 2009

[5] Engineering Properties of Florida Concrete Mixes for Implementing the AASHTO Recommended Mechanistic Empirical Rigid Pavement Design Guide, M.S. Thesis, Kampmann, 2008

[6] Effect of the MEPDG Hierarchical Levels on the Predicted Performance of a Jointed Plain Concrete Pavement, 9th International Conference on Concrete Pavement, McCracken et al., 2009

[7] Development of thickness design tables based on the M-E PDG, Texas Transportation Institute, Oh and Fernando, 2008

[8] Evaluating the JPCP Cracking model of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, M.S. Thesis, Puertas, 2008

Tran et. Al (2008)[9], Moon (2009)[10], Johanneck and Khazanovich (2010)[11] y Elzo et al. (2014), que concluyen que la tendencia en el comportamiento de los pavimentos rígidos es consistente con las expectativas de la ingeniería, sin embargo, la heterogeneidad de los criterios establecidos por los diferentes estudios para clasificar la sensibilidad de los parámetros dificulta la comparación directa de los resultados entre una y otra publicación.

Los resultados de las investigaciones internacionales no son necesariamente aplicables directamente a nuestro país. La existencia de interacciones entre las variables de tráfico, clima y propiedades del hormigón de los pavimentos hace necesario realizar una sensibilización considerando las condiciones nacionales. Puede que parámetros que hayan resultado sensibles para otros climas o tránsitos no sean sensibles para nuestras condiciones, o viceversa.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos generales de este estudio son dos. En primer lugar, se hará una comparación descriptiva entre los parámetros utilizados por el método actual, utilizado para el diseño de pavimentos rígidos en Chile y los requeridos por el método GEMDP AASHTO 2008. Estos parámetros aplican al tráfico y a los materiales utilizados en el diseño de pavimentos rígidos. Posteriormente, se realizará una sensibilización de los parámetros involucrados en el diseño de pavimentos rígidos relativos al material hormigón, utilizando los modelos de deterioro de la GEMDP AASHTO 2008 ya calibrados para Chile, en conjunto con información climática y de tránsito chilenos.

Para materializar dicha meta se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Describir de manera resumida el procedimiento de diseño utilizado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) en el Manual de Carreteras para pavimentos rígidos nuevos.
- Describir de manera resumida el procedimiento utilizado por el software de la GEMDP AASHTO 2008 en el diseño de pavimentos rígidos nuevos.
- Realizar una comparación descriptiva entre parámetros utilizados por cada método de diseño (Manual de Carreteras Volumen 3 y la GEMDP AASHTO 2008) y evaluar su importancia, relativos a la caracterización del tráfico.
- Realizar una comparación descriptiva entre parámetros utilizados por cada método de diseño (Manual de Carreteras Volumen 3 y la GEMDP AASHTO 2008) y evaluar su importancia, relativos a la caracterización de los materiales.
- Establecer valores teóricos base y rangos para las variables de entrada asociadas a la capa de hormigón y otras capas que componen el pavimento rígido, que guarden relación con los materiales empleados y disponibles en el país, su geometría y su influencia sobre los diseños y criterios de desempeño.
- Analizar la sensibilidad en el diseño de pavimentos rígidos a partir de los valores base obtenidos para los parámetros de tráfico, clima y materiales requeridos por el software de la GEMDP AASHTO 2008 tomando en cuenta la realidad chilena.
- Presentar los resultados del Análisis de Sensibilidad respecto a los criterios de desempeño de pavimentos rígidos nuevos utilizados en la GEMDP AASHTO 2008.

---

[9] Coefficient of Thermal Expansion of Concrete Materials: Characterization to Support Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Transportation Research Record Journal, Tran et al., 2008

[10] Evaluation of MEPDG with TxDOT Rigid Pavement Database, FHWA/TX-09/0-5445-3, Moon, 2009

[11] Comprehensive Evaluation of Effect of Climate in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Predictions, Transportation Research Record Journal, Johanneck and Khazanovich, 2010

- Analizar la sensibilidad teórica, en el diseño de pavimentos rígidos, del largo de losa y el Alabeo permanente por construcción y presentar los resultados respecto a los criterios de desempeño de pavimentos rígidos nuevos utilizados en la GEMDP AASHTO 2008.

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO

Este estudio se encuentra limitado a lo siguiente:

- Los procedimientos de diseño descritos corresponden a los de pavimentos nuevos de hormigón simple con juntas (JPCP). Cualquier otro tipo de pavimento no es considerado. Además, los parámetros del hormigón descritos son los requeridos por los procedimientos de diseño del tipo de pavimento antes mencionado.
- En este trabajo se ocupa la versión 2.2 del software de la GEMDP AASHTO 2008 publicada en septiembre de 2015.
- Se asumen condiciones normales de diseño, descartando condiciones de severidad o situaciones constructivas deficientes.
- Se emplean 3 estaciones climáticas del territorio chileno. Estas son: Arica, Santiago y Punta Arenas.
- Se considera, como tamaño mínimo de las losas, tres metros y como tamaño máximo 4.5 [m].
- Este estudio no comprende la definición de espectros de tránsito nuevos o ajustes de los espectros utilizados, pues escapa a los objetivos de este. Se utilizan los espectros de carga y parámetros de tráfico obtenidos por Francisco Iturriaga B. (2014), en su memoria de titulación. Los espectros de carga utilizados son los correspondientes a las ciudades de Arica y Santiago.
- En este estudio no se realizan calibraciones de modelos, ecuaciones de deterioros u otros similares.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se procederá según el orden de los siguientes puntos:

- Revisión bibliográfica general de la literatura disponible relacionada con el diseño de pavimentos rígidos, la guía de diseño GEMDP AASHTO 2008 y los materiales involucrados en este estudio.
- Recopilación y adaptación de datos y valores a partir de las memorias de titulación de la Universidad Técnica Federico Santa María relacionadas con los parámetros de entrada tráfico y clima.
- Recopilación y adaptación de datos y valores a partir de las memorias de titulación de universidades chilenas relacionadas con los parámetros de entrada tráfico y clima que tengan relación con este estudio.
- Recopilación de datos y antecedentes a partir de la bibliografía consultada relacionados con los parámetros de estructura y materiales u otros parámetros.
- Descripción de los parámetros y variables involucradas en el proceso de diseño.
- Aplicación del método de diseño mediante el software de la guía de diseño GEMDP AASHTO 2008.
- Evaluación de las diferencias en el performance del pavimento variando los valores de tráfico, clima y parámetros de materiales requeridos por la guía de diseño GEMDP AASHTO 2008.

- Análisis de sensibilidad en los criterios de desempeño del pavimento rígido referido a los parámetros de estructura y materiales.
- Análisis de resultados de los valores de criterio de desempeño de los pavimentos rígidos de hormigón obtenidos en el Análisis de sensibilidad.
- Análisis de sensibilidad en los criterios de desempeño del pavimento rígido referido al largo de losa y Alabeo permanente por construcción.
- Análisis de resultados de los valores de criterio de desempeño de los pavimentos rígidos de hormigón obtenidos en el Análisis de sensibilidad.
- Planteo de conclusiones y comentarios.

2. MÉTODO DISEÑO DE PAVIMENTOS NUEVOS DE HORMIGÓN SIMPLE CON JUNTAS

2.1. MÉTODO DE DISEÑO DEL MANUAL DE CARRETERAS

La Dirección de Vialidad ha elegido como procedimiento de diseño de pavimentos rígidos (losas de hormigón apoyadas sobre una base), una adaptación a las condiciones nacionales de los métodos desarrollados en los Estados Unidos por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

2.1.1. DESARROLLO DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

Una de las características que conforman la ciencia del diseño de pavimentos se relaciona con su "dinamismo", el cual puede ser definido como el continuo avance en el grado de sus conocimientos.

El desarrollo de los métodos de diseño de pavimentos puede, de una manera muy simplificada y en función de su nivel de información, dividirse en tres grandes etapas:

- Primera Etapa: Antes de la Segunda Guerra Mundial
  Los métodos de diseño se fundamentan en las características de los suelos de fundación y en la comparación del comportamiento de pavimentos similares que habían tenido buena duración. Se conoce que el tráfico tiene efecto sobre el diseño, pero su única medición se basa en el conteo de vehículos, su clasificación en cuanto a intensidad - pesado, medio o ligero - y la carga máxima por eje. Se dispone de más de 18 métodos de diseño, entre los más conocidos están los del “Índice de Grupo” y el “CBR”.
- Segunda Etapa: Después de la Segunda Guerra Mundial y hasta 1988
  Se estudian los efectos de la acción de las cargas en la actuación de los pavimentos, se cuantifican los diversos factores que participan en el diseño y su influencia en el comportamiento de la estructura; se considera, en especial, el efecto de las cargas y su número de aplicaciones sobre el pavimento, y la cuantificación del “grado de falla” de la estructura. Se analizan teóricamente los factores de diseño y se corrigen, o ajustan, estas bases en función del comportamiento real ante el tráfico. En esta etapa han tenido gran influencia los “Ensayos de Carreteras”, modelos a escala natural que han sido el fundamento de los métodos actuales.
  Entre los más conocidos están:
  - Carretera Experimental de Maryland (USA)
  - Carretera Experimental WASHO (USA)
  - Carretera Experimental LARR (ALEMANIA)
  - Experimento Vial de la AASHO (USA)

A continuación, se describen brevemente las principales características de estos tramos de prueba:

- Carretera Experimental de Maryland (USA)
  Fue completada por la HRB en el año 1949 en la vía USA 301 - una autopista interurbana en el estado de Maryland - la cual fue construida con un pavimento de hormigón reforzado con malla. Su objetivo principal era el

determinar el daño causado por distintos tipos de ejes con diferentes cargas, para lo cual se emplearon ejes simples de 8,2 [ton] y 10,1 [ton], y ejes dobles de 14,5 [ton] y 20,3 [ton]. Los principales resultados obtenidos fueron:

a. Se establecen las primeras fórmulas de equivalencias de cargas, al determinarse que el "daño" de una carga simple de 10,1 [ton] era 1,50 veces mayor al producido por otra carga simple de 8,2 [ton].
b. Se determina el efecto de la velocidad, ya que, al comparar tramos bajo las mismas cargas, se observó que aquellos, en los cuales los vehículos circulaban a velocidades menores a 65 [km/h], habían sufrido un 20% más de daño que en aquellos con velocidades mayores a la indicada.
c. Se comprobó la importancia de las juntas de construcción, al verificar el efecto del "bombeo" sobre ellas.

- Carretera Experimental WASHO (USA)
  Este experimento vial fue realizado en el Estado de Idaho en el año 1952, con el objetivo principal de comprobar el efecto de tipos de ejes e intensidad de cargas sobre los pavimentos flexibles. Se variaron los tipos y espesores de capas en sectores del tramo de prueba y se mantuvo constante la carga aplicada. El principal nuevo resultado obtenido fue la determinación que un eje doble de 12,7 [ton] producía el mismo efecto que uno simple de 8,2 [ton].

- Carretera Experimental LARR (ALEMANIA)
  Esta prueba de campo fue realizada durante los años 1957 y 1958 en 3 [km] de la Autopista Nº 36 en Alemania Federal. El pavimento estaba constituido por losas de hormigón armado, o por mezclas de concreto asfáltico, construidas ambas alternativas, sobre bases de suelo-cemento. El material de fundación consistió en una mezcla de grava y arena de 150 [cm] de espesor. Las cargas fueron aplicadas a través de vehículos semitrailers de 24 y 32 [ton] de carga total. Los objetivos de esta prueba eran similares a los de las pruebas anteriores, con los resultados siguientes:
  a. Marcado efecto de las cargas de ejes simples sobre el pavimento, al compararlas con cargas totales de ejes dobles.
  b. Se comprueba el efecto de la temperatura en la aparición de grietas en los pavimentos de hormigón.

- Experimento Vial de la AASHO (USA)
  Ha sido, sin duda alguna, la prueba de carreteras más completa de todas las ejecutadas a la fecha. De la información que en ella se obtuvo se siguen produciendo beneficios, ya que los últimos métodos de diseño se fundamentan en los datos de campo de esta prueba.
  Fue inicialmente conceptuada como una prueba similar a la de la WASHO, pero el Comité Asesor designado para su programación (1951) decide ampliar sus objetivos.
  Desde mediados de 1951 hasta diciembre de 1954 se realizan todas las etapas de planificación - desde la selección del sitio hasta el establecimiento de objetivos - y en abril de 1955 se inician los trabajos de topografía en la ubicación futura de la prueba, y la preparación de planos y especificaciones. En agosto de 1956, cerca de Ottawa, en el Estado de Illinois, comienza la construcción de las instalaciones del proyecto, y en octubre del año 1958 se inicia la aplicación de las cargas sobre los tramos del pavimento construido.

En la Figura 2.1-1 se presenta la ubicación de la prueba y los diferentes "circuitos" construidos en ella.

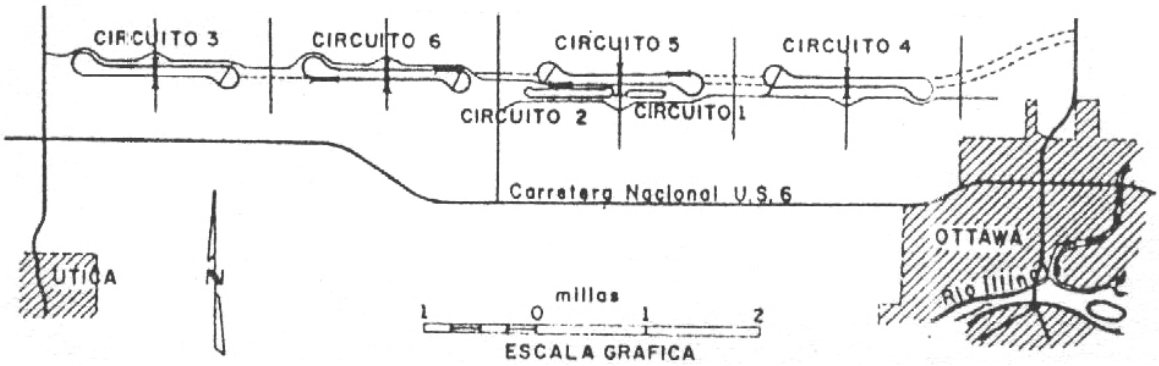


Figura 2.1-1: Ubicación del Experimento Vial de la AASHO sobre la futura autopista interurbana I-80, de la red Interestatal de los Estados Unidos

Dos años más tarde - en octubre de 1960 - se concluye con la etapa de mediciones en campo y se inicia el análisis de la información recogida a lo largo de la prueba. A finales de 1962 - prácticamente 11 años después de decidida la realización de la prueba AASHO - se publican las primeras "Guías Provisionales para el Diseño de Pavimentos".

En el desarrollo de esta vía experimental trabajaron - entre profesionales, técnicos y personal administrativo - más de 170 personas y 400 individuos de tropa encargados de la operación de los camiones con los que se aplicaron las cargas.

El costo de la prueba (en valores de 1960) fue de aproximadamente 27,0 millones de US$, distribuidos de la siguiente manera: 11,99 millones para la construcción de pistas, 10,18 millones para operación e investigación, y 2,69 millones para los gastos de personal técnico y de tropa; el resto del monto se dedicó a administración, construcción de barracas, oficinas y laboratorios.

Se construyeron seis (6) circuitos, identificados del 1 al 6. El número 1 se destinó a medir el efecto del clima y algunas cargas estáticas; el número 2 se sometió a cargas livianas, y los números 3, 4, 5 y 6 se sometieron a diversas cargas pesadas. La Figura 2.1-2 y Figura 2.1-3 muestran la planta típica de los circuitos: la pista norte fue construida con pavimento flexible y la sur con pavimento rígido. Cada una de las tangentes del circuito, con una longitud aproximada a los 2070 [m] lineales, se dividió en sectores de 30 [m] lineales de largo. Cada uno de ellos conformaban las "secciones de prueba", y en cada canal de una sección, a su vez, se aplicaban cargas diferentes.

Las otras características de diseño utilizadas en la prueba son[12]:

- Sub-rasante: Arcilla de baja plasticidad (Clasificación A-6, e = 1 [m])
- Base: Piedra caliza dolomítica triturada (CBR mínimo especificado 75%)
- Sub-base: Mezcla de arena y grava (CBR no debía exceder 60%, e = 3 a 9 [in])
- EE aplicados: 10 millones de EE (18-kip ESAL's)

[12] Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System, Transportation Research Board, 2007 y Highway Research Board's Special Report 61A, The AASHO Road Test: History and Description of the Project, 1961

- Transferencia de carga: Todas las juntas tenían barras de traspaso de carga.
- Espaciamiento de juntas: 15 [ft] (sin acero de refuerzo) y 40 [ft] (con acero de refuerzo leve)
- Espesor de la losa de hormigón = 2.5, 3.5, 5.0, 6.5, 8.0, 9.5, 11.0, y 12.5 [in]

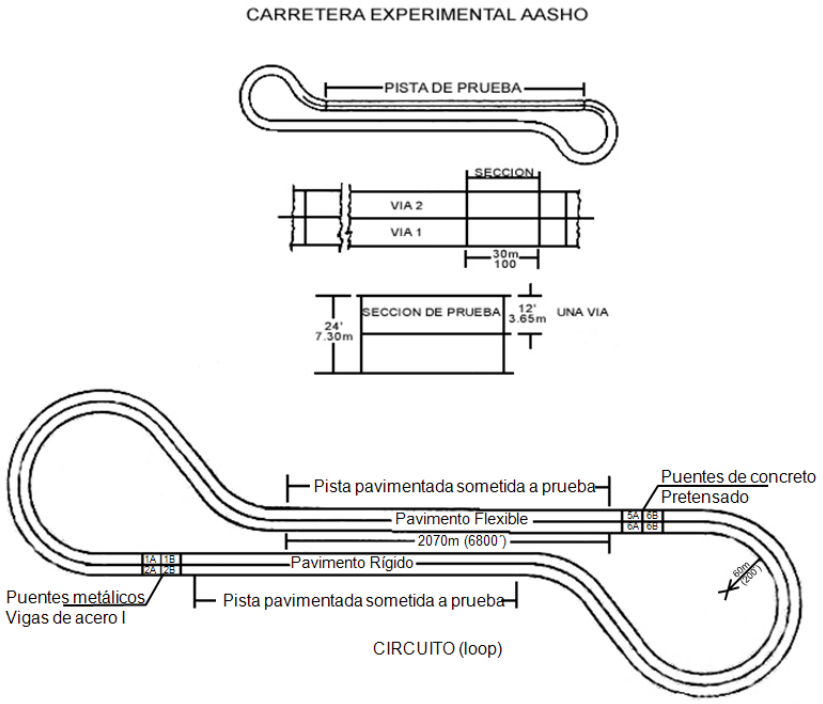


Figura 2.1-2: Características de las secciones de prueba en los circuitos

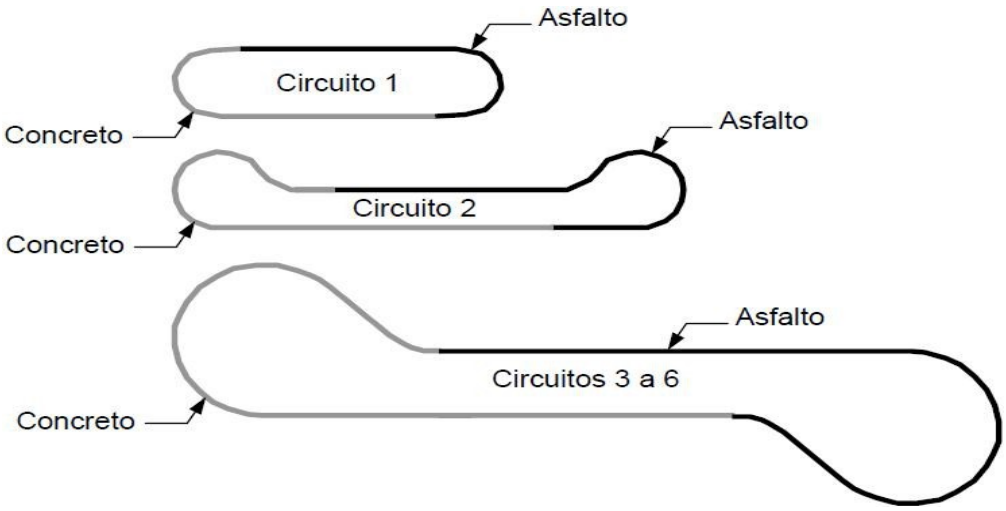


Figura 2.1-3: Circuitos de prueba de AASHO Road Test

Los objetivos básicos planteados para el desarrollo de esta prueba vial fueron:

a. Determinar las relaciones significativas entre el número de repeticiones de cargas por ejes de diferentes magnitudes y configuraciones, y el comportamiento de diferentes secciones de pavimentos - flexibles y rígidos - construidos sobre una misma fundación, pero sobre capas de sub-bases y bases de diversos tipos y espesores.
b. Determinar los efectos significativos de diferentes cargas por eje, y cargas totales, sobre los elementos estructurales de puentes de características conocidas.
c. Realizar estudios especiales referentes a bermas pavimentadas, tipos de bases, fatiga en pavimentos, tamaño y presión de inflado de los neumáticos, vehículos militares especiales, y correlacionar estos resultados con los obtenidos en la investigación básica.
d. Obtener un registro de los recursos y materiales requeridos para mantener las secciones de prueba en condiciones de ser ensayadas.
e. Desarrollar instrumentación, procedimientos de ensayo y laboratorio, datos, gráficos, tablas y fórmulas que reflejarán las características de las diferentes secciones de prueba y que pudieran ser útiles posteriormente en la evaluación de las condiciones estructurales de un pavimento existente.
f. Determinar áreas que requiriesen estudios posteriores.

Figura 2.1-4: Etapa de construcción de las Pistas de Prueba del Experimento Vial de la AASHO

Las pruebas de tráfico consistían en la circulación de vehículos con diferentes configuraciones de ejes simples y dobles, los cuales eran conducidos por las pistas de pruebas. Diez combinaciones de diferentes cargas y ejes fueron utilizadas (Figura 2.1-5), con cargas de ejes simple que variaban de las 2000 [lb] a las 30000 [lb] y con cargas de ejes doble que variaban de las 24000 [lb] a las 48000 [lb][13]. En cada circuito se aplicaron dos cargas diferentes: una de ellas circulaba en uno los canales y la otra en el segundo canal; en ningún momento circularon sobre un mismo canal cargas diferentes.

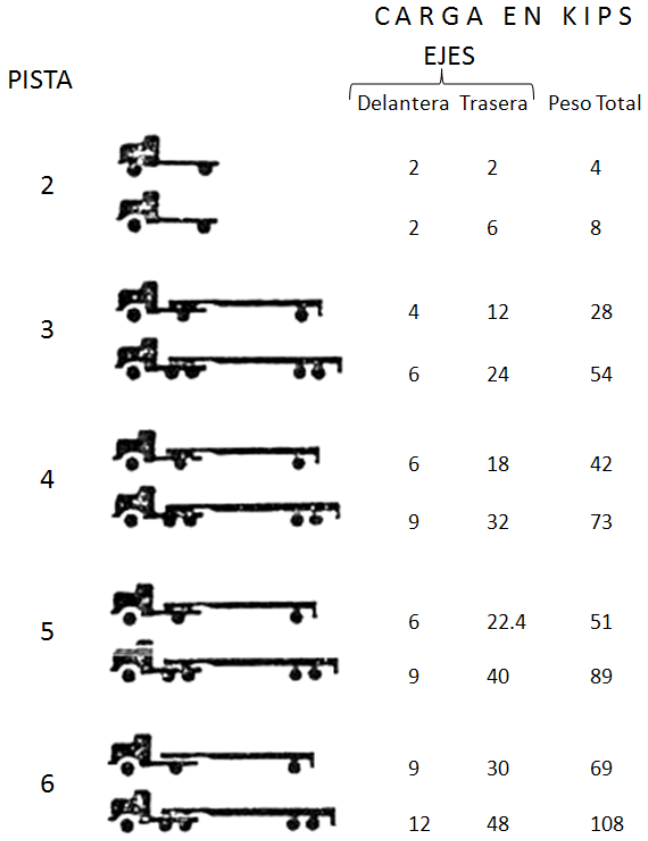


Figura 2.1-5: Tipos de carga por "eje simple" y "eje doble" utilizados en los diferentes circuitos del Experimento Vial de la AASHO

Luego se recopiló la información relacionada con la condición del pavimento con respecto a la presencia de grietas y la cantidad de recarpeteos necesarios para mantener la sección de pavimento en servicio. Los perfiles longitudinales y transversales también fueron obtenidos para determinar la extensión de baches, deformación de la superficie causada por la carga de los vehículos circulando a velocidades muy bajas, esfuerzos impuestos en la subrasante y la distribución de temperatura en las capas del pavimento. Toda esta información fue minuciosamente analizada, y los resultados formaron la

[13] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part I-10

base para la publicación de la “Guía Interina para el Diseño de Estructuras de Pavimento” de la AASHO de 1961[14].

Como se menciona líneas arriba, la primera guía de diseño de pavimentos de la AASHO fue editada en 1961 y luego en 1962, la cual a su vez fue evaluada y revisada por el Comité de Diseño AASHTO en 1972, publicando la “AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures” la cual incorporó experiencias que fueron acumuladas desde la primera edición de la Guía (1961).
En 1981 se revisó parte de la guía correspondiente al diseño de pavimentos rígidos, (Capítulo III)[15].
Entre 1984 y 1985, el Subcomité de Prácticas de Diseño de Pavimentos y consultores revisaron la guía en vigencia, lo que dio como resultado la “AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures” de 1986. Se generaron las siguientes modificaciones en los procedimientos de diseño de pavimentos rígidos respecto a la versión del año 1981[16]:

- Conceptos de Confiabilidad idénticos a aquellos usados para los pavimentos flexibles son introducidos.
- Se introducen los aspectos relacionados con el medio ambiente con el mismo formato que el utilizado en pavimentos flexibles.
- El procedimiento de diseño es modificado para incluir factores como barras de amarre, erosión de la sub-base y diseño de emplantillado.

En 1993, se publicó una nueva versión de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO, la cual incorpora la revisión del diseño de sobrecapas, diseño de subbases delgadas, erosión de la subbase y confinamiento lateral, así como también se extendieron las extrapolaciones de las cargas de tráfico de ejes simples hasta 50000 [lb] y en ejes dobles y triples hasta 90000 [lb]. A la ecuación general de diseño de la guía también se le agregaron algunos factores tales como: Error estándar combinado (So), diferencia de serviciabilidad ($\Delta PSI = P_o - P_t$) y coeficiente de drenaje (Cd).

La publicación de la AASHTO en el año 1998, es una guía suplementaria de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos publicada el año 1993 por AASHTO. Contiene un procedimiento alternativo para el diseño de pavimentos rígidos y diseño de juntas, correspondientes a las secciones 3.2 y 3.3 de la Parte II de la edición de 1993[17].
En esta edición suplementaria de la guía se incorporan factores como la Razón de Poisson, características de la subbase, condiciones climáticas de la zona y cambios en la determinación del módulo de reacción de la subrasante (K), así como también un procedimiento para verificar la aparición de fallas en las juntas, como el escalonamiento de las losas del pavimento.

[14] Ingeniería de Tránsito y Carreteras, Nicholas J. Garber; Lester A. Hoel, Página 1026, 2005

[15] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-3

[16] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-3 (1.1(2))

[17] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-37 y Part II-48

2.1.2. FACTORES DE DISEÑO DEL MÉTODO AASHTO 93

Las variables que intervienen en el diseño de pavimentos rígidos son tomadas en base a un conocimiento empírico, por lo que es importante conocer y entender las consideraciones que tienen que ver con cada una de ellas. El diseño del pavimento rígido involucra el análisis de diversos factores: tráfico, drenaje, clima, características de los suelos, capacidad de transferencia de carga, nivel de serviciabilidad deseado y el grado de confiabilidad al que se desea efectuar el diseño acorde con el grado de importancia de la carretera. Todos estos factores son necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso durante su vida en servicio.

La ecuación fundamental que propone la guía AASHTO 93 para el diseño del espesor de la losa de pavimentos rígidos se muestra en la ecuación 2.1-1.

$$\log(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 7.35 \cdot \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{\frac{1.624 \cdot 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32\,P_t) \cdot \log\left(\frac{S_c' \cdot C_d \cdot (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \cdot J \cdot \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right)}\right)$$

Ecuación 2.1-1: Ecuación fundamental para pavimentos rígidos

Donde:

W_{18} = Número de cargas de 18 [kips] (80 [kN]) previstas.

Z_R = Valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para una confiabilidad R.

S_0 = Desviación estándar de todas las variables.

D = Espesor de la losa del pavimento en pulgadas.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

P_t = Serviciabilidad final.

S'_C = Módulo de rotura del concreto en [psi].

J = Coeficiente de transferencia de carga.

C_d = Coeficiente de drenaje.

E_C = Módulo de elasticidad del concreto en [psi].

k = Módulo de reacción de la subrasante (coeficiente de balasto) en [pci] ([psi/pulgadas]).

La Guía AASHTO 93 propone la solución de la ecuación 2.1-1 por medio de un nomograma, con el cual se obtiene directamente el espesor de la capa de rodadura de la estructura de pavimento rígido. El nomograma de solución se presenta en las figuras 2.1-6 y 2.1-7. También se puede utilizar programas computacionales para el diseño de pavimentos, tal como el WinPAS, desarrollado por la ACPA exclusivamente para el método AASHTO Edición 1993 y DARwin desarrollado por la AASHTO.

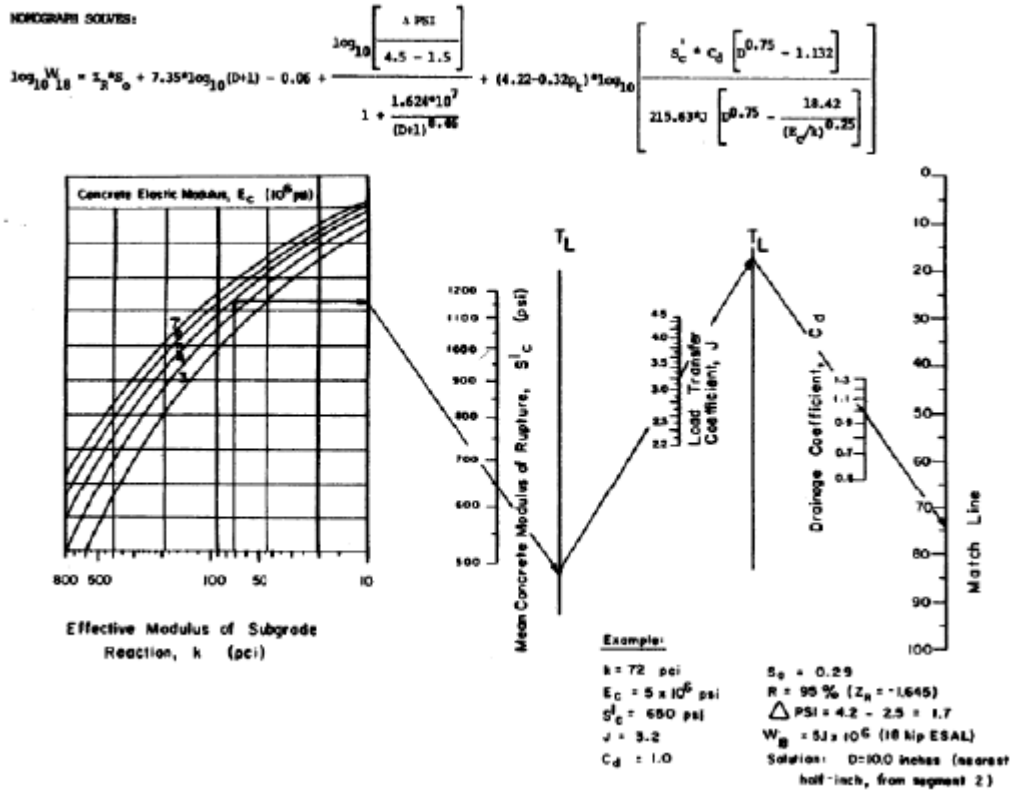


Figura 2.1-6: Nomograma de diseño para pavimentos rígidos. Con modelación de su uso según Guía AASHTO 93

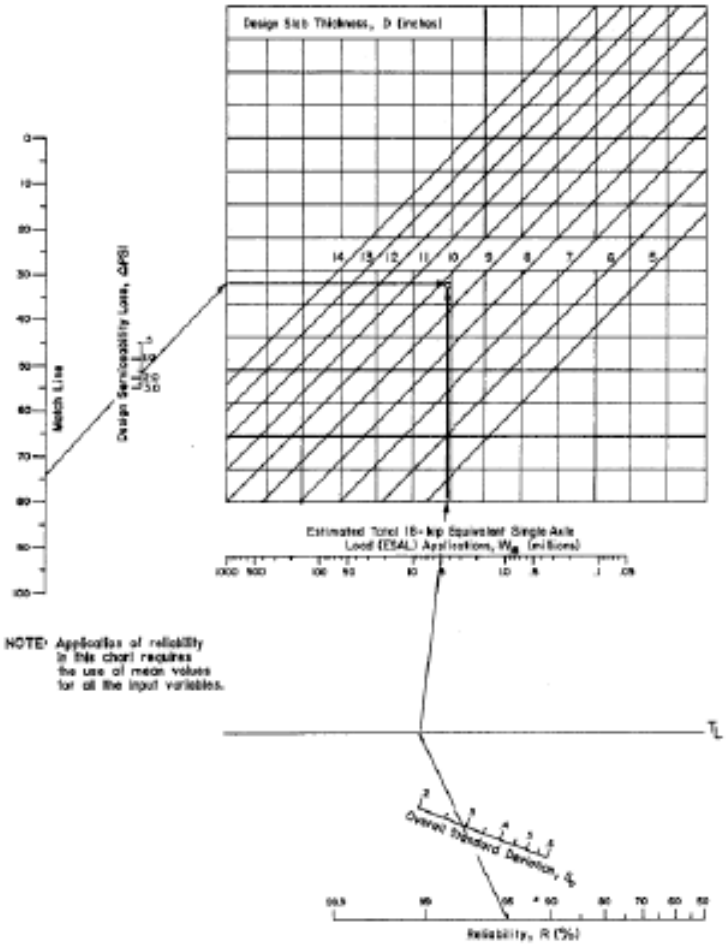


Figura 2.1-7: Continuación de nomograma de diseño para pavimentos rígidos según Guía AASHTO 93

Para una mejor descripción de las variables, éstas se han clasificado de la siguiente manera:

- **Variables de diseño:** Esta categoría se refiere al grupo de criterios que debe ser considerado para el procedimiento de diseño.
- **Criterio de comportamiento:** Representa el grupo de condiciones de fronteras especificado por el usuario, dentro del que una alternativa de diseño deberá comportarse.
- **Propiedades de los materiales para el diseño estructural:** Esta categoría cubre todas las propiedades de los materiales del pavimento y del suelo de fundación, requeridas para el diseño estructural.
- **Características estructurales:** Se refiere a ciertas características físicas de la estructura del pavimento, que tienen efecto sobre su comportamiento.

2.1.2.1. VARIABLES DE DISEÑO

- Variables de tiempo
  Se consideran dos variables: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la puesta en operación del camino y el momento en el que el pavimento requiera rehabilitarse, es decir, cuando éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El período de análisis se refiere al período de tiempo para el cual va a ser conducido el análisis, es decir, el tiempo que puede ser cubierto por cualquier estrategia de diseño. Para el caso en el que no se considere rehabilitaciones, el período de análisis es igual al período de vida útil; pero si se considera una planificación por etapas, es decir, una estructura de pavimento seguida por una o más operaciones de rehabilitación, el período de análisis comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento y el de los distintos refuerzos.
  Para efectos de diseño se considera el período de vida útil, mientras que el período de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto. Los períodos de análisis recomendados son mostrados en la Tabla 2.1-1.

CLASIFICACIÓN DE LA VÍA	PERÍODO DE ANÁLISIS (AÑOS)
Urbana de alto volumen de tráfico	30 – 50
Rural de alto volumen de tráfico	20 – 50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15 - 25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10 – 20

Tabla 2.1-1: Períodos de análisis según Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93

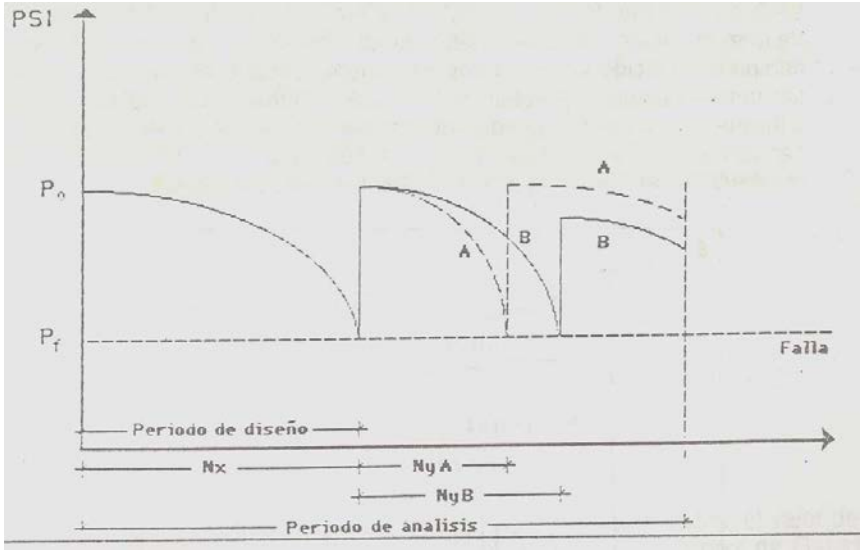


Figura 2.1-8: Representación gráfica del período de análisis

- Espesor
  Es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño de una estructura de pavimento. El espesor se refiere solamente a la capa de hormigón hidráulico que se coloca sobre la base y/o subrasante.

- Tránsito
  El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Los resultados de la AASHO Road Test mostraron que el efecto dañino del paso de un eje de cualquier peso puede ser representado por un número de repeticiones de carga, equivalentes a 8.2 [ton] ó 18 [kips] (ESAL's o Equivalent Single Axle Load), aplicadas en el carril de diseño durante el periodo de diseño del pavimento. Esta simplificación se realizó debido a que en la época en que se desarrolló la AASHO Road Test, a principios de 1960, era mucho más sencillo utilizar un solo número para representar toda la carga por tráfico en las ecuaciones usadas para predecir la vida del pavimento.
  El tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos, y una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse; su determinación usualmente se basa en tasas de crecimiento vehicular, las cuales no son muy precisas. La mayoría de los métodos de diseño consideran esta incerteza, y la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93 propone el uso de Niveles de Confiabilidad, los cuales toman en cuenta estas incertezas en la predicción de las cargas del tráfico y su comportamiento.
  El tráfico se debe de convertir a ESAL's por medio de la multiplicación de varios factores, tal como lo define la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO en el apéndice D, lo cual se presenta en la ecuación 2.1-2.

$$ESAL's = \sum \left(\#\ de\ vehículos\ por\ categoría \cdot F_{sentido} \cdot F_{carril} \cdot F_{crecimiento} \cdot F_{eje_equivalente} \right)$$

Ecuación 2.1-2: Ecuación para conversión de ESAL's

Los factores involucrados en la ecuación 2.1-2 se obtienen por medio de recomendaciones, ecuaciones o tablas que se presentan a continuación.

- Factor de sentido ($F_{sentido}$)
  Relaciona el tráfico promedio diario anual (TPDA) y el sentido de circulación de la vía. La AASHTO en su guía recomienda un valor de 0.5 o lo que es lo mismo, la mitad del tráfico en cada sentido y expresa que algunas experiencias han mostrado que este factor puede variar de 0.3 a 0.7 dependiendo en qué dirección los vehículos van cargados y en cuál van no cargados[18].

- Factor de carril (F_{carril})
  Es la distribución del tráfico en una sola dirección dependiendo del número de carriles con que cuenta cada sentido[19].

[18] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-9

[19] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-9

Factor de carril	
No. carriles por sentido	**Porcentaje de ESAL´s en carril de diseño**
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Tabla 2.1-2: Factor de carril

- Factor de crecimiento ($F_{crecimiento}$)
  Con este factor se obtiene el tráfico esperado en el periodo de diseño de la estructura. Está dado por la siguiente fórmula:

$$F_C = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Ecuación 2.1-3: Factor de crecimiento

Donde:
r = Tasa de crecimiento
n = Periodo de diseño en años

Tasa de crecimiento: La tasa de crecimiento del flujo vehicular depende en gran medida de factores económicos, sociales, capacidad de la vía y tipos de vehículos que circularán. Este parámetro toma en cuenta el crecimiento de tráfico en un año de un determinado lugar, pero este se puede ver disminuido una vez el crecimiento ha llegado a niveles de saturación de la vía en cierto tiempo.
Periodo de diseño en años: Este parámetro hace referencia al periodo de tiempo definido para que el pavimento sea útil desempeñándose satisfactoriamente en función de la proyección de tránsito en años, este factor influye mucho en lo económico. Se recomienda tomar en cuenta consideraciones para extender el periodo de análisis incluyendo una rehabilitación. La Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO proporciona algunos valores con respecto a la importancia de la vía, ver tabla 2.1-3[20].
El periodo de diseño no debe ser confundido con la vida del pavimento, ya que ésta última puede ser extendida por rehabilitaciones periódicas de la superficie o de la estructura del pavimento.

[20] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-7

Periodo de análisis	
Condiciones	**Periodo de análisis (años)**
Alto volumen urbano	30 - 50
Alto volumen rural	20 - 50
Pavimentada de bajo volumen	15 - 25
Superficie no pavimentada bajo volumen	10 - 20

Tabla 2.1-3: Periodo de análisis

- Factor de eje equivalente ($F_{eje_equivalente}$)
  Para el factor de eje equivalente (LEF, por sus siglas en inglés), la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93 proporciona en el Apéndice D las tablas que convierten el tráfico a cargas de ejes simples equivalentes, en función del peso de cada eje, según el vehículo, el índice de serviciabilidad final y el espesor estimado del pavimento[21].
  La conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga (Fec), que es el número de aplicaciones ESAL's aportadas por un eje determinado. Así, el Fce es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un eje estándar de 18 [kips] y la carga producida por otro tipo de eje.

$$LEF = \frac{\#\ de\ ESAL's\ de\ 80\ [kN]\ que\ produce\ una\ pérdida\ de\ serviciabilidad}{\#\ de\ ejes\ x\ [kN]\ que\ producen\ la\ misma\ pérdida\ de\ serviciabilidad}$$

Ecuación 2.1-4: Factor de eje equivalente

- Coeficiente de confiabilidad (R)
  La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente durante su vida útil o período de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medio ambiente dentro de dicho período. Cabe resaltar, que cuando hablamos del comportamiento del pavimento nos referimos a la capacidad estructural y funcional de éste, es decir, a la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito, y asimismo de brindar seguridad y confort al usuario durante el período para el cual fue diseñado. Por lo tanto, la confiabilidad está asociada a la aparición de fallas en el pavimento.
  El concepto de confiabilidad fue utilizado por primera vez en el diseño de pavimentos flexibles en 1973, en Texas (Texas Highway Department), Estados Unidos. Los conceptos fueron desarrollados e incorporados en los procedimientos de diseño de la AASHO en 1973, y finalmente fueron adoptados en la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos AASHTO de 1986. Actualmente, en la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos AASHTO 93 (método de diseño empírico) se emplea el concepto de Confiabilidad para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles, para

[21] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part D-3

considerar la variabilidad asociada con la estimación de las cargas de tráfico, así como la variabilidad asociada al desempeño de la estructura de pavimento.
La Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93 recomienda los siguientes valores del coeficiente de confiabilidad con respecto a la clasificación funcional de la vía. También hay que considerar que el nivel de confiabilidad a adoptar en cada diseño es un problema que depende de factores tanto técnicos como económicos, entre los cuales podemos mencionar: costos de construcción, costos de mantenimiento, costos de operación vehicular, etc.

Confiabilidad		
Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad	
	Urbana	Rural
Autopista	85 - 99.9	80 - 99.9
Arteria primaria	80 - 99	75 - 95
Secundaria o colectora	80 - 95	75 - 95
Local o vecinal	50 - 80	50 - 80

Tabla 2.1-4: Nivel de Confiabilidad para distintas clasificaciones funcionales[22]

- Definición matemática de Confiabilidad
  Por definición, el diseño de un pavimento es satisfactorio siempre y cuando el pavimento no alcance el nivel mínimo de serviciabilidad (serviciabilidad final) antes de que las cargas de tráfico (ESAL's) previstas para el periodo de diseño, hayan sido aplicadas. Así, el éxito del diseño es representado por las siguientes ecuaciones:

$$\log(N_t) \geq \log(n_T)$$

$$0 \leq \ln(N_t) - \ln(n_T)$$

Donde:
$\log(N_t)$ = Número de ESAL's de 80 [kN] que llevan al pavimento a su serviciabilidad final.
$\log(n_T)$ = Número de ESAL's de 80 [kN] previstos que actuarán sobre el pavimento en su período de diseño (vida útil).

Asimismo, $\ln(N_t) - \ln(n_T)$ es la desviación del error combinado (δ_{nN}), y, por lo tanto:

$$\delta_{nN} \geq 0$$

Donde:

[22] Nota: Resultados basados en una encuesta realizada por la AASHTO Pavement Design Task Force. Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-9

$\delta_{nN} = \delta_{nw} + \delta_{WN} + \log(F_R)$

δ_{nw} = Error asociado a la predicción del tráfico.

δ_{WN} = Error asociado a la predicción en el desempeño del pavimento.

$\log(F_R)$ = Factor de seguridad del diseño.

Además, la media de la distribución de δ_{nN} es:

$$\overline{\delta_{nN}} = \overline{\delta_{nw}} + \log(F_R) + \overline{\delta_{wN}} = 0 + \log(F_R) + 0 = \log(F_R)$$

Ecuación 2.1-5: Media de la distribución de δ_{nN}

La confiabilidad del diseño de un pavimento es la probabilidad de que el pavimento se desempeñará adecuadamente ante las aplicaciones de cargas previstas, y que la capacidad estructural estará por encima de las cargas aplicadas, para su periodo de diseño. Lo anterior puede ser representado de la siguiente manera:

$$R = Prob\left(\log(N_t) - \log(n_T)\right) \geq 0$$

$$R = Prob\left(\delta_{nN}\right) \geq 0$$

La expresión anterior también puede ser representada por medio del siguiente gráfico:

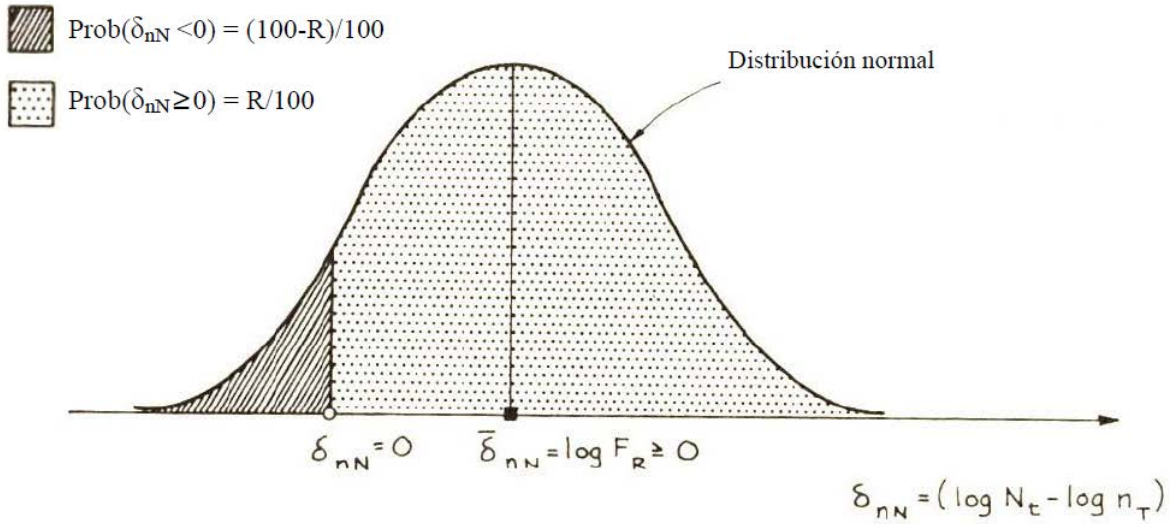


Figura 2.1-9: Definición gráfica de la Confiabilidad (R) y el factor de seguridad de diseño (F_R)[23]

La evaluación de la confiabilidad R o 100 - R, comienza con la transformación de δ_{nN} en z:

[23] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part 1-61

$$z = \frac{\delta_{nN} - \overline{\delta_{nN}}}{S_{nN}}$$

De la figura 2.1-9, se obtiene que $\overline{\delta_{nN}} = \log(F_R)$ y $S_{nN} = S_o$, entonces la expresión queda de la siguiente manera:

$$z = \frac{\delta_{nN} - \log(F_R)}{S_o}$$

El punto donde δ_{nN} = 0, el valor de z es Z_R:

$$Z_R = \frac{-\log(F_R)}{S_o}$$

Manipulando la expresión anterior se obtiene que el factor de seguridad puede definirse a través de la siguiente expresión:

$$F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0}$$

Ecuación 2.1-6: Factor de seguridad

Donde:
F_R = Factor de seguridad en el diseño
Z_R = Factor estadístico de confiabilidad
S_o = Error estándar combinado

Para un determinado nivel de confiabilidad (R), el valor de Z_R es determinado de la Tabla 2.1-5[24].

Confiabilidad R(%)	Desviación normal estándar Z_R
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Tabla 2.1-5: Desviación estándar normal.

[24] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part 1-62

Para obtener el factor de seguridad en el diseño (F_R), el valor de Z_R es introducido en la ecuación 2.1-6. Es de notar que, cuando se emplea un nivel de confiabilidad de diseño del 50%, el valor de Z_R correspondiente es igual a cero y por lo tanto el factor de seguridad en el diseño es igual a 1.0.

Una vez seleccionado el nivel de confiabilidad se debe considerar el valor del error estándar combinado (S_o), representativo de las condiciones locales. Esta variable considera la variabilidad asociada a cada uno de los parámetros involucrados en el diseño. La Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93 recomienda adoptar valores de S_o comprendidos dentro de los siguientes intervalos[25]:

CONDICIÓN DE DISEÑO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S_0)	
	Pav. rígido	Pav. flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito.	0.34	0.44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito.	0.39	0.49

Tabla 2.1-6: Valores para el Error estándar combinado S_o

En general, las expresiones para el diseño de espesores de pavimentos rígidos propuestas por la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993, presentan la estructura siguiente y se resuelve con lo expuesto anteriormente:

$$\log\left(ESAL's_{DISEÑO}\right) = Z_R \cdot S_o + \log\left(ESAL's_{PREVISTO}\right)$$

Además de la importancia del tipo de carretera en la selección del nivel de confiabilidad, también debe tomarse en cuenta la optimización del espesor del pavimento.
Se debe determinar el nivel de confiabilidad óptimo que asegure el costo total más bajo, es decir, que balancee apropiadamente el costo inicial y los costos de mantenimiento como se muestra en la Figura 2.1-10. Si el espesor es mayor de lo necesario, el pavimento prestará un buen servicio, con bajos costos de mantenimiento, pero el costo de inversión inicial será alto. Todo lo contrario sucede, cuando el espesor es menor de lo necesario[26].

[25] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part 1-62

[26] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part 1-64

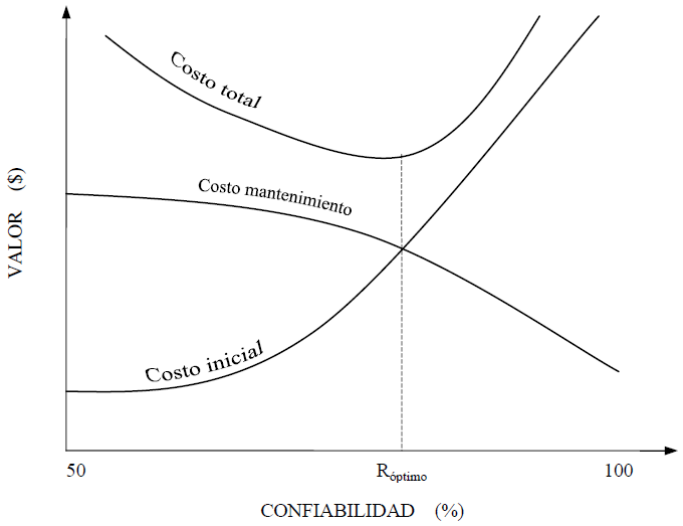


Figura 2.1-10: Nivel óptimo de Confiabilidad

2.1.2.2. CRITERIO DE COMPORTAMIENTO

- Serviciabilidad

  El Método de Diseño de la AASHO (hoy AASHTO) introdujo el concepto de falla funcional de un pavimento, en oposición a los métodos tradicionales a la fecha, los cuales se fundamentaban exclusivamente en los conceptos de falla estructural. Para cuantificar esta descripción funcional se introdujeron varios conceptos fundamentales. El primero de ellos se refiere a la "serviciabilidad".

  La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, la misma que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la vía. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc., que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural).

  El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

  1. Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del público que las usa.
  2. El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
  3. La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
  4. Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
  5. El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

En el Experimento Vial de la AASHO se determinó el comportamiento mediante el conocimiento de su serviciabilidad al momento de la construcción, así como a la serviciabilidad en varios momentos a lo largo del desarrollo de la prueba. La manera como inicialmente se obtenían las mediciones de serviciabilidad, era mediante la calificación que un “panel” de evaluadores efectuaba sobre la calidad del pavimento.
Para ello, con el empleo de la planilla que se presenta en la Figura 2.1-11, se determinaba - o calificaba - el estado del pavimento, en cuanto a su funcionabilidad, entre los valores de cero (0), siendo este el valor mínimo o peor nivel, a un máximo de cinco (5) - mejor condición del pavimento -. Esta medida de la serviciabilidad, a través de evaluaciones subjetivas de un panel, se definió como el PSR (Present Serviceability Rating)[27].

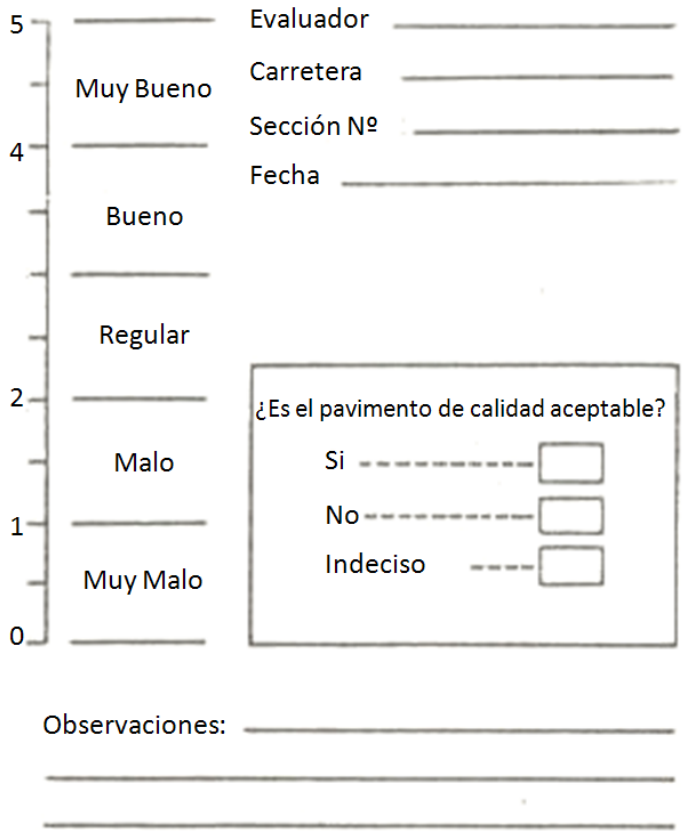


Figura 2.1-11: Planilla de evaluación del valor del PSR

Simultáneamente se ejecutaban análisis estadísticos que permitieran correlacionar algunas propiedades físicas del estado del pavimento con el valor del PSR. La predicción del valor del PSR a partir de tales medidas, se define como PSI (Present Serviceability Index), o simplemente "p".

[27] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-10

Ambos valores de la serviciabilidad fueron correlacionados, y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \cdot \log(1 + SV) - 1.38 \cdot R \cdot \mathrm{D}^2 - 0.01 \cdot (C + P)^{0.5}$$

Ecuación 2.1-7

Donde:
SV = Varianza de la pendiente longitudinal, que mide la influencia de las deformaciones longitudinales
RD = Promedio aritmético de las deformaciones transversales (ahuellamiento transversal)
C = Área de grietas por cada 1.000 [pie^2] de pavimento
P = Área reparada por cada 1.000 [pie^2] de pavimento

La Figura 2.1-12 representa de una manera más gráfica el significado de los términos más importantes de la ecuación de correlación.

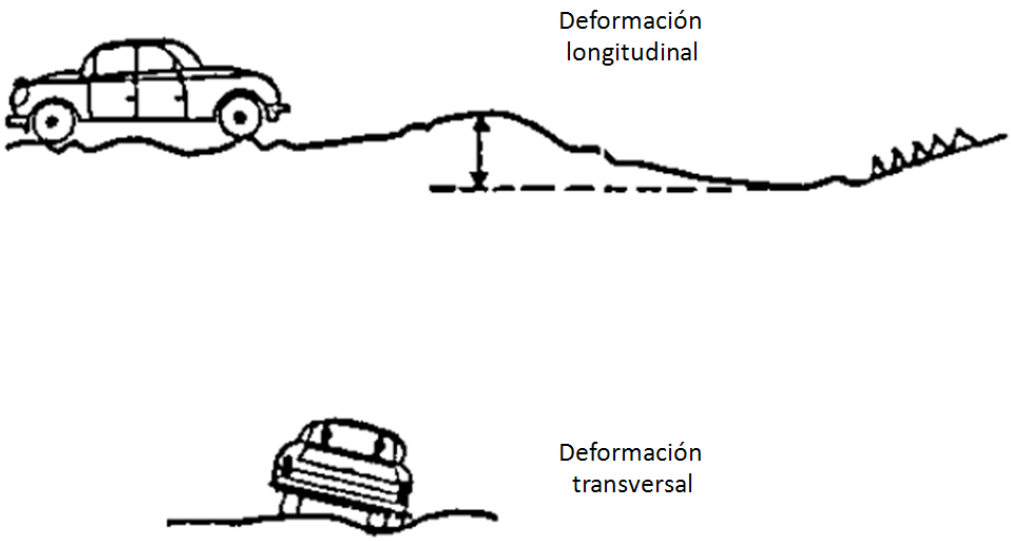


Figura 2.1-12: Significado de los principales términos de la ecuación del PSI

El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial (P_0) y el índice de serviciabilidad final (P_t), para la vida útil o de diseño del pavimento.

a. Índice de serviciabilidad inicial (P_0)
   El índice de serviciabilidad inicial (P_0) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. AASHTO estableció para pavimentos rígidos un valor inicial deseable de 4.5, si es que no se tiene información disponible para el diseño.
b. Índice de serviciabilidad final (P_t)

El índice de serviciabilidad final (P_t), ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario.
La AASHTO sugiere que para carreteras principales se utilice un valor de P_t = 2.5 ó 3.0 y para carreteras de bajo nivel un valor de serviciabilidad final de 2.0[28].

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial y final.

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

Ecuación 2.1-8: Pérdida de serviciabilidad

Los factores que influyen mayormente en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son: tráfico, medio ambiente y edad del pavimento. Los efectos que causan estos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método. El factor edad (tiempo) no está claramente definido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es un factor negativo neto que contribuye a la reducción de la serviciabilidad. El efecto del medio ambiente considera situaciones donde se encuentran arcillas expansivas o levantamientos por helada. Así, el cambio total en el PSI en cualquier momento puede ser obtenido sumando los efectos dañinos del tráfico, arcillas expansivas y/o levantamientos por helada, como se muestra en la Figura 2.1-13[29].

[28] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-10

[29] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part I-9

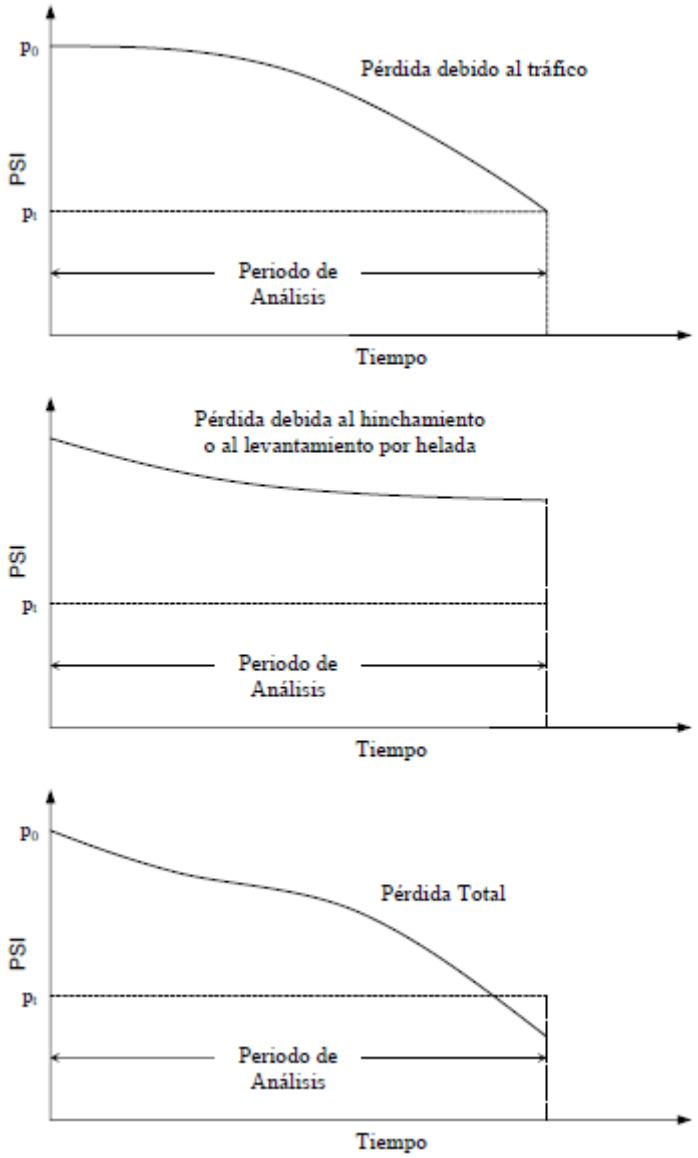


Figura 2.1-13: Tendencia en el comportamiento de los pavimentos

2.1.2.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

- Módulo de Reacción de la Subrasante (k)
  El módulo de reacción de la subrasante-base (k), es una constante elástica que define la rigidez del material o resistencia a la deformación. Es la relación entre carga por unidad de área de superficie horizontal del suelo con el asentamiento correspondiente de la superficie; este parámetro representa la capacidad portante que posee un suelo en estado natural o con la combinación de una subbase, siendo éste el que servirá para colocar la estructura de pavimento.
  Lo anterior, lo propuso Westergaard en 1926 al suponer que la subrasante-base no admite esfuerzos de corte y la reacción de la subrasante sobre la

losa es igual a la deflexión de la subrasante multiplicada por una constante (k).

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la Razón de Soporte California (CBR) o las pruebas de valores R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento. Las relaciones de la Figura 2.1.14 son satisfactorias para propósitos de diseño[30].

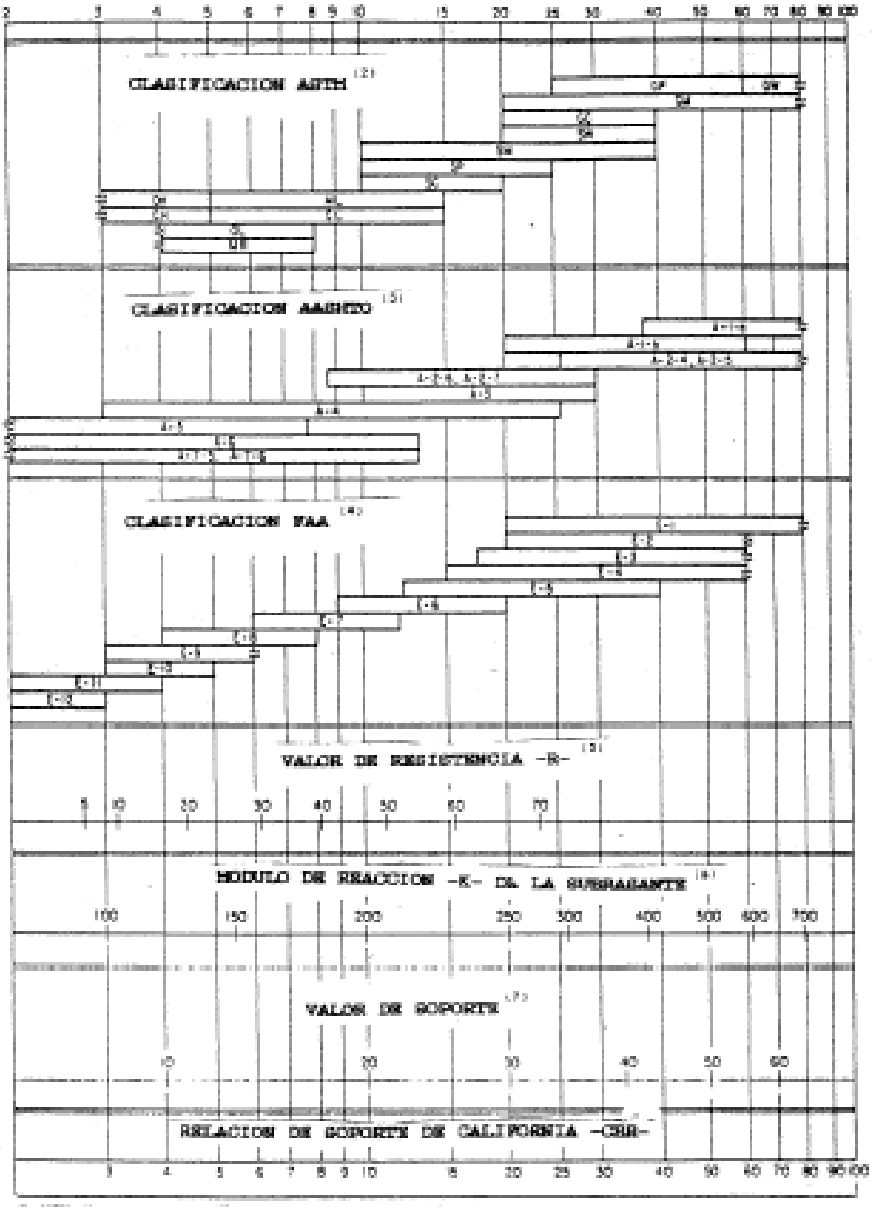


Figura 2.1-14: Relación aproximada entre los valores k y otras propiedades del suelo

[30] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-37

- Módulo de Rotura del Hormigón

  Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del hormigón por flexión.

  El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios (ASTM C -78). De esta manera, se obtiene en el tercio medio una zona sometida a un momento flector constante igual a PL/3 y la rotura se producirá en cualquier punto de este tercio medio con la única condición que exista allí una debilidad. Este ensayo es recomendable frente al ensayo de carga en el punto medio, en el cuál la rotura se producirá indefectiblemente en dicho punto (punto de aplicación de la carga) donde el momento flector es máximo.

  El Módulo de Rotura (MR) del hormigón se correlaciona con el módulo de compresión (f'_c) del hormigón mediante la siguiente regresión:

  $$MR = a \cdot \left(f_c^{'}\right)^{0.5} \left[\frac{kgf}{cm^2}\right]$$, según el ACI 363

  Donde los valores “a” varían entre 1.99 y 3.18.

  Debido al tratamiento de confiabilidad de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93[31], se recomienda enfáticamente *no* utilizar la especificación normal de construcción para el módulo de rotura, debido a que representa un valor debajo del cual solamente puede caer un pequeño porcentaje de la distribución. Si fuera deseable utilizar la especificación de construcción, deberían aplicarse algunos ajustes basados en la desviación estándar del módulo de rotura y en el porcentaje (PS) de la distribución normal de resistencia que normalmente caen debajo de la especificación, es decir:

  $$S_c^{'}(media) = S_c + z\left(SD_s\right)$$

  Donde:

  S_c’ = valor medio estimado para el módulo de rotura del PCC ([psi])

  S_c = módulo de rotura de la especificación de construcción del hormigón ([psi])

  SD_s = desviación estándar estimada del módulo de rotura del hormigón ([psi])

  z = varianza normal estándar:

  = 0.841, para PS = 20%[32]
  = 1.037, para PS = 15%
  = 1.282, para PS = 10%
  = 1.645, para PS = 5%
  = 2.327, para PS = 1%

  El módulo de rotura también se puede determinar a través de las siguientes correlaciones:

  1. Estimación a través de la resistencia a compresión del hormigón.

[31] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-25 (2.3.4)

[32] Nota: Número permisible de especímenes expresado en porcentaje, que puede tener resistencias menores que el valor especificado.

$$S_c' = k \cdot \left(f'_c\right)^{0.5} \qquad 7 < k < 12$$

Donde:
f'_c = Resistencia a compresión del hormigón en [psi]

2. Estimación a través de la resistencia a la tracción indirecta.

$$S_c' = 210 + 1.02 \cdot IT$$

Donde:
IT = Tracción indirecta medida en las probetas en [psi]

- Módulo de Elasticidad del Hormigón
  Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del hormigón. En los pavimentos de hormigón armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del hormigón, son los que rigen el estado de tensiones en la armadura. Para hormigón de peso normal, el Instituto del Concreto Americano sugirió:

$$E_c = 57000 \cdot \left(f'_c\right)^{0.5}$$

Donde:
E_c y f'_c están dados en [psi]

2.1.2.4. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

- Coeficiente de transferencia de carga (J)
  Las cargas de tránsito deben ser transmitidas de una manera eficiente de una losa a la siguiente para minimizar las deflexiones en las juntas. Las deflexiones excesivas producen bombeo de la base y posteriormente rotura de la losa de concreto.
  El mecanismo de transferencia de carga en la junta transversal entre losa y losa se lleva a efecto de las siguientes maneras[33]:
  - Junta con dispositivos de transferencia de carga (pasadores de varillas lisa de acero) con o sin malla de refuerzo por temperatura.
  - Losa vaciada monolíticamente con refuerzo continuo, (acero de refuerzo de varillas corrugadas armada en ambas direcciones). No se establece virtualmente la junta transversal, tomándose en cuenta para el cálculo del acero estructural la remota aparición de grietas transversales.
  - Junta transversal provocada por aserrado cuya transferencia de carga se lleva a efecto a través de la trabazón entre los agregados.

  La transferencia de cargas se puede definir usando deflexiones o tensiones en la junta. La transferencia de cargas por deformaciones es:

[33] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-25 (2.4.2)

$$LT_{\delta} = \frac{\delta_{no_cargada}}{\delta_{cargada}}$$

Donde:
LT_{δ} = transferencia de cargas por deformaciones
$\delta_{no_cargada}$ = deflexión de la losa adyacente no cargada
$\delta_{cargada}$ = deflexión de la losa cargada

En la Figura 2.1-15 se observa que una transferencia de cargas es nula, cuando la losa no cargada no experimenta ninguna deflexión, todo lo contrario, sucede cuando hay una transferencia de cargas perfecta donde la deflexión de la losa no cargada es igual a la de la losa cargada.

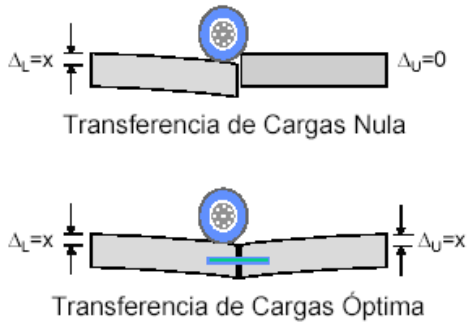


Figura 2.1-15: Transferencia de carga

La capacidad de una estructura de pavimento de hormigón para transferir (distribuir) cargas a través de juntas o grietas es tomado en cuenta en el método AASHTO 93 por medio del coeficiente de transferencia de carga J. Los dispositivos de transferencia de carga, trabazón de agregados y la presencia de bermas de concreto tienen efecto sobre este valor.

La Tabla 2.1-7 establece rangos de los coeficientes de transferencia de carga para diferentes condiciones desarrolladas a partir de la experiencia y del análisis mecanicista de esfuerzos[34]. Como se puede apreciar en esta tabla el valor de J se incrementa a medida que aumentan las cargas de tráfico, esto se debe a que la transferencia de carga disminuye con las repeticiones de carga.

[34] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-26

Soporte lateral	Si	No	Si	No	Si	No	Tipo
ESALs en millones	Con pasadores con o sin refuerzo de temperatura		Con refuerzo continuo		Sin pasadores (fricción entre agregados)		
Hasta 0.3	2.7	3.2	2.8	3.2	-	-	Calles y caminos vecinales
0.3 – 1	2.7	3.2	3.0	3.4	-	-	
1 – 3	2.7	3.2	3.1	3.6	-	-	
3 – 10	2.7	3.2	3.2	3.8	2.5	2.9	Caminos principales y autopistas
10 – 30	2.7	3.2	3.4	4.1	2.6	3.0	
más de 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.1	

Tabla 2.1-7: Coeficiente de transferencia de carga (J)

El uso de bermas de hormigón unidas o losas ensanchadas reducen las tensiones y deformaciones en una losa. Es por eso que se usan valores menores de J. La razón para tomar J menores en pavimentos con bermas de hormigón unida es porque se supone que los vehículos no transitarán por la misma. Es necesario tener en cuenta que la zona crítica de la losa es la esquina y con esta premisa las cargas se alejan de ella, permitiendo una reducción de espesores.

- Coeficiente de drenaje (C_d)
  El coeficiente de drenaje fue incorporado en la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93 para diseño de pavimentos rígidos a raíz de los efectos del drenaje en el desempeño de la estructura de pavimento, tales como el efecto de la humedad en la resistencia de la subrasante y en la erosionabilidad de la base.
  Para obtener el valor del coeficiente de drenaje se presentan las siguientes tablas[35]:

Drenaje	
Calidad de drenaje	Agua removida en:
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	Nunca drena el agua

Tabla 2.1-8: Calidad de drenaje

[35] Design of Pavement Structures AASHTO 1993. Part II-22 y Part II-25

Coeficiente de drenaje				
	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento se encuentra en niveles de humedad cercanos a la saturación.			
Calidad del drenaje	Menos que 1%	1 - 5%	5 - 25%	Más de 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy Pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Tabla 2.1-9: Coeficiente de drenaje

2.1.3. GUÍA SUPLEMENTARIA AASHTO 1998[36]

El modelo de diseño revisado para pavimentos de hormigón AASHTO presentado en el Suplemento de 1998 a la Guía AASHTO fue desarrollado bajo el Proyecto NCHRP 1-30 El propósito del Proyecto NCHRP 1-30 fue evaluar y mejorar la caracterización de la base y subbase de apoyo de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO. El modelo empírico original de AASHO fue calibrado al valor de k de primavera medido en pruebas de carga de placa sobre la base granular, mientras que el método de la Guía de 1986 para determinar el valor de diseño de k se basó en el valor k medio anual ajustado estacionalmente para el valor compuesto k. Una recomendación clave del estudio NCHRP 1-30 fue que, para los propósitos de diseño de pavimentos de hormigón con la metodología AASHTO existente, tanto la subbase de la AASHO Road Test como la subbase del proyecto bajo diseño deberían caracterizarse por el promedio anual ajustado estacional del valor estático elástico k. El Suplemento AASHTO 1998 presenta pautas para la determinación de un valor k de diseño adecuado en base a los ensayos de soporte de placas, correlaciones con tipos y propiedades de suelos, CBR o deflexiones medidas en pavimentos en servicio.

Utilizando el mismo proceso mediante el cual se amplió el modelo empírico original de la AASHO Road Test en 1961, se derivó un nuevo modelo de diseño AASHTO para ser consistente con la caracterización recomendada del valor k de diseño y considerar los efectos sobre las tensiones del módulo base de la losa, el espesor de la base, la fricción de la losa y la base, el espaciamiento de las juntas, el soporte de los bordes, los gradientes de temperatura y humedad y la carga del tráfico. Los análisis de tensiones se realizaron utilizando un modelo tridimensional de elementos finitos, el cual fue validado por comparación con las tensiones en el AASHO Road Test y las deflexiones de losas medidas. Se desarrollaron ecuaciones de regresión para relacionar las tensiones calculadas con los factores de diseño. El modelo de elementos finitos tridimensionales también se utilizó para desarrollar una comprobación del diseño para la carga de esquina para pavimentos unidos sin dovelas.

Como en las versiones anteriores del procedimiento de diseño de pavimento rígido AASHTO, el espesor de losa calculado es el que se requiere para soportar las ESAL's previstas hasta un nivel de serviciabilidad final seleccionado, suponiendo que la pérdida del nivel de serviciabilidad se debe solamente al agrietamiento de la losa. Si se produjera escalonamiento en el pavimento hasta tal punto que contribuyera significativamente a la

[36] LTPP Data Analysis. Phase I: Validation of Guidelines for K-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction

pérdida de serviciabilidad, el pavimento habría sido sub-diseñado; es decir, habría alcanzado la serviciabilidad final antes de lo previsto. La manera apropiada de evitar esto no es aumentar el grosor de la losa, sino más bien diseñar el sistema de transferencia de carga en la junta de manera que el escalonamiento no se desarrolle hasta tal grado que contribuya significativamente a la pérdida de serviciabilidad.

Uno de los principales resultados de la AASHO Road Test fue el Factor de Equivalencia de Carga (LEF por sus siglas en inglés). Los LEF's se utilizaron para cuantificar el daño que diferentes cargas y configuraciones de ejes causan al pavimento en relación con una carga de eje única de 18 [kips]. Una deficiencia de los LEF's es que se basan en los pavimentos de hormigón de la AASHO Road Test, los cuales fallaron solamente debido al agrietamiento de losas. Existen varios tipos de falla predominantes en las estructuras de pavimento rígido no representados por las ecuaciones de LEF´s del AASHO Road Test. La mayoría de las estructuras de pavimento rígido fallan debido a escalonamiento y agrietamiento por fatiga.

Otras limitaciones de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993 son que los efectos de las pistas ampliadas y las bermas unidas de hormigón no pueden ser analizados en detalle. La Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993 tampoco considera directamente el espaciamiento de juntas y las tensiones de alabeo en pavimentos rígidos. La Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993 también es limitada en cuanto a la incorporación de clima, la predicción de los esfuerzos en la subbase, la base y las capas de pavimento, y también en la consideración de diferentes tipos de carga sobre el pavimento debido al tráfico, especialmente los tipos de vehículos pesados y diferentes configuraciones de ejes. Estas deficiencias se deben principalmente a los limitados parámetros de entrada para el diseño de pavimento disponibles en la AASHO Road Test.

De manera resumida, el Suplemento AASHTO 1998 incorpora, entre los más importantes, los siguientes cambios:

- Nuevo modelo de tensión de la losa, basado en la carga a la mitad de la losa, alabeo y las tensiones de deformación.
- Nuevos lineamientos para determinar el valor de diseño k.
- Consideración del espesor de la base, el módulo y la fricción de la interfaz en el cálculo de las tensiones en la losa.
- Consideración del espaciamiento de las juntas en las tensiones en la losa.
- Comprobación de la tensión de esquina para pavimentos sin dovelas.
- Comprobación del escalonamiento para pavimentos con dovelas y sin dovelas.

Respecto a la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993, el Suplemento AASHTO 1998 modifica lo siguiente[37]:

- 3.2 Diseño de Pavimentos Rígidos
  Reemplaza los niveles de tráfico en exceso de 50000 18 [kips] (80 [kN]) por 70000 18 [kips] (80 [kN]).
  Explica la importancia del espaciamiento de juntas para obtener un espesor de diseño razonable y propone valores de acuerdo al tipo de pavimento rígido que se diseñará. Para pavimentos rígidos JPCP propone que se utilice el valor de diseño actual.

[37] Referido al texto original de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993

Para la transferencia de carga en las juntas, indica que en el AASHO Road Test el escalonamiento no se manifestó debido al tiempo y un diseño adecuado de las dovelas, por lo que, si el diseñador desea considerar juntas sin dovelas, se provee una comprobación del escalonamiento en el diseño.

- 3.2.1 Desarrollo del Módulo Efectivo de Reacción de la subrasante
  Introduce nuevos métodos y pasos para la obtención del valor Módulo de Reacción de la subrasante (k), considerando los efectos sobre el estrés del módulo base de la losa, el espesor de la base, la fricción de la losa y la base, el espaciamiento de las juntas, el soporte de los bordes, los gradientes de temperatura y humedad y la carga del tráfico. Además de modificar los periodos de tiempo considerados. También entrega distintas nuevas correlaciones y ecuaciones de regresión.

- 3.2.2 Determinación del espesor de losa requerido
  Agrega una comprobación para determinar el espesor de diseño para la posición de carga en la mitad de la losa, debido a que, para pavimentos con dovelas, esta es la ubicación crítica para el daño por fatiga. Para esto se entregan gráficos con las medidas del eje respecto a una losa de 12 [ft] por 15 [ft] para carga en el medio y en la junta. También entrega la información de la huella de la rueda y sus dimensiones.
  Además, modifica los parámetros de entrada requeridos, los cuales pasan de 8 a 13.
  Se presentan nuevas ecuaciones para el diseño de pavimentos rígidos, que se muestran a continuación:

  - Ecuación de diseño para pavimento rígido con una confiabilidad del 50%

$$\log(W') = \log(W) + \left(5.065 - 0.03295 \cdot P2^{2.4}\right) \cdot \left[\log\left(\left(\frac{\left(S_c'\right)'}{\sigma_t'}\right) - \log\left(\frac{690}{\sigma_t}\right)\right)\right]$$

Ecuación 2.1-9: Ecuación Diseño de Pavimentos rígidos. Suplemento AASHTO 1998

donde:
W' = Número de ESAL's de 18 [kips] (80 [kN]) estimados para la pista de diseño.
W = Número de ESAL's de 18 [kips] (80 [kN]) calculados de ecuación 2.1-10

$$\log(W) = \log(R) + \frac{G}{Y}$$

Ecuación 2.1-10

con:

$$\log(R) = 5.85 + 7.35 \cdot \log(\mathrm{D} + 1) - 4.62 \cdot \log(L1 + L2) + 3.28 \cdot \log(L2)$$

Ecuación 2.1-11

$$Y = 1.00 + \frac{3.63 \cdot (L1 + L2)^{5.2}}{(\mathrm{D} + 1)^{8.46} \cdot L2^{3.52}}$$

Ecuación 2.1-12

$$G = \log\left(\frac{P1 - P2}{P1 - 1.5}\right)$$

Ecuación 2.1-13

donde:
D = Espesor de la losa de hormigón [in]
L1 = Carga de un eje simple o doble [kips]
L2 = Código del eje, 1 para eje simple, 2 para eje tándem
P1 = Índice de serviciabilidad inicial
P2 = Índice de serviciabilidad final
$(S_c')'$ = Resistencia media a la flexotracción del hormigón a los 28 días [psi] (690 [psi] (4758 [kPa] para el AASHO Road Test)
σ_t = Tensión de tracción en la mitad de la losa debido a cargas y temperatura con las constantes del AASHO Road Test
σ_t' = Tensión de tracción en la mitad de la losa debido a cargas y temperatura con parámetros de entrada para el diseño del nuevo pavimento.

$$\sigma_t = \sigma_l \cdot E \cdot F \cdot \left[1.0 + 10^{\log(b)} \cdot TD\right]$$

Ecuación 2.1-14

σ_l = Tensión de tracción en la mitad de la losa debido únicamente a la carga.

$$\sigma_l = \frac{18000}{D^2}\left\{4.227 - 2.381 \cdot \left(\frac{180}{l}\right)^{0.2} - 0.0015 \cdot \left[\frac{E_b \cdot H_b}{1.4 \cdot k}\right]^{0.5} - 0.155\left[H_b \cdot \left(\frac{E_b}{E_c}\right)^{0.75}\right]^{0.5}\right\}$$

Ecuación 2.1-15

E_c = Módulo de elasticidad de la losa de hormigón [psi] (4200000 [psi] (28959 [MPa]) para el AASHO Road Test)
E_b = Módulo de elasticidad de la base [psi]
H_b = Espesor de la base [in] (6 [in] (152 [mm] para el AASHO Road Test)

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot D^3}{12 \cdot \left(1 - \mu^2\right) \cdot k}}$$

Ecuación 2.1-16

k = Módulo elástico efectivo de la subrasante [psi/in] (110 [psi/in] (29.92 [kPa/mm]) para el AASHO Road Test)
μ = Razón de Poisson del hormigón (0.2 para el AASHO Road Test)
E = Factor de ajuste del soporte de borde (1.00 para el AASHO Road Test)
= 1.00 para una pista de ancho convencional de 12 [ft] (3.66 [m])
= 0.94 para una pista de ancho convencional de 12 [ft] (3.66 [m]) con borde unido de hormigón
= 0.92 para una pista de ancho convencional de 12 [ft] (3.66 [m]) con un sobre ancho de 2 [ft] (0.6 [m])
F = Razón entre la tensión de la losa para un coeficiente de fricción (f) dado entre la losa y la base y la tensión de la losa con la fricción al máximo.

$$F = 1.177 - 4.3 \cdot 10^{-8} \cdot \mathrm{D} \cdot E_b - 0.01155542 \cdot \mathrm{D} + 6.27 \cdot 10^{-7} \cdot E_b - 0.000315 \cdot f$$

Ecuación 2.1-17

f = Coeficiente de fricción entre la losa y la base[38]

$$\log(b) = -1.944 + 2.279 \cdot \frac{\mathrm{D}}{l} + 0.0917 \cdot \frac{L}{l} - 433080 \cdot \frac{\mathrm{D}^2}{k \cdot l^4} + \left(\frac{0.0614}{l}\right) \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b^{1.5}}{1.4 \cdot k}\right)^{0.5} - 438642 \cdot \frac{\mathrm{D}^2}{k \cdot l^2} - 498240 \cdot \frac{\mathrm{D}^3 \cdot L}{k \cdot l^6}$$

Ecuación 2.1-18

L = Espaciamiento de las juntas [in] (180 [in] (4572 [mm] para el AASHO Road Test)
TD = Diferencia efectivo positivo de temperatura, parte superior de la losa menos la parte inferior de la losa [°F]

$$TD = 0.962 - \frac{52.181}{\mathrm{D}} + 0.341 \cdot WIND + 0.184 \cdot TEMP - 0.00836 \cdot PRECIP$$

Ecuación 2.1-19

D = Espesor de la losa [in]
WIND = Velocidad del viento promedio anual [mph]
TEMP = Temperatura promedio anual [°F]
PRECIP = Precipitación promedio anual [in]

Luego, el espesor de la losa requerido es:

$$\mathrm{D} = A_0 + A_1 \cdot \log 10\left(W_{18\,R}\right)$$

Ecuación 2.1-20

D = Espesor de la losa [in]
A_0 y A_1 = Constantes de regresión dependiente de otras opciones de diseño
W_{18R} = 18 [kips] (80 [kN]) ESAL's para el nivel de confiabilidad (R) especificado

El W_{18R} para cualquier nivel de confiabilidad de diseño y desviación estándar general se calcula de acuerdo a:

$$W_{18\,R} = 10^{\left(\log\left(W_{18}\right) + Z \cdot S_o\right)}$$

Ecuación 2.1-21

W_{18} = 18 [kips] (80 [kN]) ESAL's estimados para el periodo de diseño de la pista
Z = Desviación estándar de la distribución normal para un nivel dado de confiabilidad
S_o = Desviación estándar general

[38] LTPP Data Analysis. Phase I: Validation of Guidelines for K-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction, Tabla 14, Página 95.

Esta sección es la que sufre la mayor cantidad de cambios y adición de comprobaciones. Dado el carácter referencial de esta explicación, solo se mostrará las ecuaciones del modelo de escalonamiento para juntas con dovelas y sin dovelas:

$$FaultD = CESAL^{0.25} * [0.0628 - 0.0628*Cd + 0.3673*10^{-8}*Bstress^2 + 0.4116*10^{-5}*Jtspace^2 + 0.7466*10^{-9}*FI^2*Precip^{0.5} - 0.009503*Basetype - 0.01917*Widenlane + 0.0009217*Age]$$

Ecuación 2.1-22

FaultD = Escalonamiento transversal de la junta con dovelas promedio [in]
CESAL = Cargas de ejes simples equivalentes 18 [kips] (80 [kN]) acumulados [millones]
C_d = Coeficiente de drenaje AASHTO modificado
Bstress = Tensión soportante máxima del hormigón de la ecuación cerrada [psi]
Jtspace = Espaciamiento de las juntas transversales promedio [ft]
FI = Índice de helada anual promedio [°F - días]
Precip = Precipitación anual promedio [in]
Basetype = 0 para una base no estabilizada, 1 para base estabilizada
Widenlane = 0 si no tiene sobre ancho, 1 si tiene sobre ancho
Age = Edad del pavimento [años]

$$FautND = CESAL^{0.25} * [0.2347 - 0.1516*Cd - 0.000250*Slabthick^2 / Jtspace^{0.25} - 0.0155*Basetype + 0.7784*10^{-7}*FI^{1.5}*Precip^{0.25} - 0.002478*Days90^{0.5} - 0.0415*Widenlane]$$

Ecuación 2.1-23

FautND = Escalonamiento transversal de la junta sin dovelas promedio [in]
Days90 = Número de días con un máximo de temperatura sobre 90 [°F] (32.2 [°C])

2.1.4. MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 3

El método de diseño se describe en detalle en el Manual de Carreteras Volumen 3 vigente. El método de diseño de pavimentos rígidos nuevos sin armaduras y con o sin barras de traspaso de cargas, que se presenta está basado en el método AASHTO con las modificaciones introducidas en el Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures Part II - Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design, publicado en 1998.

Como se dijo anteriormente, El procedimiento es un método teórico empírico (mecanicista), que, si bien mantiene el concepto básico del método AASHTO de 1993, añade nuevos términos que modifican la ecuación de diseño, a fin de incorporar las tensiones críticas que se producen en las losas del pavimento producto de la combinación de las cargas de borde, efectos de temperatura y distintas condiciones de borde. Además, el método incluye verificación para las condiciones del escalonamiento de las juntas transversales, con y sin barras de traspaso de cargas y del agrietamiento de esquina, cuando no se colocan barras de traspaso de cargas.

Es importante mencionar que, en la edición del año 2014 del Manual de Carreteras, se indica que el software PAVIVIAL, ampliamente utilizado en Chile, se encuentra obsoleto.

Para facilitar la comprensión y sistematizar el procedimiento de diseño, se incluye un diagrama de flujo[39] con la secuencia de las distintas etapas del proceso, se presentan las ecuaciones que permiten establecer los espesores de las losas de pavimento y una breve descripción de las variables que intervienen en el método, recomendándose los valores a utilizar.

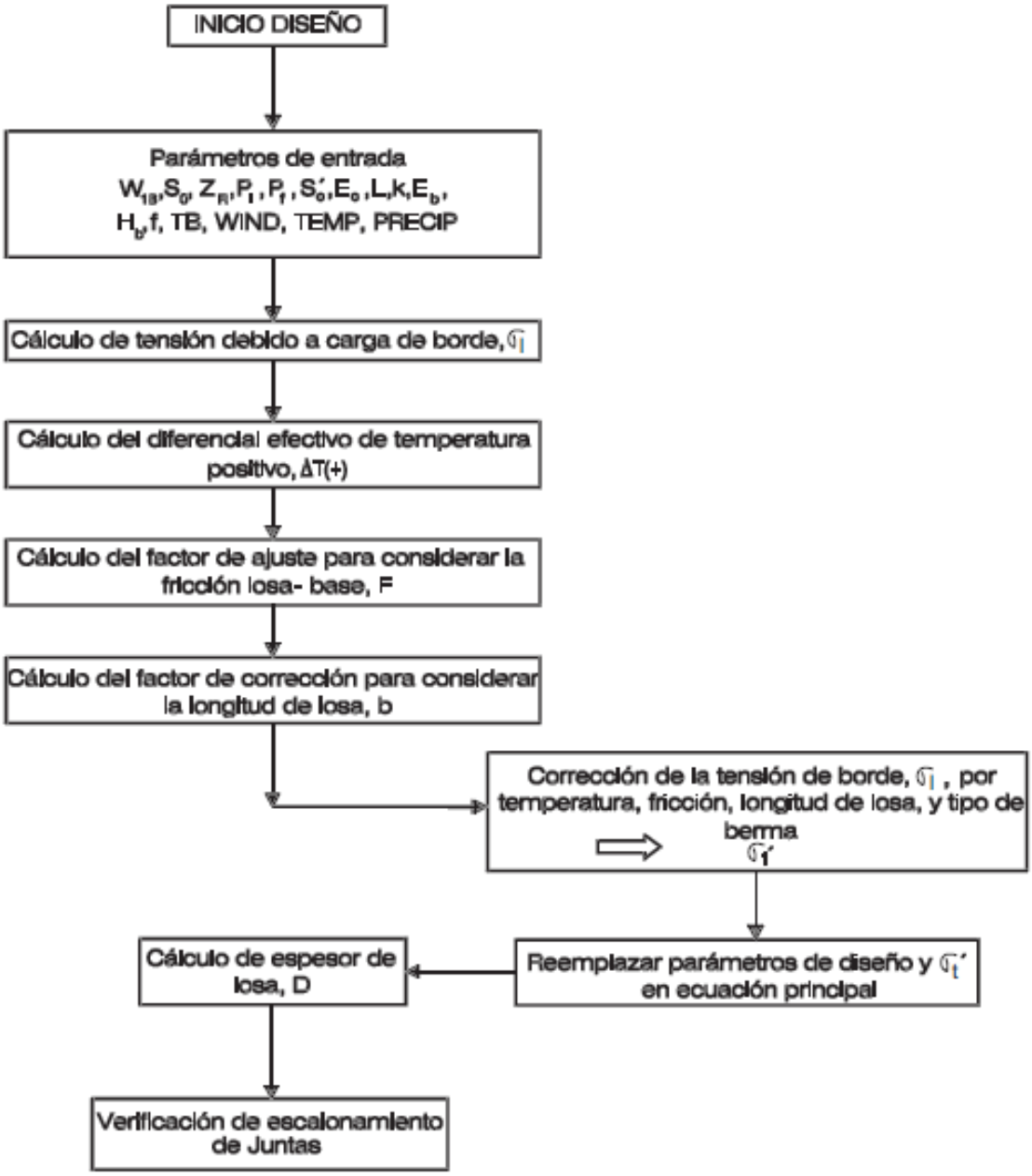


Figura 2.1-16: Procedimiento de diseño de espesor de losa

[39] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.604.201.A – Lámina 3.604.201.B – Lámina 3.604.201.C

2.1.4.1. ECUACIONES BÁSICAS DE DISEÑO

Las ecuaciones básicas de diseño para pavimentos rígidos son:

$$\log\left(W_{18}\right) = \log(R) + \frac{G}{F} + \left(5.065 - 0.03295 \cdot P_f^{2.4}\right) \cdot \left[\log\left(\left(\frac{S_c^{'}}{\sigma_t^{'}}\right) - \log\left(\frac{4.754}{\sigma_t}\right)\right]\right. + Z_R \cdot S_0$$

Ecuación 2.1-24

$$\log(R) = 5.85 + 7.35 \cdot \log\left(\frac{\mathrm{D}}{25.4} + 1\right) - 4.62 \cdot \log\left(\frac{L_1}{4.45} + L_2\right) + 3.28 \cdot \log\left(L_2\right)$$

Ecuación 2.1-25

$$F = 1.00 + \frac{3.63 \cdot \left(\frac{L_1}{4.45} + L_2\right)^{5.2}}{\left(\frac{\mathrm{D}}{25.4} + 1\right)^{8.46} \cdot L_2^{3.52}}$$

Ecuación 2.1-26

$$G = \log\left(\frac{P_i - P_f}{P_i - 1.5}\right)$$

Ecuación 2.1-27

$$\sigma_t^{'} = \sigma_l \cdot TB \cdot F \cdot \left(1.0 + \left(\frac{5}{9}\right) \cdot b + \Delta T(\ +\ )\right)[MPa]$$

Ecuación 2.1-28

$$\sigma_l = \frac{80012.743}{\mathrm{D}^2}\left\{4.227 - 4.547 \cdot \left(\frac{180}{l}\right)^{0.2} - 0.00158 \cdot \left[\frac{E_b \cdot H_b}{k}\right]^{0.5} - 0.0308 \cdot \left[H_b \cdot \left(\frac{E_b}{E_c}\right)^{0.75}\right]^{0.5}\right\}$$

Ecuación 2.1-29

$$l = 5.622 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot \mathrm{D}^3}{12 \cdot \left(1 - \mu^2\right) \cdot k}}$$

Ecuación 2.1-30

$$F = 1.177 - 2.457 \cdot 10^{-7} \cdot \mathrm{D} \cdot E_b - 4.549 \cdot 10^{-4} \cdot \mathrm{D} + 9.100 \cdot 10^{-5} \cdot E_b - 0.000315 \cdot f$$

Ecuación 2.1-31

Donde:

W_{18} = Ejes equivalentes de 80 [kN] (EE) acumulados durante la vida de diseño.

Z_R = Coeficiente estadístico, asociado al Nivel de Confianza. (1-R) en una curva de distribución normal estándar.

S_0 = Desviación estándar de la combinación de errores de predicción de tránsito y de predicción del comportamiento general del pavimento para un nivel de tránsito dado.

D = Espesor de losa [mm].

S_c' = Resistencia media a la flexotracción del hormigón a los 28 días con carga en los tercios, [MPa].

L_1 = Carga de eje simple, 80 [kN].

L_2 = Código de eje simple = 1.

p_i = Índice de serviciabilidad inicial.

p_f = Índice de serviciabilidad final.

σt' = Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, considerando efecto de temperatura, [MPa].

σt = Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de la Prueba AASHO [MPa].

2.1.4.2. SERVICIABILIDAD

El Índice de Serviciabilidad Inicial pi, corresponde a la serviciabilidad al momento de puesta en servicio el camino y por lo tanto depende de la calidad de la construcción que se utilice. Debe tenerse en consideración que la vida útil real del pavimento se encuentra estrechamente ligada al nivel de la serviciabilidad inicial; a mejor p_i mayor vida útil para las mismas condiciones de servicio.

La serviciabilidad final (p_f) es el menor valor que puede alcanzar este indicador antes que resulte inconveniente transitar el pavimento.

En la Tabla 2.1-10 se entregan los valores que se recomiendan para estos parámetros. En situaciones especiales se podrán adoptar índices de serviciabilidad final distintos a los que se señalan en la Tabla 2.1-10, siempre que se justifiquen adecuadamente y cuenten con la conformidad de la Dirección de Vialidad.

Índice de Serviciabilidad Inicial (p_i)	4.5
Índice de Serviciabilidad Final (p_f)	2.0

Tabla 2.1-10: Índices de Serviciabilidad

2.1.4.1. EJES EQUIVALENTES SOLICITANTES

Las solicitaciones que deberá soportar la estructura se expresan como los EE acumulados durante el período de vida de diseño. Salvo que se indique o autorice especialmente de otra manera, normalmente los pavimentos rígidos deberán diseñarse en una sola etapa y para las vidas diseño que se indican en la Tabla 2.1-11.

CLASIFICACION DEL CAMINO	VIDA DE DISEÑO (AÑOS)
De alto tránsito en zonas urbanas	25 – 40
Caminos Nacionales	20 – 30
Caminos principales	20
Caminos secundarios	20

Tabla 2.1-11: Vida de diseño

El cálculo de las solicitaciones expresadas como ejes equivalentes (EE) se ajustará a los criterios expuestos a continuación y teniendo en consideración los siguientes aspectos:

- Los TMDA para el año de partida, así como las proyecciones futuras, deben responder a un estudio de demanda específico para el camino que se proyecta.
- El camino o proyecto debe dividirse en tramos homogéneos, en los que las solicitaciones acumuladas durante la vida de diseño (EE) sean iguales o sensiblemente similares.
- En lo posible se realizarán algunos pesajes de ejes para establecer, al menos, un orden de magnitud de los EE por tipo de vehículo que corresponde; los valores de EE/Veh incluidos en la Lámina 3.603.202.C[40] deben utilizarse sólo cuando no se disponga de otra información. Por lo demás, debe tenerse en consideración que habitualmente las estratigrafías de pesos por eje resultan mucho más livianas en las proximidades de las plazas de pesaje fijas que en el resto de la red.
- El cálculo de los EE debe presentarse en un cuadro igual o similar al modelo que se incluye en la Lámina 3.603.202.E[41] y en todo caso debe incluir al menos antecedentes relacionados con el período de vida de diseño, el TMDA para cada año, total y para cada una de las categorías en que se hubiere dividido el tránsito, el factor de pista de diseño, los EE estimados para cada año y los acumulados.

2.1.4.1.1. TRÁNSITO

Los procedimientos de diseño consideran esta variedad de solicitaciones, su distribución en la superficie del pavimento y la variación que experimentarán durante el periodo de vida de la estructura. Las solicitaciones inducidas al pavimento por el tránsito es el factor individual más importante para establecer las dimensiones y características que debe tener un pavimento para soportar en condiciones adecuadas y por un período determinado.

Las Láminas 3.603.202.A1, 2 y 3 del Manual de Carreteras Volumen 3[42] vigente muestran los factores de ejes equivalentes para una amplia estratificación de pesos de los ejes, para rígidos y para serviciabilidades finales de 2,0 y 2,5. Fueron calculados para las condiciones simplificadas señaladas en el Manual de Carreteras Volumen 3 vigente y son para el peso promedio de cada rango.

Las solicitaciones para los efectos de determinar espesores serán los ejes equivalentes (EE) acumulados que circularán por la pista de diseño, durante el periodo que se hubiere escogido como vida útil de diseño del pavimento. Los factores de ejes

[40] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.603.202.C

[41] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.603.202.E

[42] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, 3.603.202(2)

equivalentes para los pesos de los ejes del denominado tránsito liviano, automóviles y camionetas, son muy pequeños de manera que en la práctica se desprecian.

Como información general, en la Lámina 3.603.202.C[43] se entregan, para ser utilizados sólo cuando no se disponga de datos más específicos, los resultados de los ejes equivalentes por vehículo procesados de los pesajes de ejes realizados en 1999 en las plazas de pesaje fijas que dispone la Dirección de Vialidad. Los valores incluidos en esta Tabla parecen representar bien las características del tránsito en caminos importantes, pero no resultan tan confiables para caminos secundarios; también existen evidencias que los pesos serían mayores que los medidos en sectores de la red alejados de los puntos de control.

2.1.4.2. CONFIABILIDAD

El grado de confiabilidad del diseño se controla por el factor de confiabilidad (F_R) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Z_R) y de la desviación normal del error combinado (S_0) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

Para las situaciones normales, la Tabla 2.1-12 indica los niveles de confianza a utilizar en los diseños y los correspondientes valores del coeficiente estadístico Z_R. En situaciones especiales, tales como vías urbanas o semi urbanas de alto tránsito, túneles, accesos a viaductos con mucho tránsito, inmediaciones de las plazas de peaje, etc., se podrán adoptar niveles de confianza distintos a los que se señalan en la Tabla, siempre que se justifiquen adecuadamente y cuenten con la conformidad de la Dirección de Vialidad.

EE Solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	S_0 en función del coeficiente				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 15	60	-0.253	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40
15 – 30	60 – 70	- 0,253 – 0,524	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40
30 – 50	70 – 75	- 0,524 – 0,674	0.34	0.35	0.36	0.38	0.39
50 – 70	75 – 80	- 0,674 - 0,841	0.32	0.33	0.34	0.37	0.38
70 – 90	80 – 85	- 0,841 – 1,037	0.30	0.31	0.32	0.35	0.36

Tabla 2.1-12: Nivel de confianza y valor del S_0

La desviación normal del error combinado (S_0) abarca las varianzas estimadas para cada uno de los factores asociados con la predicción del modelo, respecto del comportamiento del pavimento, incluyendo la varianza de la predicción del tránsito solicitante. Los estudios y análisis realizados por AASHTO concluyeron que, incluyendo todos los factores, el S_0 alcanza a 0,39 para pavimentos rígidos; si no se incluye como factor la predicción del tránsito, los valores de S_0 son de 0,34 para pavimentos rígidos (En el cálculo que incluye todos los factores, AASHTO da un margen de error en las predicciones del tránsito de ± 2,5 veces la media)

La Tabla 2.1-12 indica los valores que se recomienda utilizar en los diseños de pavimentos rígidos en función de las solicitaciones esperadas y del coeficiente de variación (coeficiente de variación = desviación estándar / promedio) de la serie de valores representativos de las características de los suelos de la subrasante.

Debido a la mayor dispersión que resulta al determinar el número estructural para subrasantes débiles, conviene utilizar el mayor valor del rango del nivel de confianza para subrasantes de baja capacidad de soporte y mal drenaje.

[43] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.603.202.C

El factor de confiabilidad (F_R) se determina con los valores del Z_R y S_0 que se adopten, según la ecuación 2.1-32.

$$F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0}$$

Ecuación 2.1-32

Cuando se proyecte la construcción de pavimentos por etapas se debe considerar la confiabilidad total que se obtendrá. Si se supone que la probabilidad que una determinada etapa de construcción dure la vida de diseño, es independiente de la otra etapa, la probabilidad combinada ó confiabilidad total de que todas las etapas duren las respectivas vidas de diseño, será el producto de las confiabilidades individuales de cada etapa. Consecuentemente, para obtener una determinada confiabilidad total (R_T) en una construcción por etapas, se debe aplicar la siguiente relación para establecer la confiabilidad (R_E) de cada etapa:

$$R_E = \left(R_T\right)^{\frac{1}{n}}$$

Ecuación 2.1-33

Donde, n es el número de etapas, incluyendo la de la construcción inicial del pavimento.

2.1.4.3. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE

El módulo de reacción de la subrasante, k [MPa/m], es el parámetro que se utiliza para caracterizar la capacidad de soporte de la subrasante. Muchas veces a la denominación de agrega la palabra “efectivo” para indicar que se está utilizando un valor medio compensado que toma en consideración las eventuales variaciones estacionales que, en ciertas circunstancias experimenta este parámetro a lo largo del año. En todo caso, se recomienda incluir esa consideración sólo cuando se prevea una penetración de la helada importante en suelos heladizos.

El Manual de Carreteras Volumen 3 entrega la siguiente información para determinar el valor de k[44]:

- Correlaciones para Suelos Finos (A-4 a A-7, según clasificación AASHTO)
- Rangos de valores de k para Suelos Granulares
- Correlaciones con el CBR
- Determinación mediante Ensayes con Placa de Carga
- Ajustes para diseño
- Sistematización del Análisis de la información de la Prospección de Suelos
- Módulo de Reacción de la Subrasante de Diseño

2.1.4.4. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN

Para el diseño se debe utilizar exclusivamente, la resistencia media de diseño a la flexotracción a 28 días y con las cargas de ensaye en los tercios. El valor a asignar a este parámetro dependerá de las posibilidades que existan en la zona del proyecto para preparar hormigones de calidad. Sin perjuicio de lo anterior, para situaciones donde no se presenten condicionantes restrictivas (disponibilidad de áridos de calidad, equipo de preparación

[44] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, 3.604.206

adecuado, etc.), en función del tipo de vía, se recomiendan los valores que se indican en la Tabla 2.1-13.

Tipo de Vía	Resistencia a la Flexotracción (MPa)
Vías principales y Autopistas	4,8 – 5,4
Vías Colectoras	4,6 – 5,0
Caminos Secundarios	4,2 – 4,8

Tabla 2.1-13: Resistencia a la Flexotracción (promedio a los 28 días)

Para el Módulo de Elasticidad de hormigones de características normales se recomienda, en general, utilizar el valor de 29000 [MPa]. También se puede estimar con la siguiente relación, en función de la resistencia a la compresión cilíndrica:

$$E_c = 4779.4 \cdot f^{0.5}$$

Ecuación 2.1-34

En que:

E_c = Módulo de elasticidad del hormigón [MPa]

f = Resistencia a la compresión cilíndrica [MPa]

2.1.4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE LA BASE

La Tabla 2.1-14 incluye valores que permiten estimar el módulo de elasticidad de la base que se utilice y el coeficiente de fricción entre base y pavimento.

Tipo de Material de Base	Módulo Elasticidad (MPa)	Coeficiente de		
		Bajo	Medio	Alto
Suelo Fino	20,6 – 275,6	0.5	1.3	2.0
Arena	68,9 – 172,3	0.5	0.8	1.0
Granular	103,4 - 310,1	0.7	1.4	2.0
Lámina Polietileno	-	0.5	0.6	1.0
Arcilla Estabilizada con Cal	137,8 – 482,3	3.0	-	5.3
Base Tratada con Cemento	$(3,45+f_c') \square 1000$	8.0	34	63
Base Tratada con Asfalto	2067 – 4134	3.7	5.8	10
Hormigón Pobre sin Compuesto Curado	$(3,45+f_c') \square 1000$	> 36		
Hormigón Pobre con Simple o Doble Compuesto Curado.	$(3,45+f_c') \square 1000$	3.5	-	4.5
f_c': Resistencia a la compresión cúbica (MPa).				

Tabla 2.1-14: Módulos de elasticidad y Coeficientes de fricción de las bases

2.1.4.1. FACTOR DE AJUSTE POR TIPO DE BERMA

El Factor de ajuste por el tipo y características de la berma a construir, se incluye en la Tabla 3.604.209.A. El concepto de borde libre implica una pista de circulación de 3.5 [m] de ancho con bermas granulares, sin revestir, revestidas con un tratamiento superficial o con una capa asfáltica; la berma de hormigón amarrada se refiere a una berma pavimentada con un pavimento de hormigón de no menos de 150 [mm] de espesor, 600 [mm] de ancho y amarrada a la pista mediante barras de acero y la pista ensanchada se refiere a una pista de no menos de 4.3 [m] de ancho construida de una sola vez, en la que se demarca para que el tránsito circule como en una pista de 3.5 [m] de ancho.

Tipo de Berma	Factor TB
Borde libre	1.00
Berma de hormigón amarrada	0.94
Berma de pista ensanchada	0.92

Tabla 2.1-15: Factor de ajuste por Tipo de Berma

2.1.4.2. CLIMA

En este método, el clima de la zona a emplazar la estructura de pavimento se caracteriza a través de 4 variables. Éstas son: Temperatura media anual, precipitación media anual, velocidad del viento media anual y días con precipitación mayor que 5 [mm].

Estas variables se incorporan en el modelo para considerar efectos como el alabeo por temperatura y el alabeo por humedad. El Manual de Carreteras Volumen 3 vigente incorpora una tabla con todos estos parámetros para diferentes estaciones a lo largo de Chile[45].

2.1.4.3. ESTRUCTURACIÓN

Los pavimentos rígidos que se diseñen bajos los términos que señala el Manual de Carreteras Volumen 3 vigente, y salvo, instrucción o aprobación especial de la Dirección de Vialidad, deberán ajustarse a los siguientes términos generales:

- Deben diseñarse con una base granular de 150 [mm] de espesor compactado.
- Las juntas de contracción se distanciarán entre 3 y 5 [m], debiendo adoptarse el valor inferior para zonas donde las variaciones de temperaturas sean extremas y el superior donde ellas sean menos pronunciadas. En cualquier caso, la distancia entre juntas es uno de los parámetros que intervienen en el diseño, por lo que deberá analizarse cuál es la distancia más conveniente para cada proyecto en especial.
- Cualquiera fuere el espesor resultante al aplicar las relaciones que se incluyen en el Manual de Carreteras Volumen 3 vigente, los pavimentos de hormigón a diseñar para la Dirección de Vialidad no tendrán más de 300 [mm] de espesor.
- El espesor mínimo normal será de 180 [mm], salvo que se demuestre en base a valorizar los parámetros que intervienen en el diseño, que dicho espesor puede disminuirse en un caso especial.

2.1.4.4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El procedimiento de diseño propuesto por el Manual de Carreteras Volumen 3 en su versión 2016 se encuentra especificado en la Lámina 3.604.201.A[46]. Esta lámina indica lo siguiente:

- Ingresar los parámetros de entrada
- Realizar el cálculo de tensión debido a carga de borde (σ_t)
- Realizar el cálculo del diferencial efectivo de temperatura positivo ($\Delta T(+)$)

[45] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, 3.604.210

[46] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.604.201.A

- Realizar el cálculo del factor de ajuste para considerar la fricción losa – base (F)
- Realizar la corrección de la tensión de borde (σ_t), por temperatura, fricción, longitud de losa y tipo de berma (σ_t')
- Reemplazar los parámetros de diseño y σ_t' en la ecuación principal
- Calcular el espesor de la losa (D)
- Realizar la verificación de escalonamiento de Juntas

Es importante notar que el procedimiento de AASHTO 1993 no proporciona una metodología para diseñar un pavimento con juntas sin dovelas. El Coeficiente de Transferencia J sólo considera el esfuerzo de tracción que controla el agrietamiento, no el escalonamiento. Una junta sin dovelas requiere un soporte mejorado de losa desde la base y un material de base más resistente a la erosión para evitar la pérdida de soporte a lo largo del tiempo y una falla prematura. El alabeo térmico y la deformación por humedad, que se vuelven mucho más críticos para el rendimiento de juntas sin dovelas, no se consideran en el procedimiento AASHTO 1993 y son considerados en el Suplemento AASHTO 1998 y el Manual de Carreteras Volumen 3 vigente[47].

Para la verificación del escalonamiento de Juntas[48] tenemos el siguiente algoritmo:

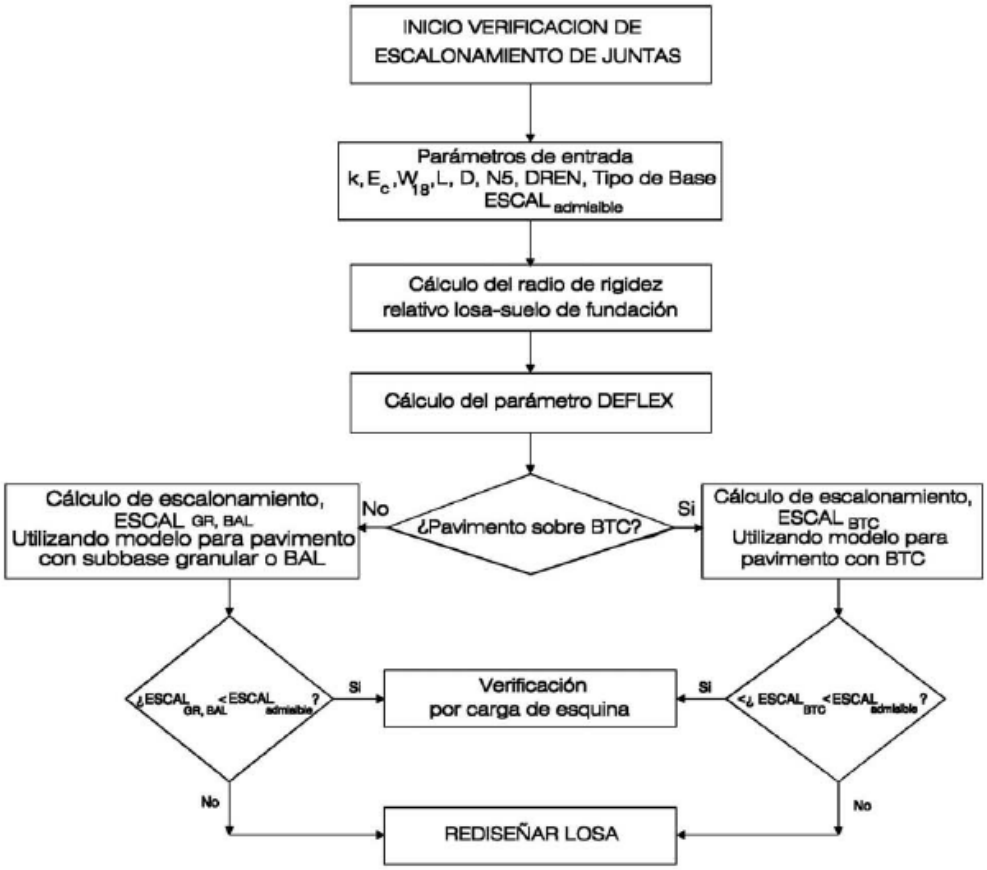


Figura 2.1-17: Verificación de Escalonamiento en Juntas Transversales

[47] LTPP Data Analysis. Phase I: Validation of Guidelines for K-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction, Página 40

[48] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.604.201.B

Y para la verificación del espesor por carga de esquina[49] tenemos el siguiente algoritmo:

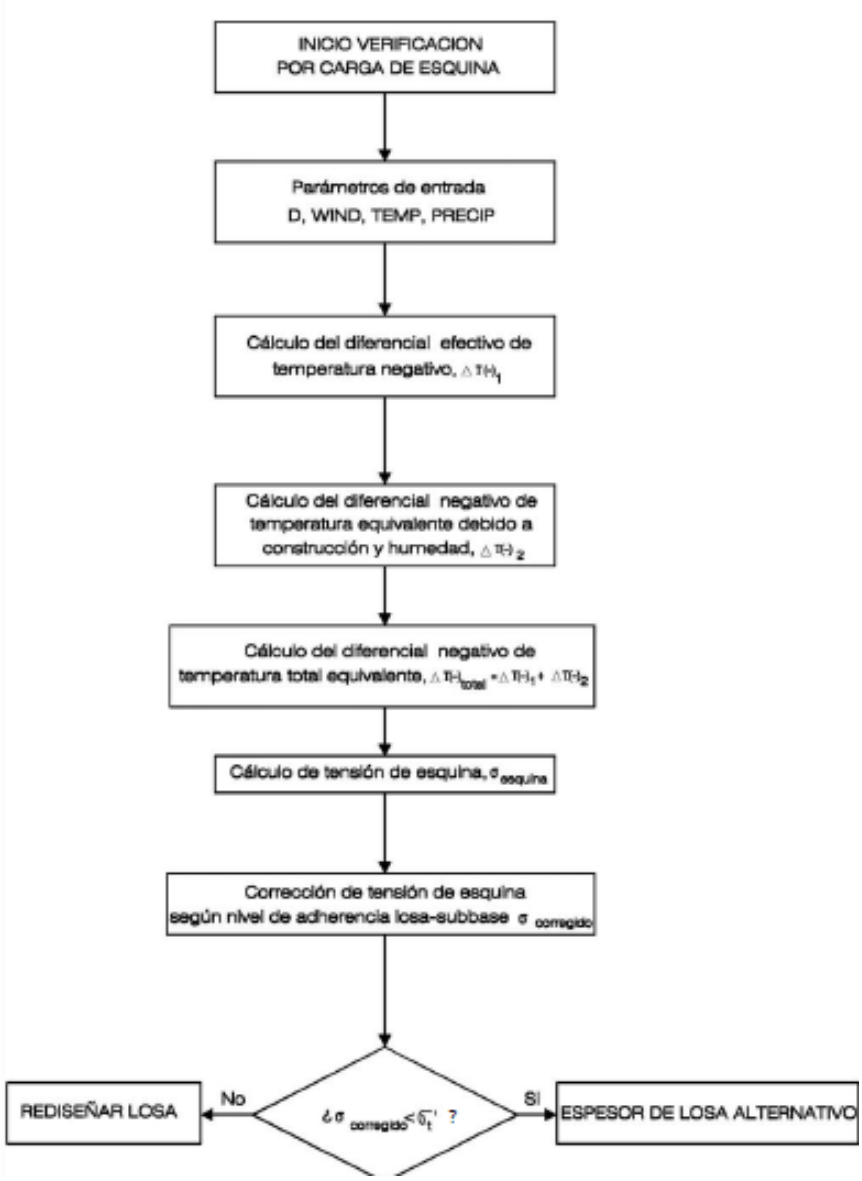


Figura 2.1-18: Verificación del espesor por carga de esquina

Las fórmulas utilizadas para realizar estas verificaciones se encuentran en el Manual de Carreteras Volumen 3 vigente.

[49] Manual de Carreteras Volumen N° 3 Diseño, Lámina 3.604.201.C

2.2. MÉTODO DE DISEÑO SEGÚN LA GUÍA EMPÍRICO – MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS GEMDP AASHTO 2008

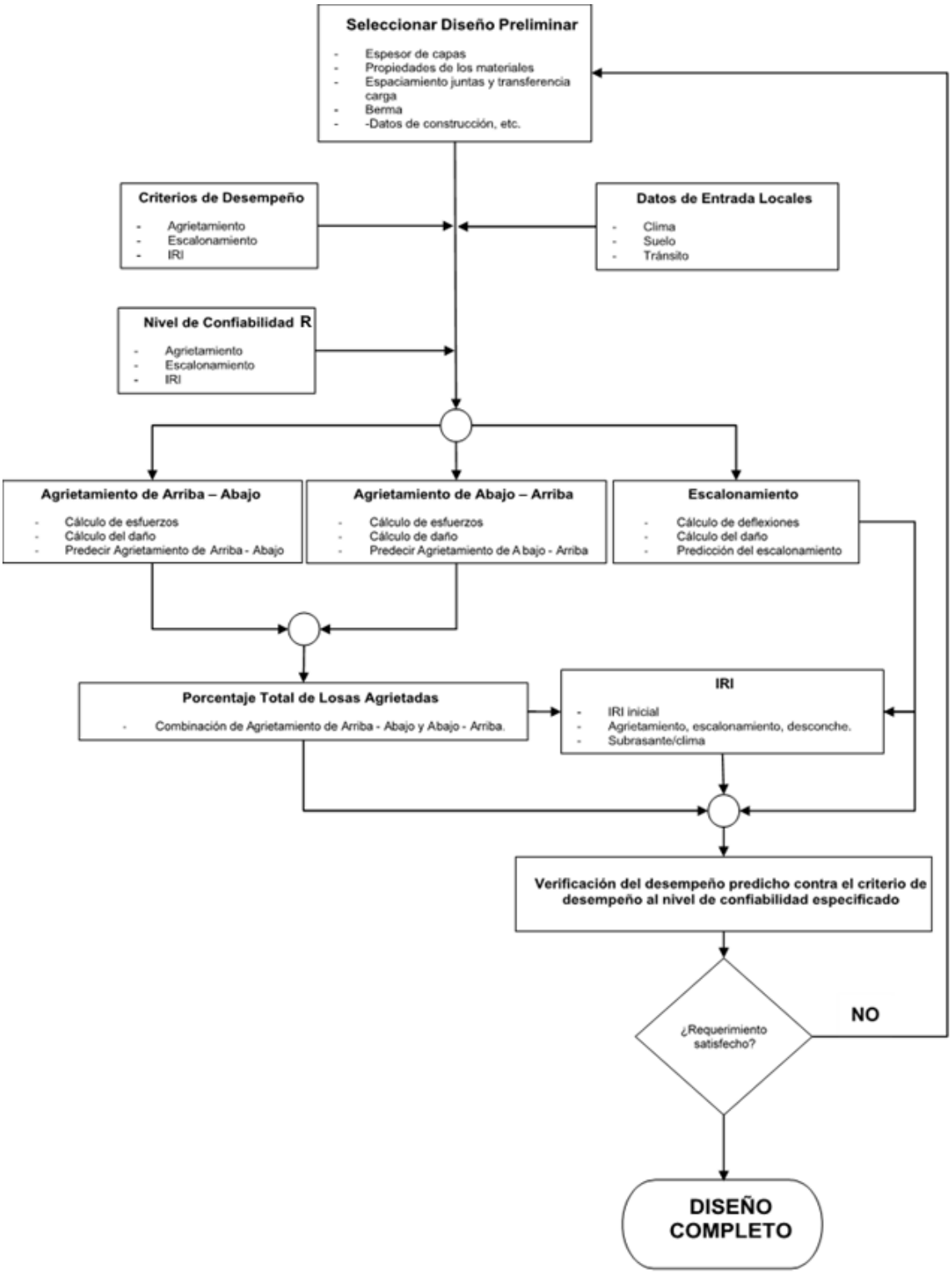
En este apartado, extraído de la Guía de Diseño Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, se describe resumidamente, el procedimiento de diseño empírico - mecanicista para pavimentos nuevos de hormigón simple con juntas. El proceso en sí, requiere de una aproximación práctica e iterativa por parte del diseñador. Éste debe seleccionar un diseño tentativo inicial y luego analizar el diseño en detalle para determinar si cumple con los criterios de desempeño establecidos. Para el caso de pavimentos de hormigón simple con juntas, las medidas del desempeño consideradas son el escalonamiento de juntas, agrietamiento transversal y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Si el diseño no satisface los criterios de desempeño para una confiabilidad establecida, entonces el diseño debe modificarse para ser reanalizado hasta que los criterios de desempeño sean satisfechos. Aquellos diseños que cumplan con los criterios de desempeño serán considerados factibles desde un punto de vista funcional y estructural, y pueden ser considerados en adelante para otras evaluaciones como análisis de costo cíclico e impacto ambiental.

2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El proceso general de diseño para pavimentos nuevos de hormigón simple con juntas se ilustra en la Figura 2.1-0 Los pasos principales se enumeran como sigue:

1. Generar un diseño preliminar para condiciones específicas locales como son el tránsito, clima y fundación, definiendo un arreglo estructural de capas, definiendo propiedades del hormigón y otras propiedades de los materiales, y características de construcción y diseño.
2. Definir los criterios para el desempeño aceptable del pavimento, al final del periodo de diseño.
3. Seleccionar los niveles de confiabilidad deseados para cada indicador de desempeño.
4. Utilizar el software de diseño de la guía para lograr:
   a. Procesar los datos para obtener valores de datos de tránsito, materiales y clima requeridos en las evaluaciones del diseño durante el período completo de diseño.
   b. Calcular la respuesta estructural (esfuerzos y deflexiones) mediante el modelo de solución rápida basado en elementos finitos para cada tipo de eje y carga y para cada cálculo de incremento de daño a través del período de diseño.
   c. Calcular el daño acumulado para cada mes del período de diseño.
   d. Predecir los deterioros clave (escalonamiento de juntas, agrietamiento de la losa) mes a mes a lo largo del período de diseño usando los modelos de desempeño empírico - mecanicista propuestos en la Guía Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008.
   e. Predecir la regularidad del pavimento (IRI), como función del IRI inicial, deterioros que ocurren a lo largo del tiempo, y factores locales al final de cada incremento de tiempo.
5. Evaluar el desempeño esperado del diseño preliminar para el nivel de confiabilidad elegido.
6. Modificar el diseño y repetir los pasos del 4 al 5 hasta que el diseño cumpla con los criterios establecidos.

Aquellos diseños que satisfagan los criterios de desempeño deseados para el nivel de confiabilidad especificado se consideran como factibles (estructural y funcionalmente) y pueden ser considerados en adelante para otras evaluaciones.



2.2.2. DATOS DE ENTRADA DE DISEÑO

2.2.2.1. Datos de Entrada del Diseño Preliminar y Condiciones Locales

El procedimiento de diseño ofrece la posibilidad de considerar una amplia gama de arreglos estructurales (como se ilustra en la Figura 2.2-1 y características de diseño, incluyendo espaciamiento de juntas, barras de transferencia de carga, bermas amarradas, losas ensanchadas, tipo de base, y drenaje. El diseño se alcanza en forma iterativa, analizando los diseños preliminares en detalle, para identificar el diseño que satisfaga el criterio de desempeño a través del período de análisis. Un diseño preliminar incluye todos los detalles requeridos para realizar evaluaciones de diseño usando los procedimientos prescritos en la Guía Empírico - Mecanicista de Diseño de Pavimentos, incluyendo capas de pavimento, diseño de juntas, diseño del refuerzo, y propiedades de los materiales.

Figura 2.2-1: Posible estructura de pavimento de hormigón

A parte del diseño preliminar, el diseñador debe proveer datos de entrada para las condiciones locales del proyecto, incluyendo propiedades de la subrasante (incluyendo presencia de roca), tránsito, y clima. Además, hay varios datos de entrada relacionados con la construcción tales como la Regularidad inicial (IRI inicial), el mes estimado para la pavimentación, la estimación del mes en que se abrirá el pavimento al tránsito y la estimación del alabeo permanente de la losa de hormigón.

El principal problema al obtener datos de entrada adecuados es que la información específica deseada para el proyecto no siempre está disponible en la etapa de diseño y muchas veces debe ser estimada varios años previos a la construcción. A modo de ejemplo, puede que los materiales empleados en un proyecto no se conozcan sino hasta un par de semanas previas al inicio de la construcción. El diseñador debiera obtener tanta información como le sea posible sobre propiedades de los materiales, tránsito y otros datos para el uso en el diseño, para obtener un diseño lo más realista posible. Además, el diseñador debe efectuar un análisis de sensibilidad para identificar que parámetros afectan más el desempeño del pavimento.

2.2.2.2. Niveles de Datos de Entrada de Diseño

En la mayoría de los datos de entrada se pueden seleccionar entre varios (3) niveles de calidad de los datos. Estos niveles, son:

1. Nivel 1: Datos de entrada locales para el proyecto obtenidos a través de mediciones o ensayes directos. Por ejemplo, propiedades de materiales obtenidas a través de ensayos de laboratorio, volúmenes de tránsito y cargas medidos cerca o en el lugar del proyecto.
2. Nivel 2: Datos de entrada obtenidos a través de correlaciones. A modo de ejemplo se pueden mencionar el módulo resiliente de la subrasante o materiales de la base estimados a partir del CBR o valores R usando correlaciones empíricas.
3. Nivel 3: El uso de valores por defecto de carácter nacional para datos de entrada. Ejemplos de datos de Nivel 3 son el uso de clasificaciones AASHTO del suelo para determinar un valor típico del módulo resiliente o el uso de clasificaciones de camiones y tipo de carreteras para estimar las cargas por eje y la distribución de camiones.

Los niveles de datos pueden diferir entre parámetros de entrada. Por ejemplo, el módulo resiliente de la subrasante puede obtenerse mediante ensayos de laboratorio (Nivel 1) y la distribución de cargas de tránsito a partir de registros nacionales (Nivel 3).

La selección del nivel de datos para un parámetro específico depende de una serie de factores, dentro de los que se pueden mencionar:

- Sensibilidad en el desempeño del pavimento para un parámetro dado.
- Cuán crítico es el proyecto.
- La información disponible al momento de diseñar.
- Los recursos y tiempo que disponga el diseñador para obtener dichos datos de entrada.
- El nivel seleccionado para cada parámetro de entrada, de cualquier forma, puede influir significativamente en el diseño de un proyecto, costos y confiabilidad. Para establecer que parámetros debieran ser determinados en forma más precisa para un proyecto dado se puede efectuar un análisis de sensibilidad.

2.2.2.3. Procesamiento de Datos de Entrada a través del Período de Diseño

Los datos de entrada en bruto son procesados por el programa para obtener valores mensuales de tránsito, materiales, y datos climáticos requeridos en las evaluaciones del diseño, y que son los siguientes:

- Número horario promedio de ejes simples, dobles, triples y cuádruples en cada categoría de carga de ejes para cada mes del período de diseño.
- Temperaturas en 11 puntos equiespaciados en la capa de hormigón para cada hora de los datos climáticos disponibles. Se requiere una estación climática con al menos 1 año de registros.
- Humedad relativa media mensual para cada mes del calendario.
- Resistencia y módulo del hormigón para cada mes del período de análisis.
- Valores mensuales medios del módulo de la base.

- Valores mensuales medios del módulo de reacción de la subrasante efectivo (k) determinado en base al módulo resiliente (el dato de entrada en bruto).

El módulo mensual de las capas y los perfiles de temperatura por cada hora a través de la capa de hormigón se obtiene a través del Modelo Climático Integrado Mejorado (en adelante EICM), el cual forma parte del software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos. Los principales tipos de capas incluidos en el procedimiento de diseño son losa de hormigón, base estabilizada con cemento, base estabilizada con asfalto, capas tratadas con cal y otros cementantes, base/subbase de agregado no ligado, y suelos de subrasante.

Variaciones de temperatura y humedad a través de la losa de hormigón son considerados directamente en el proceso de diseño a través de una componente "permanente" y una componente "transitoria" (horaria y mensual).

- Se estima un alabeo permanente constante (modelado a través de un diferencial efectivo de temperatura a través de la losa) basado en los resultados de la calibración del modelo de agrietamiento.
- El alabeo por temperatura transitorio debido a los cambios en las condiciones de temperatura de la losa es modelado usando los perfiles de temperatura horarios en la losa usando el EICM. El alabeo por humedad debido a los cambios en la humedad relativa es convertido en un diferencial de temperatura equivalente cada mes, y sumados a los efectos del alabeo por temperatura transitorio.

La ganancia de resistencia a largo plazo del hormigón y los correspondientes cambios en el módulo elástico del mismo (Ec) son considerados en el procedimiento de diseño de pavimentos rígidos. La resistencia del hormigón (módulo de ruptura, resistencia a compresión, y resistencia a la tracción indirecta) y Ec para cada mes del período de análisis pueden determinarse mediante el ingreso directo del parámetro (Nivel 1) o bien, usando el modelo de ganancia de resistencia del hormigón por defecto.

Los valores del módulo de la subrasante y otras capas ajustados estacionalmente a partir del EICM son convertidos en un valor mensual medio efectivo de k para cálculos de la respuesta estructural y análisis de daño. Esta conversión se efectúa de manera interna en el programa de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos.

El procesamiento de los datos de entrada es automatizado en el programa de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos, y los parámetros procesados entran directamente dentro de los módulos de cálculo de respuesta estructural que calcula la respuesta crítica del pavimento mes a mes a lo largo de todo el período de diseño.

2.2.3. MODELO DE RESPUESTA ESTRUCTURAL

Aunque el método de elementos finitos ha probado ser una herramienta confiable para resolver problemas de ingeniería, incluyendo el cálculo de la respuesta de pavimentos de hormigón (determinación de esfuerzos y deformaciones), el procedimiento de diseño incremental adoptado en la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos requiere cientos de miles de cálculos de esfuerzo y deflexiones para calcular el daño mensual (para diferentes cargas, posiciones de carga, y diferenciales de temperatura equivalentes) a lo largo de un período de diseño de muchos años. Estos cálculos pueden tomar días en

completarse usando los programas de elementos finitos existentes. Para reducir el tiempo a un nivel práctico, fueron desarrolladas, por el equipo encargado del proyecto, redes neuronales (NNs en adelante), basadas en el modelo estructural de elementos finitos ISLAB 2000, para calcular esfuerzos críticos y deflexiones en forma precisa y virtualmente en forma instantánea. Esto hace posible llevar a cabo un análisis incremental mes a mes detallado en un intervalo de tiempo práctico (alrededor de unos cuantos minutos). De esta manera, una serie de redes neuronales fueron desarrolladas por diferentes análisis que reproducen en forma precisa el resultado dado por un análisis directo de elementos finitos. El equipo desarrollador efectuó miles de corridas en ISLAB 2000 creando una base de datos para el entrenamiento de las redes neuronales. Las NNs finalmente fueron verificadas con corridas de ISLAB 2000 con valores diferentes a los de las corridas de entrenamiento, pero dentro de los rangos, determinándose una muy buena correlación entre los valores de las NNS y los de ISLAB 2000 (R^2 = 0.99).

2.2.4. ACUMULACIÓN DE DAÑO INCREMENTAL

El diseño preliminar es analizado dividiendo el período de análisis del diseño en incrementos mensuales partiendo por el mes de apertura al tránsito.

- Las cargas de tránsito se dividen en tipos de eje y cargas de eje. Los incrementos de carga de eje son 1000 [lb] para eje simple, 2000 [lb] para eje doble, 3000 [lb] para eje triple y eje cuádruple.
- Se supone que la desviación lateral de los camiones se ajusta a una distribución normal y se modela usando la ubicación media de la rueda y la desviación estándar de la posición de la rueda.
- El diferencial de temperatura a través de la losa de hormigón (que incluye los efectos de los gradientes de temperatura y de humedad transitorio y permanente) se contabiliza en incrementos de temperatura de 2 °F tanto para el diferencial de temperatura positivo (de día) como para el negativo (de noche).

Entre cada incremento (cada mes), todos los otros factores que afectan la respuesta del pavimento y daño se mantienen constantes. Estos incluyen.

- Módulo y resistencia del hormigón.
- Módulo de la base.
- Módulo de la subrasante.
- Transferencia de carga de la junta (transversal y longitudinal).

Así, entre cada incremento un esfuerzo o deflexión crítica puede ser calculado, así como también el daño incurrido en dicho incremento. El daño de todos los incrementos se suma y se muestra como dato de salida para el final de cada mes en el programa de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos.

2.2.5. PREDICCIÓN DE DETERIOROS

El daño calculado y acumulado es un parámetro mecanicista que representa el índice relativo de daño asociado a la carga en la estructura del pavimento. Cuando el “daño” es muy pequeño (p. ej. 0.0001) no se esperaría que la estructura del pavimento presente algún deterioro físico como agrietamiento o escalonamiento. A medida que el “daño” calculado aumenta a un valor significativo (p. ej. 0.1 o mayor), se puede esperar el desarrollo de deterioros visibles en algunas zonas a lo largo del proyecto.

El daño incremental se calcula mes a mes y es transformado a un deterioro físico del pavimento tal como agrietamiento transversal o escalonamiento usando modelos calibrados que relacionan el daño calculado con el deterioro observable.

Los deterioros estructurales considerados para el diseño de JPCP son Agrietamiento transversal de la losa de hormigón asociado a fatiga y deflexión diferencial asociada a escalonamiento de la junta transversal. El Agrietamiento transversal de la losa de hormigón puede iniciarse tanto en la superficie de la losa de hormigón y propagarse hacia abajo (agrietamiento de arriba hacia abajo) o viceversa (agrietamiento de abajo hacia arriba) dependiendo de las condiciones de carga y del ambiente del lugar del proyecto, así como también propiedades de los materiales, características del diseño, y condiciones durante la construcción. Ambos tipos de agrietamiento son considerados en la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos. El daño se acumula diferencialmente para cada uno de los distintos deterioros y por ende requieren ser considerados en forma separada. A continuación, se explica la acumulación de daño en el proceso de dichos deterioros para pavimentos tipo JPCP.

2.2.5.1. Agrietamiento Transversal de Abajo hacia Arriba

Cuando los ejes de camiones se encuentran cerca del borde longitudinal de la losa, al medio entre las juntas transversales, se produce un esfuerzo de flexotracción crítico en el fondo de la losa como se muestra en la Figura 2.2-2. Dicho deterioro aumenta considerablemente cuando se produce un gradiente de temperatura positivo muy alto a través de la losa (la parte de arriba está más caliente que la parte de debajo de la losa). Cargas de tránsito repetidas de ejes pesados bajo dichas condiciones producen un daño por fatiga a lo largo del borde al fondo de la losa, el cual resulta eventualmente en una grieta transversal que se propaga hasta la superficie del pavimento. Con el tiempo, las grietas transversales en el pavimento se pueden deteriorar y generar rugosidad. Las medidas más efectivas para limitar el agrietamiento transversal de abajo hacia arriba incluyen las siguientes:

- Aumentar el espesor de la losa.
- Reducir el espaciamiento de juntas
- Usar losas ensanchadas.
- Usar mezclas de hormigón con Coeficiente de Expansión Térmica (CET) más bajo.
- Proveer una berma de hormigón amarrada.
- Usar una mezcla de hormigón con una mayor resistencia.
- Usar una base estabilizada.

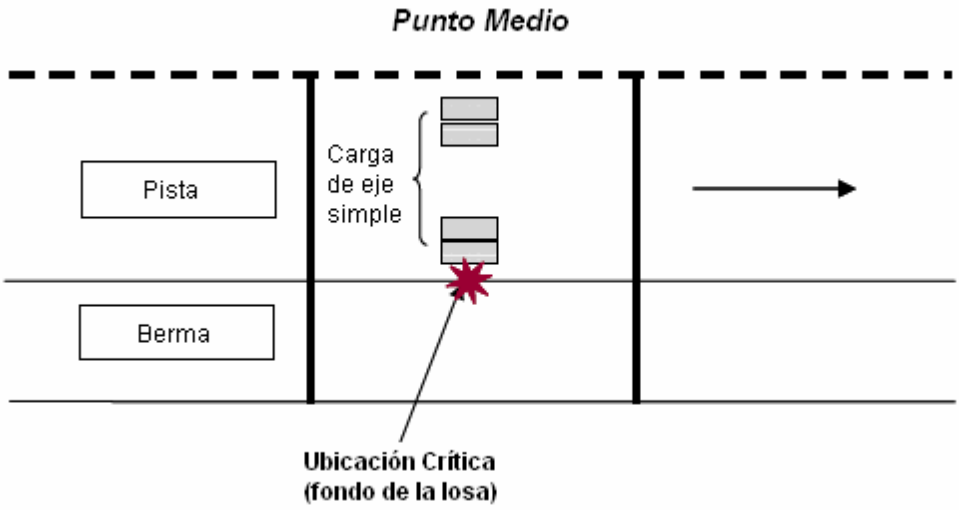


Figura 2.2-2: Posición crítica para Agrietamiento de abajo hacia arriba

2.2.5.2. Agrietamiento Transversal de Arriba hacia Abajo

Cargas repetidas de camiones pesados con ciertos espaciamientos entre ejes cuando el pavimento se encuentra expuesto a un diferencial de temperatura negativo alto (la superficie de la losa está más fría que la parte más baja de la misma) ocasionan un daño en la superficie de la losa, el cual podría eventualmente derivar en un agrietamiento transversal o diagonal que se inicia en la superficie del pavimento.

La condición crítica de carga para el agrietamiento de arriba hacia abajo implica una combinación de ejes que cargan los bordes opuestos de la losa en forma simultánea.

Bajo la presencia de un gradiente de temperatura negativo alto, dicha combinación de carga provoca un esfuerzo por tracción grande en la superficie de la losa cerca del borde crítico, como se muestra en la Figura 2.2-3. Dicho tipo de carga se da frecuentemente bajo la combinación de ejes de dirección y tracción de camiones y otros vehículos. Múltiples remolques con un espaciamiento relativamente corto entre eje de remolque a remolque son otra de las comunes causas de las cargas críticas para agrietamiento de arriba hacia abajo. El esfuerzo de arriba hacia abajo se vuelve crítico cuando se presenta una cantidad significativa de alabeo hacia arriba permanente. Así, el agrietamiento de arriba hacia abajo se puede controlar efectivamente empleando las siguientes medidas:

- Aumentar el espesor de la losa.
- Reducir el espaciamiento entre juntas.
- Proveer bermas amarradas de hormigón.
- Emplear losas ensanchadas.
- Usar una mezcla de hormigón con resistencia más alta, con CET y retracción más bajos.
- Usar base estabilizada.
- Reducir el alabeo por temperatura incorporado, luego de la colocación.

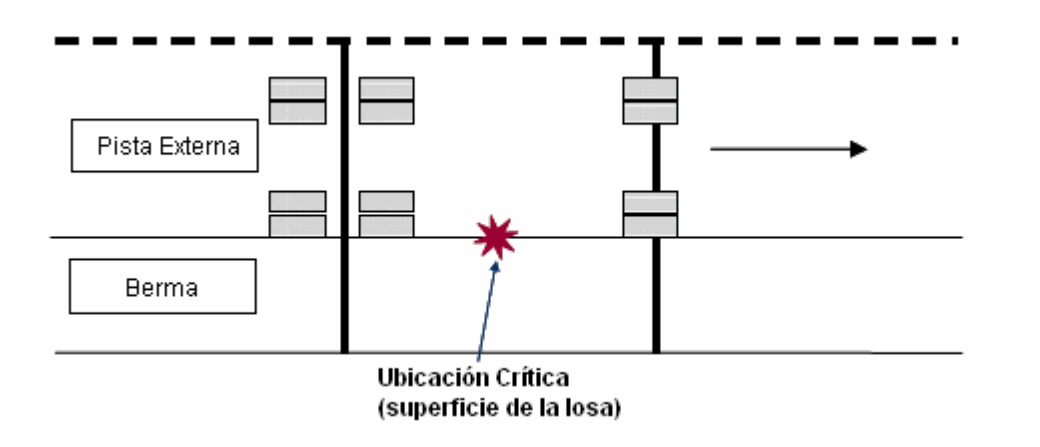


Figura 2.2-3: Posición crítica para Agrietamiento de arriba hacia abajo

2.2.5.3. Escalonamiento de Juntas

Las cargas repetidas de ejes pesados que cruzan las juntas transversales crean el potencial para el escalonamiento de juntas, como se muestra en la Figura 2.2-4. El escalonamiento se puede volver severo y provocar pérdida en la calidad de rodado requiriendo de rehabilitación prematura si alguna de las siguientes condiciones ocurre:

- Repetidas cargas de ejes pesados.
- Baja eficiencia de transferencia de carga de la junta (ETC)
- Presencia de finos bombeables bajo la junta; una base/subbase/sub-rasante erosionable.
- Presencia de humedad libre bajo la junta.

Las medidas más efectivas para controlar el escalonamiento de juntas incluyen las siguientes:

- Proveer barras de transferencia de carga.
- Aumentar el diámetro de las barras de transferencia de carga.
- Usar losas ensanchadas.
- Proveer una base menos erosionable.
- Especificar un espaciamiento de juntas menor.
- Mejorar las propiedades del agregado mayor (tamaño del agregado máximo, etc.).
- Proveer una berma amarrada.
- Proveer sub drenaje (particularmente para pavimentos sin barras de traspaso de carga).

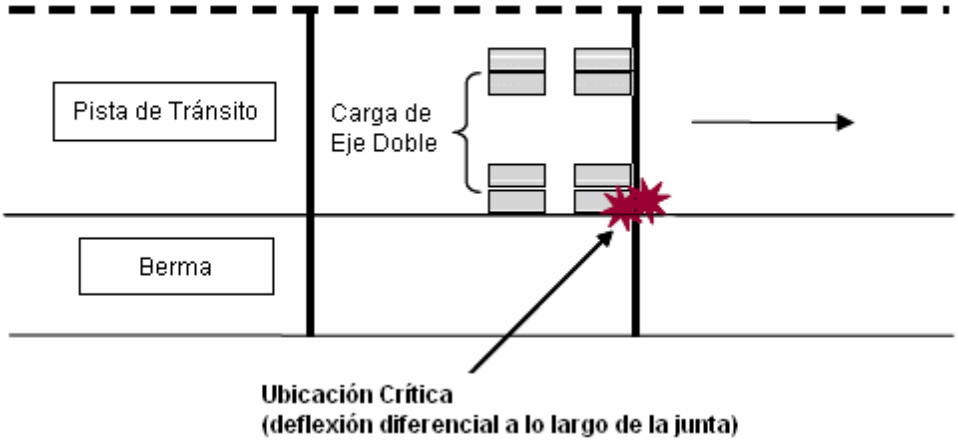


Figura 2.2-4: Posición crítica para escalonamiento

2.2.6. PREDICCIÓN DE LA REGULARIDAD (IRI)

El IRI a lo largo del período de diseño depende del perfil del pavimento inicial desde el cual se calcula el IRI inicial y el subsiguiente desarrollo de los deterioros a través del tiempo. Éstos incluyen agrietamiento transversal de la losa, escalonamiento y desconche de la junta. El modelo del IRI usa los deterioros estimados usando los modelos incluidos en la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos y un modelo de desconche empírico, el IRI inicial, y los factores locales para predecir la regularidad a lo largo del tiempo. Dentro de los factores locales se incluyen condiciones de la subrasante y del clima para estimar la rugosidad causada por la retracción o suelos expansivos y heladas. El IRI se estima en forma incremental a lo largo de todo el período de diseño y en forma mensual.

2.2.7. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y MODIFICACIÓN DEL DISEÑO

Un diseño factible se obtiene en forma iterativa bajo un método de diseño mecanicista. El proceso involucra los siguientes pasos:

1. Establecer criterios de desempeño (ej., nivel de agrietamiento, escalonamiento y suavidad al final de la vida de diseño y el nivel de confianza deseado para cada uno).
2. Establecer un diseño preliminar.
3. Predecir el desempeño a lo largo de la vida de diseño.
4. Evaluar el desempeño predicho versus los requerimientos de diseño.
5. Si los criterios no son satisfechos, revisar el diseño y repetir pasos 3 y 4 hasta que el diseño satisfaga los requerimientos de desempeño.

2.2.8. CONFIABILIDAD DE DISEÑO

La gran mayoría de los aspectos asociados con el diseño de pavimentos nuevos o con la rehabilitación de estos, son de naturaleza variable o presentan cierto nivel de incertidumbre. Tal vez, la mayor parte de esta incertidumbre corresponde a las proyecciones de las cargas por eje provenientes del tráfico, para todo el tiempo que se tiene

proyectado de vida útil. Los materiales y los procesos constructivos también aportan de manera significativa a la variabilidad, donde además los pavimentos exhiben variaciones importantes en sus condiciones a lo largo de su trayecto.

Aun cuando los conceptos mecanicistas entregan una metodología más precisa y realista para el diseño de pavimentos, es necesario un método practico para considerar las incertidumbres y las variaciones en el diseño, de manera que un pavimento nuevo o rehabilitado pueda ser diseñado para un nivel deseado de confiabilidad.

La confiabilidad ha sido incorporada en esta guía de diseño, en una forma consistente y uniforme para todos los tipos de pavimentos. En la actual edición, está disponible una solución analítica que permite diseñar para un nivel de confiabilidad deseado, para cada tipo de deterioro y rugosidad. La confiabilidad en el diseño se define como la probabilidad de que cada tipo de deterioro y nivel de regularidad sea menor que un nivel crítico elegido, a lo largo del periodo de diseño. Esto es:

R = P[Deterioro a lo largo del periodo de diseño $<$ Nivel crítico de diseño]

Por ejemplo, se puede definir la confiabilidad asociada al agrietamiento por fatiga como:

R = P[Agriet. por fatiga a lo largo del periodo de diseño $<$ 20% área de la pista]

Es importante destacar que esta definición varia de las versiones previas de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO, en donde la confiabilidad se definía en función del número estimado de ejes equivalentes necesarios para llegar a un nivel de serviciabilidad terminal (N) fuera menor que el número de ejes equivalentes aplicados actualmente en el pavimento (n).

$$R = P[N < n]$$

Este enfoque producía resultados que indicaban que, para aumentar la confiabilidad en el diseño, se debía aumentar el espesor de los pavimentos. Sin embargo, esto no podía ser siempre cierto para las medidas de desempeño clave adoptadas en la Guía. Además, otras opciones del diseño aparte del espesor (diseño de mezclas asfálticas en caliente, barras de refuerzo para pavimentos de hormigón con juntas simples y mejoramientos en la subrasante para todos los tipos de pavimento) pueden ser considerados para mejorar la confiabilidad estimada en el diseño.

Por lo tanto, el diseñador comienza el proceso mediante una configuración preliminar de la estructura de pavimento, luego el software que incluye la Guía GEMDP AASHTO 2008 proporciona la predicción de los deterioros claves y rugosidad en la vida útil proyectada. Esta predicción está basada en la media o en valores promedio para todas las variables de entrada, como se puede apreciar en la Figura 2.2-5. Por lo tanto, los deterioros y rugosidad predichos representan los valores medios estimados de confiabilidad del 50%. Es decir, existe un 50% de posibilidad de que el deterioro proyectado o IRI sea más grande o menor que la predicción media.

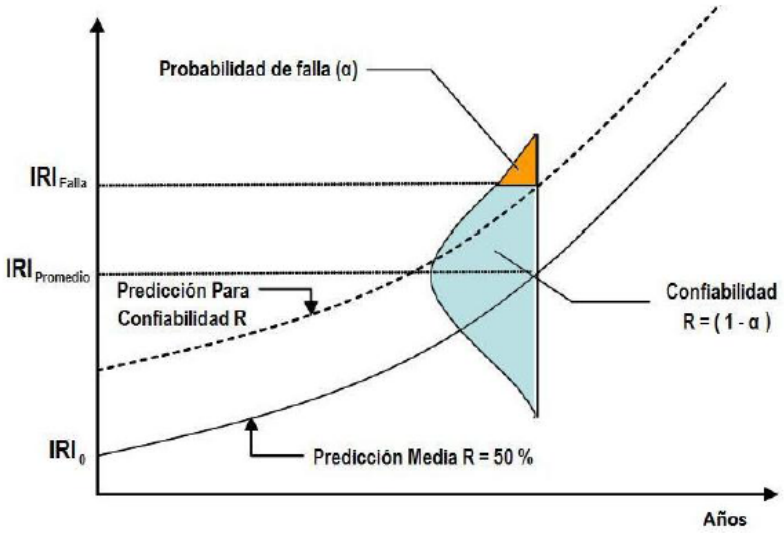


Figura 2.2-5: Concepto de la confiabilidad en el diseño para la rugosidad (IRI)

Para la mayoría de los proyectos se requerirá una alta probabilidad de que el diseño satisfaga los criterios de desempeño a lo largo del periodo de vida útil de la ruta. En efecto, mientras más importante sea el proyecto, en términos de las consecuencias que pueda tener su deterioro o falla, más alto será el nivel deseado de confiabilidad en el diseño. A menudo se utiliza el nivel del volumen de tránsito como un parámetro para elegir el nivel de confiabilidad del proyecto.

Debido al error asociado en la predicción de los deterioros y de la regularidad en el pavimento usando funciones de transferencia, el nivel actual del deterioro o del IRI podría ser más alto o más bajo que el valor medio esperado. La distribución del error para un tipo de deterioro o nivel de IRI dado con respecto a la predicción de un valor medio esperado, está en función de varias fuentes de variación e incertidumbre, dentro de las cuales se incluyen:

- Errores en la estimación de las cargas provenientes del tránsito.
- Fluctuaciones en el clima a lo largo de los años.
- Variaciones en el espesor de las capas del pavimento, propiedades del material y características de la subrasante a lo largo del proyecto.
- Diferencias entre lo diseñado y lo llevado a cabo en la construcción, para las características de los materiales y otras propiedades de cada capa.
- Errores en la medición de los deterioros y de la cantidad del IRI.
- Errores y limitaciones en los modelos predictivos.

La forma y amplitud de la distribución de probabilidad de la variable aleatoria (de cada deterioro y del IRI) son importantes y deben ser conocidas a priori en este tipo de procedimientos. Los deterioros y el IRI presentan una distribución aproximadamente normal sobre los rangos de deterioro y de regularidad que son de interés en el diseño. La desviación estándar para cada tipo de deterioro fue determinada del modelo predictivo de error (error estándar de la estimación), calibrado a partir de los datos obtenidos del Programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo de los Estados Unidos y de otros datos obtenidos en terreno. Con respecto al IRI, su desviación estándar fue determinada usando una forma ajustada del modelo de la estimación de la varianza. Este punto es muy importante, ya que aquí se genera la diferencia con el conocido valor S_o utilizado por la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993, el cual representa y engloba el error estándar combinado de todos los parámetros en uno y lo introduce al diseño, sin

embargo, como se menciona, en el nuevo método de la GEMDP AASHTO 2008, cada tipo de deterioro ya tiene un valor determinado y calibrado en base a mediciones y datos obtenidos en terreno.

Por lo tanto, la predicción de los modelos de desempeño para distintos niveles de confiabilidad es determinado de manera general como:

$$\text{Desempeño_R} = \text{Desempeño}_{medio} + Z_R * STD_{medio}$$

Donde:

Desempeño_R = Predicción de escalonamiento, IRI o agrietamiento transversal para un nivel de confianza R.

Desempeño_{medio} = Desempeño predicho medio, equivalente a un nivel de confianza de 50%.

Z_R = Variable normal estandarizada para nivel de confianza R.

STD_{medio} = Desviación estándar para desempeño observado para un nivel de confianza del 50%.

Entonces, para el diseño de un pavimento donde se requiere una confiabilidad del 80% para el porcentaje de losas agrietadas, la predicción de la curva del 80% no debe superar un valor umbral de pre-selección crítica de agrietamiento. Este nivel es seleccionado por el diseñador antes de realizar el diseño del pavimento. De manera ilustrativa se entiende el concepto de confiabilidad a través de la Figura 2.2-6, en la cual se considera la predicción del agrietamiento transversal para R = 80%. En ella se aprecia que la predicción se basa en los resultados para un nivel R = 50% (valores promedio de los datos de entrada) y considerando una distribución normal en torno a los mismo. La probabilidad de falla (20%) quiere decir que, de 100 proyectos, 20 superarán el valor predicho para cierto año.

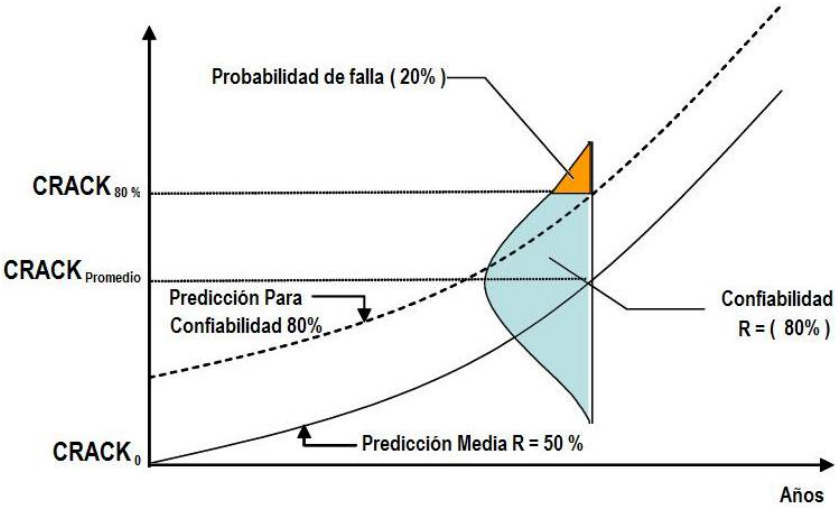


Figura 2.2-6: Ejemplo del concepto de la confiabilidad del 80% para la predicción del agrietamiento

La selección de un nivel adecuado de confiabilidad para el diseño es una tarea difícil. Para ello, se disponen las siguientes líneas de acción para su determinación:

- La confiabilidad en el diseño debe ser elegida para cada tipo de deterioro y para el IRI. Estos niveles de confiabilidad para cada uno de estos aspectos no deben ser necesariamente iguales.

- Existe una conexión inherente entre los niveles elegidos para cada tipo de deterioro, el IRI y el nivel de confiabilidad para el diseño. Por ejemplo, un diseñador puede elegir un 97% de confiabilidad para el agrietamiento, con un 20% del área como nivel crítico, o una confiabilidad más baja, de un 80% con un 10% del área como nivel crítico.
- El uso tanto del IRI como de la confiabilidad global de diseño serían similares al papel que anteriormente jugaba en el diseño el nivel de serviciabilidad. De todos modos, no es aconsejable hacer del IRI la principal definición de la confiabilidad en el diseño de un proyecto, pues las fallas en el pavimento dependen en mayor medida de los tipos de deterioro clave. Para poder cumplir con todos los requerimientos de confiabilidad, se recomienda utilizar todos los tipos de deterioro y el IRI.

Se debe destacar que los niveles de confiabilidad para el diseño utilizados para la GEMDP AASHTO 2008. no son los mismos que los utilizados en la versión de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993.

La Tabla presenta los valores recomendados de confiabilidad para el diseño de pavimentos nuevos mediante el uso de la GEMDP AASHTO 2008[50].

Clasificación funcional de caminos	**Niveles de confiabilidad (%)**	
	Urbano	**Rural**
Interestatales/Vías libres	85 - 97	80 - 95
Arterias Principales	80 - 95	75 - 90
Colectores	75 - 85	70 - 80
Local	50 - 75	50 - 75

Tabla 2.2-1: Valores recomendados de confiabilidad

A medida que se especifique una mayor confiabilidad para el diseño, mayores son los requerimientos exigidos a la estructura por cuanto los valores predichos de desempeño son mayores. Por lo tanto, se asocian mayores valores de confiabilidad a los proyectos que presenten un mayor volumen de tránsito y cuya falla incurra en pérdidas económicas o malestar en los usuarios.

[50] Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, Chapter 8, Page 76

3. INFORMACIÓN DE TRÁNSITO REQUERIDA EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

3.1. INTRODUCCIÓN

Tanto la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos como el Manual de Carreteras Volumen 3, requieren datos de Tráfico específicos para el diseño de estructuras de pavimentos rígidos.

A continuación, se presentará el detalle de cada uno de estos parámetros, la comparación y la importancia de ellos en el diseño estructural del pavimento rígido y en los distintos criterios de falla.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO

Dentro del gran número de factores que se consideran actualmente para el análisis y diseño de pavimentos, el tránsito de vehículos es uno de los más importantes. Su caracterización adecuada es fundamental para poder concebir estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad. La importancia del tránsito vehicular es exponencialmente mayor en vías de alto tráfico, como sucede en las carreteras troncales del territorio nacional, dado que la infraestructura vial reviste una enorme importancia para el desarrollo económico del país.

Para realizar la caracterización del tránsito de vehículos en Chile, la Dirección de Vialidad a través del Manual de Carreteras utiliza las recomendaciones establecidas en la “AASHTO Guide for Design of Pavement” del año 1993 junto a su suplemento para pavimentos rígidos del año 1998, los cuales corresponden a una metodología empírica, que tiene sus fundamentos principalmente en la prueba “AASHO Road Test”, desarrollada en la década de los ’60, explicado anteriormente. Esta metodología utiliza Ejes Equivalentes de carga (ESAL en inglés) de 80 [kN] (18 [kip]) [Eje Patrón] que son una función basada en:

(i) Factor de Ejes Equivalentes (FEE)
(ii) Volumen y Composición del tránsito (TMDA)
(iii) Tasas de Crecimiento Vehicular
(iv) Factor de Pista de Diseño.

(i) Factor de Ejes Equivalentes (FEE): es el cociente que resulta entre el número de Ejes Patrón requeridos para producir una determinada pérdida de serviciabilidad, respecto del número de ejes de determinada configuración y peso, necesarios para producir la misma pérdida de serviciabilidad. Con esta fórmula se puede determinar factores para ejes simples de rueda doble, ejes dobles (tándem) de rueda doble y ejes triples (tridem) de rueda doble. Dado que cada estructura responde de manera distinta ante una misma solicitación, el FEE será único para cada una de estas estructuras, influyendo principalmente el espesor y las serviciabilidades inicial y final que se adopten. El fin del FEE es el de transformar los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de rueda doble de 80 [kN] [Eje Patrón], ya que las fórmulas a aplicar utilizan el Eje Patrón como dato de entrada.

(ii) Volumen y Composición del tránsito (TMDA): El tránsito medio diario anual (TMDA) es el indicador que define el total de vehículos que circula como promedio diario en un año. Si del TMDA se resta el tránsito liviano, quedan sólo los camiones y buses, que son los que interesan para el diseño de los pavimentos. El tránsito pesado medio diario anual, TMDAC, es el indicador adecuado para calcular las

solicitaciones de diseño sólo cuando no existen variaciones estacionales significativas en los demás parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento; si ello no es así, como por ejemplo, en zonas donde en invierno existe penetración de la helada en el suelo de la subrasante o cuando existen variaciones significativas del nivel freático, el TMDAC debe desagregarse dividiendo el año en periodos durante los cuales los otros factores se mantienen sensiblemente constantes.

(iii) Tasas de Crecimiento Vehicular: El cálculo de las solicitaciones para diseño debe considerar que habitualmente el TMDA varia año a año, por lo que se debe contar con un estudio previo que determine las tasas de variación del volumen de tránsito, normalmente diferentes para cada tipo de vehículo. El estudio de la demanda debe considerar principalmente las tendencias históricas de los flujos, expresadas como proyecciones ligadas a variables macroeconómicas, tasas de motorización y otras.

(iv) Factor de Pista de Diseño: Normalmente la pista de diseño corresponde a la pista externa del pavimento, por la que circula la fracción más importante del TMDAC. En carreteras de dos pistas, una en cada sentido, se acepta que la pista de diseño soporte la mitad del TMDAC; en carreteras unidireccionales con dos o más pistas en cada dirección, el tránsito en la pista de diseño es algo menor que la mitad del TMDAC, siendo la distribución una función de la magnitud del TMDA.

La forma en que se distribuye el tránsito pesado por las diferentes pistas según el Volumen 3 del Manual de Carreteras está especificado en la Tabla 3.603.202.D del mismo manual, donde los porcentajes de distribución se derivan de conteos efectuados en Estados Unidos y son los que los diseñadores deben utilizar. Estos porcentajes dependen directamente del TMDA por lo que es necesario realizar un conteo tanto de automóviles livianos como tránsito pesado.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores se procede a realizar el cálculo de los Ejes Equivalentes de Carga. En resumen, el Volumen 3 del Manual de Carreteras utiliza 4 parámetros para la obtención de los Ejes Equivalentes de carga y con esto se realiza la caracterización del tráfico.

Sabiendo la importancia de este factor (Tráfico), tanto AASHTO con el suplemento del año 98 y el Volumen 3 del Manual de Carreteras generan una gran incertidumbre en el incremento del tráfico y su caracterización (configuración de ejes, tipo y presión de neumáticos) al utilizar tan pocos parámetros, debido a la gran variedad de vehículos usados hoy en día, los errores en los que se incurren al realizar las extrapolaciones necesarias para suplir los parámetros iniciales, etc. Además, el uso de Ejes Equivalentes de Carga genera un sobredimensionamiento en los espesores del pavimento, algo que varios autores han demostrado (Delgadillo, Wahr & Alarcón, 2011)[51].

Por otro lado, tenemos la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, que no utiliza Ejes Equivalentes de Carga y no requiere el desarrollo de factores de ejes equivalentes (FEE). El procedimiento utilizado por la GEMDP AASHTO 2008 permite configuraciones especiales de ejes para permitir análisis especializados, en adición a las cargas normadas por eje simple, tándem, tridem y quad.

Para lograr este análisis especializado, la GEMDP AASHTO 2008 hace uso de cuatro tipos básicos de datos de entrada:

(a) Volumen de tráfico referido al año base.

[51] TOWARDS THE IMPLEMENTATION OF THE MEPDG IN LATIN-AMERICA, PRELIMINARY WORK CARRIED OUT IN CHILE, Transportation Research Records Journal, 2011

(b) Factores de ajuste del volumen de tráfico.
(c) Factores de distribución de carga por eje.
(d) Datos de entrada generales del tráfico.

Dado que la GEMDP AASHTO 2008 fue desarrollada en Estados Unidos, esta requiere que los datos de entrada pertenezcan a una de las 10 clases vehiculares (Clase 4 a 13) de la "Federal Highway Administration" (FHWA), las cuales corresponden a vehículos pesados incluyendo Buses. Existen varias propuestas para hallar la equivalencia entre la clasificación de vehículos utilizada en Chile y la de Estados Unidos, y así utilizar correctamente la GEMDP AASHTO 2008.

Además de este requerimiento, otro de los aportes importantes de la GEMDP AASHTO 2008 es que reconoce el hecho de que los datos de tráfico en detalle podrían no estar disponibles en los últimos años para caracterizar de manera precisa el tráfico futuro para el diseño. Por lo tanto, para facilitar el uso del software de la GEMDP AASHTO 2008, independiente del nivel de detalle de los datos disponibles, la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos adopta un enfoque jerárquico para el desarrollo de las entradas requeridas por el tráfico tal como se mencionó en un capítulo anterior.

Según el nivel jerárquico que se defina para el diseño de un proyecto, se utilizan diferentes fuentes específicas para la obtención de los datos de tráfico:

- Pesaje en Movimiento (WIM)

El pesaje en movimiento se define como el proceso de estimar el peso bruto y los pesos por cada eje de un vehículo en movimiento mediante la medición y análisis de las fuerzas que se presentan en los neumáticos de los vehículos. La razón principal de utilizar estaciones WIM en las carreteras del país es sancionar a los camiones sobrecargados que producen un excesivo daño en el pavimento. Este tipo de pesaje puede generar datos Nivel 1, 2 o 3, dependiendo si el equipo se encuentra en el sitio específico, a nivel regional o nacional respectivamente.

- Clasificación automática de vehículos (AVC)

El sistema de clasificación automática de vehículos es un conjunto de herramientas que se utilizan para identificar los vehículos que pasan por un punto en específico. Estas herramientas incluyen muchos tipos de sensores que identifican el perfil del vehículo y en conjunto con una base de datos especial se clasifican los vehículos. En primera instancia el sistema registra las características principales, tales como longitud, ubicación de los ejes y velocidad de pasada por el sensor de perfiles. Los datos de AVC son utilizados principalmente por la GEMDP AASHTO 2008 para calcular la distribución normalizada por clase de camión. Este sistema puede generar datos Nivel 1, 2 o 3, dependiendo si el equipo se encuentra en el sitio específico, a nivel regional o nacional respectivamente.

- Conteo de vehículos

El conteo de vehículos consiste en el recuento de vehículos pasantes clasificados como Vehículos Livianos, Buses, y Camiones dentro de un determinado período de tiempo. El conteo de vehículos puede ser continuo, estacional, o de corta duración.

Este conteo puede generar datos Nivel 2 o 3 y siempre debe ser del sitio específico.

- Proyección de tráfico y modelos de generación de viajes

Estos métodos son particularmente útiles en áreas urbanas y están basados en información obtenida a partir de estudios de retorno, encuestas origen-destino, y conteos a través de placas. Estos modelos pueden generar datos Nivel 1, 2 o 3, dependiendo de los datos de entrada y de la exactitud/confiabilidad del modelo.

Dicha jerarquización y fuentes de obtención de datos se aplican a los parámetros que se detallarán a continuación. La GEMDP AASHTO 2008 aclara que no todos los parámetros deben tener el mismo nivel jerárquico, lo que le brinda al diseñador una mayor flexibilidad en el diseño. Se ha realizado estudios previos en Chile (Wahr et al, 2009), donde se sensibilizó los distintos niveles de entrada jerárquicos para los parámetros referidos a los materiales: Tipo de Agregado, Peso Unitario, Coeficiente de Expansión Térmica, Conductividad Térmica y Capacidad Térmica. Se concluyó que la sensibilidad de las jerarquías no era significativa. No se ha realizado, sin embargo, sensibilizaciones en Chile para variaciones de las propiedades de los materiales dentro de una misma jerarquía de entrada de datos. Tampoco se ha contextualizado esta sensibilización a información proveniente de materiales chilenos, por lo que el presente trabajo presenta un aporte en ambos aspectos.

A continuación, cada grupo de datos de entrada detallado.

3.2.1. VOLUMEN DE TRÁFICO REFERIDO AL AÑO BASE

El año base es definido como el primer año que el segmento de carretera en proceso de diseño es abierto al tráfico. Respecto al año base la siguiente información es requerida:

3.2.1.1. Tráfico Medio Diario Anual de Camiones en Vías de Dos Sentidos (TMDAC):

Es el volumen total del tráfico de camiones (el número total de vehículos pesados en el flujo del tráfico) pasando por un punto o segmento de la carretera que va a ser diseñado en ambas direcciones durante un periodo de 24 horas. El TDMAC tiene un efecto significativo en los niveles de deterioro del pavimento y por lo tanto debería hacerse todo el esfuerzo para recolectar datos actuales del proyecto en diseño.

3.2.1.2. Número de pistas en la dirección de diseño:

El número de pistas en la dirección de diseño es determinado por las especificaciones del diseño y representa el número total de pistas en una dirección.

3.2.1.3. Porcentaje de camiones en la dirección de diseño:

El porcentaje de camiones en la dirección de diseño o el factor de distribución direccional (FDD) es usado para cuantificar cualquier diferencia en el volumen global de camiones en dos direcciones. Se asume generalmente el 50% cuando el TMDA y el TMDAC son dados para las dos direcciones; sin embargo, este no es siempre el caso. De hecho, usar diferentes rutas para el transporte de bienes hacia y desde ciertas áreas e instalaciones es común, y depende del tipo de producto que está siendo transportado, así como de otros patrones de tráfico locales o regionales.

3.2.1.4. Porcentaje de camiones en la pista de diseño:

El porcentaje de camiones en la pista de diseño o factor de distribución de camiones por pista (FDP) representa la distribución del tráfico de camiones entre las pistas de una dirección. La Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 define el FDP en función de la clase de camión principal que circula por la autopista (la clase de camión principal representa la clase de camión que circula mayoritariamente por la autopista). Es decir, el porcentaje de camiones en la pista de diseño se estima para cada clase de camión y según la clase principal se estima el valor. Este valor cobra importancia en la medida que el tráfico pesado respete la pista destinada (generalmente el carril externo debido a la menor velocidad desarrollada).

Mediciones realizadas por Iturriaga (2014) demuestran que, para las principales vías urbanas utilizadas por el tráfico pesado en Chile, la mayor distribución de vehículos se concentra en la pista central, a diferencia de lo indicado por el Manual de Carreteras Volumen 3 para vías de tres pistas (Tabla 3.603.202.D) en donde los factores de pista fueron desarrollados en base a un flujo vehicular mayor en la pista externa, tal como se mencionó anteriormente. Comprobándose que es necesario adecuar la realidad chilena actual al diseño de pavimentos.

3.2.1.5. Velocidad operacional del vehículo (Camiones):

La velocidad operacional del vehículo (Camiones) o la velocidad de viaje promedio generalmente depende de muchos factores, que incluyen el tipo de autopista, el terreno, el porcentaje de camiones en el flujo de tráfico y otros más. La velocidad de los camiones tiene su efecto principalmente en el módulo dinámico E* de las mezclas asfálticas en caliente y, por tanto, en los deterioros. Bajas velocidades dan como resultados un daño incremental mayor (mayor agrietamiento por fatiga, ahuellamiento o escalonamiento). La Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 recomienda utilizar la velocidad operacional por defecto a menos que el pavimento se encuentre en una zona especial de baja velocidad (por ejemplo, una vía en subida, o cercana a paradas de buses). El software de la GEMDP AASHTO 2008 usa 96.6 [km/h] como valor por defecto de la velocidad operacional. Dado que estamos analizando el diseño de pavimentos rígidos debemos indicar que este parámetro no tiene incidencia alguna en dicho diseño.

Se puede observar que este grupo de parámetros (Volumen de tráfico referido al año base) tiene una gran importancia dada la cantidad y detalle de la información requerida. Dicha información afecta principalmente al nivel de deterioro del pavimento, así como también permite un diseño mucho más exacto y acorde a las necesidades reales del tráfico. Comparando con la metodología actualmente usada en Chile mediante el Volumen 3 del Manual de Carreteras vemos que existe una gran diferencia en cuanto a la cantidad y detalle de la información concluyendo que actualmente no se obtiene una caracterización completa ni fiel de la realidad chilena.

3.2.2. FACTORES DE AJUSTE DEL VOLUMEN DE TRÁFICO

Los siguientes factores de ajuste del volumen del tráfico de camiones son necesarios para la caracterización del tráfico y cada uno es explicado a continuación.

3.2.2.1. Factores de ajuste mensual (FAM):

Los factores de ajuste mensual del tráfico de camiones simplemente representan la proporción del tráfico de camiones anual para una clase de camiones dada que ocurre en un mes específico. En otras palabras, el factor de distribución mensual para un mes específico es igual al tráfico de camiones mensual para esa clase para ese mes dividido por el tráfico total de camiones para esa clase para el año entero.

Los factores de ajuste mensual del tráfico de camiones (FAM) dependen de factores como el uso de la tierra adyacente, condiciones climáticas, ubicación de las industrias en el área y ubicación de la carretera (urbana o rural). En realidad, diferencias mensuales en la distribución del tráfico de camiones podrían variar durante el transcurso de varios años y dentro el año durante la vida útil del pavimento (por ejemplo, un volumen de tráfico mayor durante el verano y un volumen de tráfico menor durante el invierno, lo cual es importante ya que refleja patrones de viaje del tráfico pesado durante todo el año). Sin embargo, para la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, la distribución mensual del tráfico de camiones se asume constante durante todo el periodo de diseño del pavimento

Ensayos realizados por distintos organismos gubernamentales en Estados Unidos (Virginia, Carolina del Norte, etc.) muestran que no hay casi ninguna diferencia en los tipos de falla del pavimento usando el factor específico del sitio o los valores por defecto de la GEMDP AASHTO 2008, lo que ayuda a simplificar el diseño.

3.2.2.2. Distribución de Clase Vehicular:

La distribución de clase vehicular normalizada representa el porcentaje de cada clase de camión (clase 4 a la 13) dentro del TMADC para el año base. La suma del porcentaje de TMADC de todas las clases de camiones debe ser igual a 100. La clave para un programa de recolección de datos de clasificación exitosa no es la fuente de los datos, sino la habilidad para obtenerlos rutinariamente, verificar su validez, resumirlos en formatos utilizables, reportarlos de una manera que sea útil para los diseñadores y administrar el proceso eficientemente.

Como se dijo anteriormente, esta distribución va de la mano con la clasificación vehicular propuesta por la FHWA y las equivalencias al sistema chileno porque la GEMDP AASHTO 2008 se basa en dicha clasificación vehicular.

3.2.2.3. Factores de distribución horaria (FDH):

Los factores de distribución horaria (FDH) representan el porcentaje del TMADC dentro de cada hora del día. La suma del porcentaje del tráfico diario de camiones por incremento de tiempo debe sumar 100%.

Los factores de distribución horaria sólo son necesarios para el análisis de pavimentos rígidos, ya que relacionan hora a hora el volumen de tráfico con los gradientes de temperatura presentes en la losa de hormigón.

Este factor está directamente relacionado con el agrietamiento transversal debido a lo mencionado anteriormente (relación volumen de tráfico con gradientes de temperatura).

Otro beneficio de obtener el Factor de Distribución Horaria es que, al momento de realizar un análisis detallado de los costos relacionados al ciclo de vida del pavimento, tener y conocer dicha distribución ayuda a calcular la longitud de espera y la velocidad a través de la zona de trabajo en caso de alguna mantención o rehabilitación.

3.2.2.4. Factor de crecimiento del tráfico pesado:

Los factores de crecimiento del tráfico en un lugar o segmento particular son mejor estimados cuando hay datos de un conteo continuo del tráfico (asumiendo que los datos son fiables y que las diferencias encontradas de un año a otro se pueden atribuir al crecimiento), dado que es bien sabido que los volúmenes de tráfico en un solo sitio pueden ser afectados por una variedad de factores externos, y por lo tanto los factores de crecimiento calculados a partir de datos limitados recolectados de un número de lugares limitados pueden estar parcializados.

Es necesario enfatizar que no hay un procedimiento único que sea el mejor para todos los casos donde deban estimarse los factores de crecimiento del tráfico, y es recomendable que en vez de concentrarse en un solo procedimiento (por ejemplo, conteos de corta duración versus conteos continuos o datos de un lugar específico versus datos regionales), una mejor aproximación es usar todas las herramientas y los datos disponibles para examinar el crecimiento del tráfico desde distintas perspectivas para un lugar específico. En vez de desarrollar una sola estimación, las diferentes fuentes de datos pueden ser usadas para desarrollar un número de factores de crecimiento de los cuales un factor de crecimiento apropiado puede ser derivado. El software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 permite a los usuarios ingresar tanto la tasa de crecimiento como la función de crecimiento (Sin crecimiento, Crecimiento lineal y Crecimiento compuesto). Una función de crecimiento común puede ser elegida para todas las clases de camiones, o diferentes funciones para diferentes clases de camiones. Basado en la función elegida, la fecha de apertura al tráfico de la carretera (excluyendo el tráfico de construcción) y la vida de diseño del pavimento, el TMDAC es pronosticado para toda la vida útil del pavimento. La tasa de crecimiento tiene un efecto significativo en la predicción de los niveles de deterioro del pavimento siendo importante caracterizar este factor con la mayor precisión posible.

Este grupo de parámetros (Factores de ajuste del volumen de tráfico) representa uno de los más importantes al momento de relacionar el tráfico con las fallas asociadas a pavimentos rígidos, por lo que es necesario contar con datos actualizados y confiables. El Volumen 3 del Manual de Carreteras solo pide la Tasa de Crecimiento de los vehículos pesados, resultando en una caracterización incompleta si tenemos en cuenta la cantidad de parámetros que realmente afectan en el desempeño de los pavimentos actualmente.

3.2.3. FACTORES DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR EJE

Una de las principales innovaciones de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 es introducir nuevos conceptos técnicos al diseño, como son los Espectros de Carga completos por Eje para cada tipo de eje, que son considerados como el parámetro más importante para la caracterización de las solicitaciones del tráfico y que dejan atrás el antiguo concepto de Cargas de Eje Simple Equivalente (ESALS, por sus siglas en inglés). Es a través de los Espectros de Carga por

Eje que las cargas únicas de tráfico de un determinado sitio pueden ser caracterizadas de una manera que represente la realidad. Por medio de estas características de carga, las respuestas del pavimento y los daños resultantes pueden ser calculados.

Los Espectros de Carga completos por Eje se utilizan como dato de entrada para estimar la magnitud, configuración y frecuencia de las cargas de tráfico (Wang, et al. 2007[52]). El beneficio de utilizar las distribuciones de carga es que proporcionan un enfoque más directo y racional para el análisis y diseño de las estructuras de pavimento. Como se dijo anteriormente, este enfoque estima los efectos del tráfico actual sobre la respuesta del pavimento y las distintas fallas a las que está asociado el pavimento rígido. Los datos reunidos para cumplir con los criterios deben ser específicos del sitio en análisis; si esto no es posible, la información puede ser sustituida por datos de tráfico a nivel regional o estatal. Estudios realizados sobre el tema (Delgadillo, 2011; Iturriaga, 2014) concluyeron que a pesar que la GEMDP AASHTO 2008 proporciona Espectros de Carga completos por Eje por defecto, estos no pueden ni deben usarse en la realidad chilena debido a que si se consideran se puede generar un sub o sobre dimensionamiento en el diseño, demostrando con esto que los Espectros de Carga completos por Eje en Chile son mucho más agresivos que los utilizados en Estados Unidos. Al respecto, Iturriaga (2014) recomienda que, dada la importancia de diseñar con los Espectros de Carga completos por Eje de Chile, debe recopilarse la mayor cantidad de datos de tráfico de los últimos años (específicos del sitio) para así realizar la mejor caracterización.

Matemáticamente hablando, el Espectro de Carga completo por Eje es un histograma o distribución estadística de cargas por eje para un determinado tipo de eje (simple, tándem, tridem y quad) y por tipo de vehículo. En otras palabras, corresponde al número de aplicaciones de eje dentro de un rango específico de cargas por eje. Hallar los Espectros de Carga completos por Eje no requiere un análisis mucho más complejo que la caracterización mediante Ejes Equivalentes de carga, además, el uso del Espectro de Carga completo por Eje permite adaptar el dimensionamiento a las nuevas tendencias o adelantos técnicos en cuanto a configuración de ejes y en general en diseño de vehículos pesados, para los cuales no hay fórmula estándar de equivalencia con un eje tipo.

Entre las ventajas de utilizar Espectros de Carga completos por Eje, podemos mencionar que, al caracterizar el tráfico pesado en el tramo carretero en donde se realiza la medición y realizar un seguimiento en el tiempo, nos permite valorar la evolución de la distribución de las cargas, aspecto que está relacionado con la intensidad de las actividades económicas en el sector transporte. Además, los valores máximos permiten identificar los niveles de carga más usuales; niveles que se pueden asociar a si los vehículos circulan vacíos o con carga completa. También permite identificar los tramos carreteros en donde los niveles de carga exceden el reglamento y en qué porcentaje, para que de esta manera los organismos fiscalizadores puedan realizar de una manera más efectiva su labor.

Iturriaga (2014), realizó más de 2800 corridas de algoritmos para comprobar las ventajas de utilizar espectros de carga completos por eje versus los Ejes Equivalentes (EE). El objetivo principal es demostrar el efecto que tienen los espectros de carga completos por eje en el diseño, ya que son una medida directa de la solicitación del pavimento a diferencia de los EE. Se pretende demostrar que para un mismo nivel de EE se obtienen distintos espesores de losa variando la solicitación de los espectros de carga completos por eje. Debemos recordar que la Guía empírica AASHTO 93 se basa solamente en los EE para caracterizar el tráfico, por lo tanto, para un determinado nivel de EE, y si todos los demás parámetros de diseño permanecen constantes, el espesor de losa obtenido es único. Los

[52] Axle Load Distribution for Mechanistic–Empirical Pavement Design, Wang et al., 2007

valores utilizados se fijaron en un determinado nivel de EE (10 y 40 millones) y largo de losa (3.5 y 4.5 [m]). Estas comparaciones se realizaron para las principales plazas de pesaje del país y para los tres criterios de fatiga en pavimentos rígidos. A continuación, se muestran los resultados para el criterio de Agrietamiento obtenidos por Iturriaga (2014) en su memoria comparando el espesor mediante Manual de Carreteras y la GEMDP AASHTO 2008:

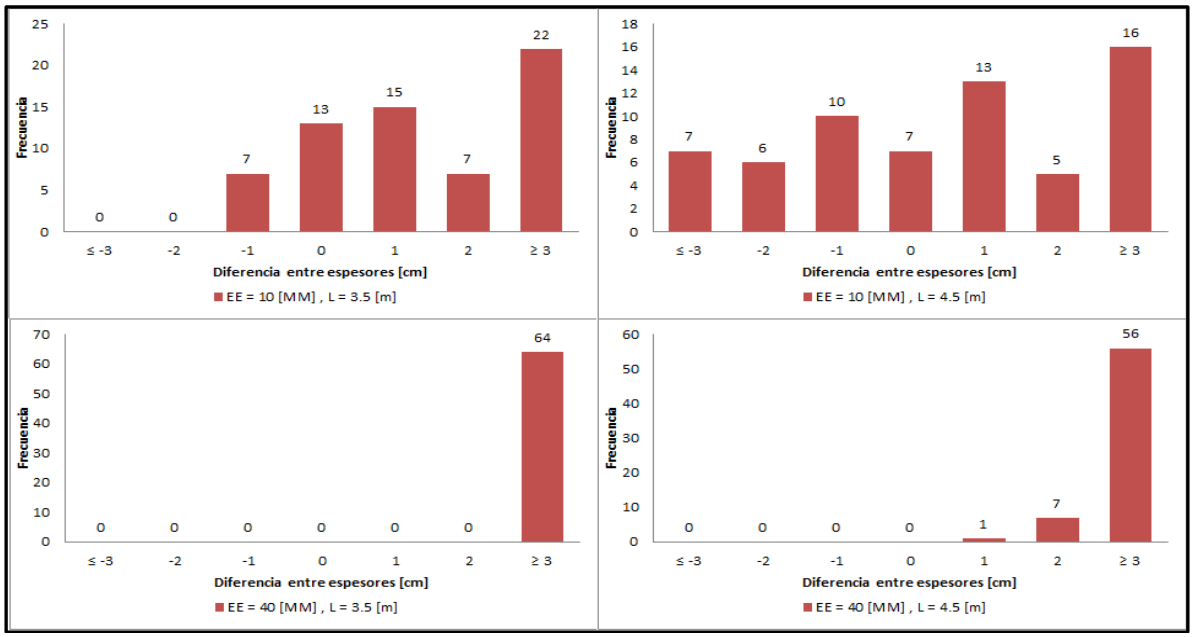


Figura 3.2-1: Diferencia entre el espesor obtenido por MC y los espesores obtenidos por la GEMDP AASHTO 2008 bajo el criterio de agrietamiento (E[MC] – E[GEMDPAGRIET]) (Memoria Iturriaga 2014)

3.2.4. DATOS DE ENTRADA GENERALES DEL TRÁFICO

La mayor parte de los datos de entrada de esta categoría definen la configuración de la carga por eje y los detalles de carga usados para calcular las respuestas del pavimento. Las excepciones son “Número de Ejes por Tipo de Eje por Clase de Camión” y “Distancia entre ejes”, los cuales son usados en los cálculos del volumen de tráfico.

3.2.4.1. Ancho de la pista de Diseño:

Este parámetro se refiere al ancho real de la pista de tráfico, tal como se define por la distancia entre las marcas de la pista en cada uno de los lados de la pista de diseño. Es un factor de diseño y puede o no puede ser igual al ancho de la losa. El valor por defecto propuesto por la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 es de 12 [ft] (3,66 [m]), sin embargo, el valor correspondiente al ancho de las pistas en Chile, equivale a 11.48 [ft] (3,5 [m]). Este valor de entrada tiene una significativa relevancia en los parámetros de desempeño (Escalonamiento y Agrietamiento transversal) de las losas en pavimentos de hormigón. (Cisternas, 2012)

3.2.4.2. Número de Tipos de Eje por Clase de Camión:

Este dato de entrada representa el número promedio de ejes para cada clase de camión (Clase 4 a la 13) para cada Tipo de Eje (Simple, Doble, Triple y Quad). Cabe señalar que el eje cuádruple (Quad) no existe en Chile. Este dato tiene una gran

importancia en el análisis de los Espectros de Carga completos por Eje, ya que dicho número puede dar mayor o menor importancia a cada espectro cuando se deseen comparar visualmente con el objetivo de determinar la influencia de estos en el diseño (en base a la agresividad de la carga).

3.2.4.3. Configuración de Ejes:

Se necesita una serie de elementos de datos para describir las configuraciones de neumáticos y cargas por eje típicas que se aplicarían a la carretera, porque las respuestas del pavimento calculadas son generalmente sensibles tanto a la ubicación de las ruedas y a la interacción entre las distintas ruedas de un eje dado. Estos elementos de datos pueden ser obtenidos directamente de la base de datos de los fabricantes o medidos directamente en el terreno. La Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 proporciona valores típicos para los siguientes elementos:

- Ancho promedio del Eje: La distancia entre dos bordes exteriores de un eje. Para camiones típicos, se puede asumir 8.5 [ft] (259 [cm]) para el ancho del eje.
- Espacio entre neumáticos dobles: La distancia entre los centros de un neumático doble. Espaciado entre neumáticos dobles típico para camiones es 12 [in] (30.48 [cm]).
- Separación de Ejes: La distancia entre dos ejes consecutivos de un tipo de eje doble o triple. La separación promedio de ejes es 51.6 [in] (131 [cm]) para un tipo de eje doble y 49.2 [in] (125 [cm]) para ejes triple.

Estos parámetros son especialmente sensibles para la determinación de las respuestas del pavimento, siendo críticos para el agrietamiento Top – Down.

3.2.4.4. Distancia entre Ejes:

Este parámetro se define como la distancia entre el eje direccional y el eje que le sigue (tracción o apoyo). Cabe notar que este es solo aplicable a camiones tractores o unidades pesadas (Clase 8 a la 13). Este parámetro es de importancia para el cálculo del Agrietamiento Top – Down (de arriba hacia abajo), siendo muy necesaria su caracterización con datos de pesaje (Iturriaga, 2014). En todo caso la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 recomienda usar los valores por defecto en caso de no contar con valores específicos.

3.2.4.5. Dimensiones y presión de inflado del neumático:

La Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 asume una presión constante de los neumáticos para todas las condiciones de carga que representan las condiciones de operación (presión de inflado en caliente o altas temperaturas). Se recomienda utilizar un valor de 0.83 [MPa] (120 [psi]) a menos que las presiones de inflado en caliente sean conocidas a partir de estudios anteriores o se simule una condición especial de carga. La presión de inflado de los neumáticos tiene un efecto nocivo sobre la estructura del pavimento flexible. Deterioros como el Ahuellamiento y el Agrietamiento por fatiga pueden agravarse dependiendo de las configuraciones de presión que tengan los vehículos de carga

que los transiten. Presiones muy altas o bajas pueden agravar el estado de aquellas vías que ya se encuentren deterioradas por cargas y paso vehicular excesivos, o comenzar a deteriorar las estructuras a edades tempranas debido a la combinación de los parámetros ya mencionados (Allen & Sibaja, 2014; Wang, 2005). Sin embargo, no existen estudios relacionados con el efecto de la presión de inflado en los pavimentos rígidos.

3.2.4.6. Ubicación media de la rueda:

Este parámetro corresponde a la distancia comprendida entre el borde externo de la rueda y el borde interior de la línea de demarcación del pavimento.

Este dato de entrada es muy importante en el cálculo del daño por fatiga y es muy sensible al Agrietamiento transversal en JPCP. Según la posición media de la rueda, el agrietamiento de losa puede variar por un factor de 4 o más. Las conclusiones y efectos respecto a este parámetro se indicarán junto con el parámetro “Desviación Estándar de la ubicación de la rueda” descrito a continuación.

3.2.4.7. Desviación Estándar de la ubicación de la rueda:

Este parámetro se utiliza para determinar el número de repeticiones de un eje sobre un punto, a fin de predecir los deterioros y el desempeño del pavimento. La Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 supone una desviación lateral constante para todos los camiones. El valor por defecto incluido en la GEMDP AASHTO 2008 es de 10 [in] (25.4 [cm]), independiente del ancho de la pista.

Estudios hechos al respecto (Páez, 2011; Constanzo, 2011; Cisternas, 2012) para distintos trazados en planta y distintas clasificaciones de vías concluyen que, en vista de los resultados obtenidos, existe una fuerte incidencia en el deterioro, y, por lo tanto, en el diseño de los pavimentos rígidos, en función del desplazamiento lateral del tráfico (“Ubicación media de la rueda” y “Desviación Estándar de la ubicación de la rueda”). En las mediciones realizadas en ambos estudios, se obtuvieron valores de desplazamiento lateral menores a los sugeridos por defecto en la GEMDP AASHTO 2008. Esta diferencia de hasta 9 [cm], implicaría un fuerte impacto en los deterioros generados en el pavimento, tanto en magnitud como en el avance de estos, traduciéndose en un aumento de los espesores requeridos para la verificación del diseño.

Dadas estas grandes diferencias es que se sugiere realizar un programa de mediciones en distintas rutas y configuraciones, con el fin de obtener una amplia matriz de factores de incidencia en el desplazamiento lateral y obtener los valores de la realidad chilena.

El grupo de parámetros (Datos de entrada generales del tráfico), al igual que los otros grupos mencionados anteriormente, es de suma importancia dada la fuerte incidencia que tienen en el deterioro de los pavimentos rígidos, exceptuando la presión de inflado que es uno de los parámetros más importantes para el diseño de pavimentos flexibles. El Volumen 3 del Manual de Carreteras solo toma en cuenta el Factor de Ajuste por Tipo de Berma, pero así solo este factor no explota su total potencial relacionado con las fallas

debido a que parámetros como Distancia entre Ejes, Ubicación media de la rueda, etc., no son requeridos por dicho Volumen.

3.3. COMENTARIOS

Dentro del gran número de factores que se consideran para el análisis y diseño de pavimentos utilizando la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos, el tránsito de vehículos es uno de los más importantes. Su caracterización adecuada es fundamental para poder concebir estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad. La importancia del tránsito vehicular es exponencialmente mayor en vías de alto tráfico, como sucede en las carreteras troncales del territorio nacional, dado que la infraestructura vial reviste una enorme importancia para el desarrollo económico del país.

Teniendo en cuenta los parámetros expuestos anteriormente, se recomienda que a futuro es necesario realizar mayores investigaciones, estudios y mediciones respecto a los espectros de carga. Esto es, generar, correctamente, espectros de carga para cada plaza de pesaje y vía interurbana de gran importancia en el país. Análisis de sensibilidad realizados (Iturriaga 2014) en distintas plazas de pesaje distribuidas a lo largo del país, demostraron que, por ejemplo, el agrietamiento transversal es ampliamente mayor en las estaciones WIM (vía urbana) que en las plazas de pesaje (vías interurbanas), demostrando que, aun manteniendo los ejes equivalentes constantes, el agrietamiento transversal es altamente sensible a los espectros de carga. Se puede concluir, además, que los espectros de carga en las estaciones WIM son más agresivos que en las plazas de pesaje (mayor porcentaje de ejes supera el límite máximo establecido), esto debido a que los conductores desconocen que tienen control al pasar por una WIM, que es lo contrario a lo que ocurre en una plaza de pesaje en donde se está sujeto a multas.

Pero no solo el espectro de carga es necesario estudiar y caracterizar. A pesar de ser este el más sensible dentro los nuevos parámetros que requiere la GEMDP AASHTO 2008, existen otros parámetros, referidos al tráfico, que también son muy importantes y sensibles a la hora de diseñar, tal como se describió en la sección 3.2.

Los modelos de desempeño de la GEMDP AASHTO 2008 relacionan distintas variables y parámetros de forma secuencial para llegar así a un cierto nivel de deterioro. Para identificar la relación entre variables y parámetros se formularon diagramas de causalidad que permiten observar la influencia de los parámetros y variables de entrada en cada uno de los indicadores de desempeño considerados en el método. El análisis de los diagramas de causalidad considera la influencia de las tensiones y deformaciones de las capas estructurales en los modelos de desempeño, lo cual refleja el enfoque teórico mecanicista del método.

Los diagramas de causalidad permiten diferenciar las variables y parámetros con influencia directa de aquellos con influencia indirecta a través de una variable intermedia o modelo de desempeño.

La tabla mostrada a continuación, clasifica las variables y parámetros de entrada según el grado de influencia en el modelo de desempeño. Una variable con influencia directa es aquella que está presente en la ecuación del modelo y es indirecta si se relaciona a través del cálculo de otras variables.

Criterio de Desempeño			
Variables de entrada	**Agrietamiento transversal**	**Escalonamiento**	**IRI**
Información de tráfico	●	○	○

Tabla 3.3-1: Nivel de influencia de las variables

●	Influencia directa
○	Influencia indirecta

Tabla 3.3-2: Leyenda Tabla 3.3-1

De la tabla anterior, se concluye que el modelo de Agrietamiento transversal depende directamente de la información de tráfico y el Escalonamiento e IRI depende indirectamente de esta información.

A continuación, una sensibilización cualitativa en base a análisis propios y resultados de otras memorias (Iturriaga 2014, Núñez 2013) de los parámetros mencionados anteriormente respecto al diseño de pavimentos rígidos.

Parámetro	Agrietamiento transversal	Escalonamiento	IRI
TMDAC	MS	MS	MS
Número de pistas en la dirección de diseño	S	S	S
Porcentaje de camiones en la dirección de diseño	S	S	S
Porcentaje de camiones en la pista de diseño	S	S	S
Velocidad operacional del vehículo (Camiones)	NS	NS	NS
Factores de ajuste mensual (FAM)	S	S	S
Distribución de Clase Vehicular	S	S	S
Factores de distribución horaria (FDH)	S	S	S
Factor de crecimiento del tráfico pesado	S	S	S
Espectros de carga	MS	MS	MS
Ancho de la pista de Diseño	S	S	BS
Número de Tipos de Eje por Clase de Camión	MS	S	S
Configuración de Ejes	MS	S	S
Distancia entre Ejes	MS	BS	BS
Dimensiones y presión de inflado del neumático	NS	NS	NS
Ubicación media de la rueda	MS	BS	BS
Desviación Estándar de la ubicación de la rueda	MS	BS	BS

Leyenda: NS = No Sensible, BS = Baja Sensibilidad, S = Sensible, MS = Muy sensible

Como se observa en la tabla cualitativa mostrada anteriormente, los parámetros referidos al tránsito requeridos por la GEMDP AASHTO 2008 son sumamente importantes en los criterios de desempeño y por ende en el diseño de pavimentos rígidos nuevos. Esto, nuevamente, refuerza la necesidad de realizar investigaciones futuras para correctamente representar la realidad chilena y obtener un diseño de pavimentos eficiente.

Un beneficio adicional importante del enfoque mecanicista incluido en la GEMDP AASHTO 2008, es que, a diferencia de los procedimientos empíricos, los conceptos son de aplicación general y modular de tal manera que una gama completa de futuras mejoras puede ser desarrolladas e implementadas (por ejemplo, modelo mejorado de escalonamiento, algoritmo mejorado de acumulación de daño, etc.). Estas mejoras se pueden incorporar continuamente en el tiempo. Por lo tanto, el procedimiento no pasará de moda con los cambios en los materiales de construcción, patrones de tráfico, tipos de vehículos o tipos y configuraciones de neumáticos.

4. INFORMACIÓN DE MATERIALES REQUERIDA EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Tanto la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos como el Manual de Carreteras Volumen 3, requieren datos de Materiales específicos para el diseño de estructuras de pavimentos rígidos.

A continuación, se presentará el detalle de cada uno de estos parámetros, la comparación y la importancia de ellos en el diseño estructural del pavimento rígido y en los distintos criterios de falla.

4.2. MATERIALES

Una estructuración comúnmente usada en Chile para pavimentos rígidos considera una losa de hormigón, una base granular y la subrasante, tal como se muestra en la figura siguiente:

Figura 4.2-1: Estructura común de un pavimento rígido

Dentro los factores necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso (nivel definido en función de los criterios de desempeño que se establezcan, por lo que colapso se entiende como valores que sobrepasan los niveles establecidos al principio del diseño) durante su vida en servicio, se encuentran las distintas propiedades de los materiales del pavimento y del suelo de fundación. La correcta caracterización de estos parámetros conllevará a un diseño estructural adecuado.

A continuación, se presentará el detalle de cada uno de los parámetros requeridos para el diseño de pavimentos rígidos relacionados con los materiales, siguiendo el lineamiento del Volumen 3 del Manual de Carreteras (Sección Pavimentos Rígidos).

4.2.1. HORMIGÓN

4.2.1.1. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN (MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 3):

El Volumen 3 del Manual de Carreteras requiere los siguientes parámetros agrupados en las categorías: (i) Propiedades Generales y (ii) Propiedades Mecánicas del Hormigón.

- Propiedades Generales del hormigón:
  - Razón de Poisson: Es una constante elástica adimensional que expresa la relación entre la deformación unitaria en sentido transversal que sufre el hormigón respecto a la deformación unitaria en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo. El Volumen 3 del Manual de Carreteras no da una mayor descripción respecto a este parámetro y solo indica que debe tomarse un valor de $\mu = 0.15$ salvo casos especiales.

- Propiedades Mecánicas del hormigón:
  - Módulo de Elasticidad [MPa]: Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del hormigón. El Volumen 3 del Manual de Carreteras indica un valor para hormigones de características normales o presenta una relación para hallarlo.
  - Módulo de Ruptura [MPa]: Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del hormigón por flexión. El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios. El Volumen 3 del Manual de Carreteras proporciona una tabla donde, en función de la vía, recomienda valores para dicho parámetro, aunque da la posibilidad de si es calculado, usar ese valor.

Como se puede observar, los datos requeridos por el Volumen 3 del Manual de Carreteras, referidos al hormigón, son limitados para realizar una caracterización completa del comportamiento del hormigón bajo distintas solicitaciones ambientales y de tráfico que permita obtener un diseño estructural confiable.

4.2.1.2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN (GUÍA EMPÍRICO – MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS GEMDP AASHTO 2008):

Por otro lado, tenemos la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, la cual exige el ingreso de una gran cantidad de variables asociadas al hormigón, necesarias por los principios mecanicistas incorporados, que integran en el diseño el comportamiento de los materiales, los efectos climáticos y cargas del tránsito, durante el transcurso del tiempo.

Las propiedades del hormigón requeridas por la GEMDP AASHTO 2008 se clasifican en 4 categorías: (i) Propiedades Generales, (ii) Propiedades Térmicas, (iii) Propiedades de las Mezclas y (iv) Propiedades Mecánicas del Hormigón.

- Propiedades Generales del hormigón:
  - Peso unitario ([kg/m^3], [lb/ft^3]): Corresponde a la densidad del hormigón, la cual depende de la cantidad y densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido), o intencionalmente incluido, y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta de cemento (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad.
  - Razón de Poisson: Es un input requerido para los modelos computacionales de respuesta estructural del pavimento, aunque su efecto en la respuesta del pavimento no es muy grande. Por lo especificado anteriormente, es raramente medido y a menudo su valor se asume, pudiendo ingresar dicho valor en el software de la GEMDP AASHTO 2008.

- Propiedades térmicas:
  Estos parámetros definen el comportamiento del pavimento ante los efectos climáticos y los fenómenos inherentes del material luego de su colocación y posterior endurecimiento, como lo es el alabeo. Se especifican los siguientes parámetros:
  - Coeficiente de Expansión Térmica ([10^{-6}/°C], [10^{-6}/°F]): El Coeficiente de Expansión Térmica (α_{PCC}) es definido como la tasa de cambio de longitud debido al incremento o descenso en un grado de temperatura en el hormigón.
    Este parámetro es altamente influenciado por el tipo de agregado, el contenido de pasta endurecida y otros factores de la mezcla de hormigón como el contenido de humedad, porosidad y grado de hidratación de la pasta. Sin embargo, el principal efecto corresponde a los agregados, los cuales forman entre el 70 y el 80% de la mezcla.
    Determinar con precisión el Coeficiente de Expansión Térmica es muy importante en el Diseño Empírico – Mecanicista para todo tipo de hormigón, debido a:
    - La magnitud de los esfuerzos de alabeo térmico (causados por la diferencia de temperatura a través del espesor de la losa) es muy sensible al α_{PCC}. Bajo ciertas condiciones de exposición, los esfuerzos de alabeo térmico pueden comprender un 50% o más del esfuerzo crítico experimentado por una losa de pavimento cargada y por lo tanto afecta en gran medida el agrietamiento de losas. Así, el Coeficiente de Expansión Térmica juega un importante rol en la optimización del diseño de juntas, en el cálculo de las tensiones del pavimento y en la determinación de la transferencia de carga en juntas y grietas a través de la vida de diseño.
    - Es un factor importante en el diseño de junta de sellante y en la selección de materiales de sellado.
    - El α_{PCC} es también crítico ya que afecta en la separación de las fisuras.

- Conductividad térmica ([J/s-cm-°C], [BTU/h-ft-°F]): Se define como la cantidad de calor que fluye normalmente a través de una superficie de área unitaria por unidad de tiempo y por unidad de gradiente de temperatura.
  En la GEMDP AASHTO 2008, la Conductividad Térmica es uno de los parámetros fundamentales que se necesita para determinar el perfil de temperaturas en la losa de hormigón, lo cual se desarrolla mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado, EICM (Enhanced Integrated Climatic Model).
- Capacidad Calorífica ([J/kg-°C], [BTU/lb-°F]): Se define como la cantidad de energía calorífica que se le debe suministrar a una masa unitaria de hormigón para aumentar una unidad de temperatura. Indica, en otros términos, la mayor o menor dificultad que presenta el hormigón para experimentar cambios en la temperatura bajo el suministro de calor.
  Tal como se mencionó anteriormente para la Conductividad Térmica, la Capacidad Calorífica igual es uno de los parámetros de ingreso indispensable para determinar el perfil de temperatura a través de la losa de hormigón mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM).
- Absorción Superficial de Ondas Cortas: La Absorción Superficial de Ondas Cortas de una capa de hormigón, depende de su composición, color y textura. Esta cantidad se correlaciona directamente con la cantidad de energía solar disponible, que es absorbida por la superficie del pavimento. Generalmente hablando, las superficies más ligeras y más reflectivas, tienden a absorber una cantidad de onda corta más baja, y viceversa.
  Este parámetro también es uno de los inputs de ingreso en el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM) para determinar el perfil de temperatura en el espesor de la losa de hormigón.

- Propiedades de la Mezcla:
  - Tipo de cemento: Dado que la GEMDP AASHTO 2008 fue desarrollada en Estados Unidos, solo permite el ingreso de los tipos de cementos que se utilizan en ese país, clasificándose de la siguiente manera:
    - Tipo I: Corresponde a un Cemento Portland ordinario.
    - Tipo II: Cemento de resistencia moderada a los sulfatos. Destinado a obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiere un moderado calor de hidratación.
    - Tipo III: Cemento de alta resistencia inicial, apropiado cuando se requiere la rápida puesta en servicio de la obra.

    En cambio, en Chile poseemos cementos de diferentes orígenes y composición que los norteamericanos, los cuales se especifican en la norma NCh148 y se dividen en 5 clases de acuerdo al tipo y componentes, pero además pueden clasificarse por la resistencia en 2 grados (Corriente y de Alta Resistencia).
    En consecuencia, la clasificación de hormigones chilenos no es comparable con la norteamericana, lo cual representa un inconveniente para el ingreso de los datos a la GEMDP AASHTO 2008, haciendo necesario encontrar una equivalencia para poder aprovechar los beneficios de la GEMDP AASHTO 2008 al máximo.
  - Contenido de Cemento ([kg/m^3], [lb/yd^3]): Como el nombre lo dice, se refiere a la cantidad de cemento por unidad de volumen, este valor se obtiene de la dosificación del hormigón que se va a utilizar.

Respecto a la dosis de cemento, está suficientemente demostrado que a igualdad de relación agua/cemento, las mezclas con menores dosis permiten lograr mejores resistencias mecánicas, siempre y cuando exista pasta suficiente para rodear y unir todos los granos del agregado inerte. Este fenómeno, si bien tiene solo una importancia secundaria en el desarrollo de las resistencias, se hace especialmente evidente en mezclas excesivas en cemento.

La mayor cantidad de agua libre existente en las mezclas con mayores dosis de cemento sería la responsable de las menores resistencias logradas, debido a que al evaporarse aumenta el volumen de poros y se produce una modificación en la compacidad del hormigón afectando la resistencia mecánica y la retracción última.

- Razón Agua/Cemento: Cociente que expresa la relación que existe entre el peso del agua efectiva utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Este parámetro es muy importante ya que se encuentra directamente relacionado con la resistencia del hormigón, obteniéndose mayores resistencias para relaciones agua/cemento bajas y menores resistencias para relaciones altas. Sin embargo, no se pueden utilizar relaciones muy bajas debido a que no se obtiene una trabajabilidad y compacidad adecuada en el hormigón.

  Se considera como agua efectiva, para el cálculo de la relación agua/cemento, la que ocupa los espacios fuera de las partículas de agregados, es decir el agua total agregada a la mezcla menos el agua necesaria para saturar los poros abiertos que contienen los áridos utilizados, lo que se conoce como agua de amansado con áridos en condición saturada superficialmente seca. El no considerar el agua que satura los poros del agregado como agua efectiva o agua de la relación agua/cemento, se debe al hecho que esta agua no modifica, al evaporarse, la compacidad del hormigón y consecuentemente no afecta las resistencias mecánicas ni la retracción hidráulica.
- Tipo de Agregado: El hormigón es un material compuesto, además de pasta de cemento, de áridos de distintas dimensiones, normalmente clasificados según su tamaño, en grava, gravilla y arena, que conforman su esqueleto interno y que determinan en buena medida sus propiedades físicas y mecánicas.

  La importancia de los agregados también se fundamenta en que estos resisten los cambios volumétricos que se originan por las contracciones plásticas, resisten los cambios volumétricos por secado; por lo que resulta evidente que el módulo elástico de los áridos utilizados determina, en buena medida, la elasticidad del hormigón resultante, lo que afecta los valores máximos de fluencia bajo carga estática permanente y los valores de retracción hidráulica potencial. En este contexto, el uso de áridos más rígidos, permite confeccionar hormigones con menores valores de retracción. Además, el Coeficiente de Expansión Térmica del hormigón depende en gran medida del coeficiente del agregado utilizado debido a su gran proporción dentro de la mezcla.

  La GEMDP AASHTO 2008 considera los siguientes 9 tipos de agregados: riolita, cuarcita, caliza, dolomita, granito, basalto, silexita, gabro y sienita.
- Temperatura de Esfuerzo Cero ([°C], [°F]): Se define como la temperatura, después de la colocación y durante el proceso de curado, a la cual la losa de hormigón no exhibe esfuerzos térmicos. Si la temperatura es inferior a la temperatura de esfuerzo cero, se producen en la losa esfuerzos de tracción.

En realidad, la temperatura de esfuerzo cero no es una única temperatura, sino que varía en todo el espesor de la losa (gradiente térmico de esfuerzo cero). Sin embargo, cuando se hace referencia a la temperatura esfuerzo cero, se considera como la temperatura media de la losa. Esta temperatura puede estimarse a partir de la temperatura ambiente mensual y el contenido de cemento de la mezcla.

- Retracción Reversible: La retracción puede ser en gran medida un fenómeno reversible, si se utilizan métodos de curado adecuados, por ejemplo, la saturación después de la retracción que dilatará casi a su volumen original a la estructura. Se pueden usar así mismo, aditivos químicos que crean capas impermeables que evitan las pérdidas de humedad.
- Tiempo en desarrollarse el 50% de la retracción última (días): Como el nombre lo indica se refiere al número de días en desarrollarse el 50% de la retracción última.
- Método de Curado: Al mezclar cemento Portland con agua, se lleva a cabo una reacción química denominada hidratación. El grado hasta el cual esta reacción se llegue a completar influye considerablemente en la resistencia, la durabilidad y densidad del hormigón.

  Entonces, el curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y temperatura satisfactorios en el hormigón durante un periodo definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito de que se desarrolle la hidratación correctamente y, por lo tanto, se desarrollen las propiedades deseadas. Un curado inadecuado provoca la pérdida de agua en la mezcla, provocando que la hidratación no se efectúe adecuadamente, con lo cual se favorece el aumento en la retracción plástica. Hoy en día, los métodos de curado más comunes en obras de pavimentación son el curado húmedo y el curado seco.

  La GEMDP AASHTO 2008 posee 2 opciones para especificar el método de curado que se está usando, húmedo o con compuesto de curado.

- Propiedades Mecánicas del Hormigón:
  - Módulo de Elasticidad ([MPa], [psi]): En estricto rigor, el comportamiento esfuerzo – deformación del hormigón es no lineal e inelástico dada su naturaleza heterogénea y los micro agrietamientos en la pasta de cemento y entre los agregados debido a un aumento en el nivel de la carga. Sin embargo, se asume un comportamiento lineal para niveles de carga bajos que produzcan esfuerzos menores del 50% de la resistencia última y deformaciones unitarias menores a las 1000 millonésimas (με) en compresión. La razón entre el esfuerzo y deformación en el rango lineal es lo que se define como módulo de elasticidad. Dicha constante elástica es un parámetro complejo que es influenciado significativamente por los parámetros de diseño de la mezcla, los cuales se nombran a continuación:
    - Relación agua/cemento
    - Tipo de agregado
    - Relación entre la pasta de cemento y agregado

    Además, el módulo de elasticidad va a depender de factores relacionados al modo en que se realiza el ensayo, por ejemplo, el tamaño de la muestra de prueba, el método de ensayo o cálculo (por ejemplo, estático vs dinámico, módulo de cuerda vs módulo secante), la tasa de aplicación de la carga, el grado de saturación de la probeta durante el ensayo y la temperatura. Por

ejemplo, el módulo elástico del hormigón aumenta a medida que aumenta el grado de saturación y la tasa de carga. Estos efectos también implican que la respuesta del pavimento varía de forma significativa en condiciones de servicio.

Dado el carácter empírico – mecanicista de la GEMDP AASHTO 2008, el módulo elástico es un parámetro clave para relacionar los esfuerzos con las deformaciones en el análisis tensional de los pavimentos. Además, cabe mencionar que, a través del valor o los valores de módulo de elasticidad ingresados o estimados por la GEMDP AASHTO 2008, dependiendo del nivel jerárquico adoptado, se desarrolla una curva de ganancia de rigidez la cual es considerada en el diseño.

- Módulo de Ruptura ([MPa], [psi]): La resistencia a la flexión o módulo de ruptura puede ser definida como el máximo esfuerzo de tensión que provoca la rotura en la parte inferior de la viga simplemente apoyada durante un ensayo de flexión con carga en 3 o 4 puntos. La resistencia a la flexotracción está fuertemente influenciada por los siguientes parámetros de diseño de la mezcla.
  - Componentes de la mezcla
    a. Tipo de cemento.
    b. Contenido de cemento.
    c. Presencia y tipos de aditivos minerales.
    d. Relación de agua y materiales de cemento.
    e. Propiedad de los agregados.
  - Curado
  - Edad.
  - Condiciones de prueba, método y equipamiento.

  El Módulo de Ruptura tiene un efecto significante sobre el potencial agrietamiento por fatiga de la losa, por lo tanto, este parámetro debe ser caracterizado con cuidado al diseñar un pavimento rígido. Además, es importante mencionar que la GEMDP AASHTO 2008 desarrolla una curva de ganancia de resistencia a la flexotracción a partir del valor o los valores de módulo de ruptura ingresados, la cual es considerada en el análisis incremental durante el diseño de los pavimentos rígidos.
- Resistencia a la Compresión Cilíndrica ([MPa], [psi]): Resistencia máxima que soporta una probeta cilíndrica de dimensiones normalizadas y condiciones controladas de humedad, llevada hasta la rotura mediante cargas incrementales a una velocidad constante. Este parámetro solo es ocupado por la GEMDP AASHTO 2008 para estimar la resistencia a la flexotracción y/o el módulo de elasticidad mediante relaciones empíricas cuando no se tengan mediciones hechas en el laboratorio de dichos parámetros.

Como se puede observar, la cantidad de parámetros referidos al Hormigón que requiere la GEMDP AASHTO 2008 respecto al Volumen 3 del Manual de Carreteras es totalmente distinta, requiriendo 17 parámetros[53] versus 3 del método actual[54].

[53] Peso unitario, Razón de Poisson, Coeficiente de Expansión Térmica, Conductividad térmica, Capacidad Calorífica, Absorción Superficial de Ondas Cortas, Tipo de Cemento, Contenido de Cemento, Razón Agua/Cemento, Tipo de Agregado, Temperatura de Esfuerzo Cero, Retracción Reversible, Tiempo en desarrollarse el 50% de la retracción última, Método de Curado, Módulo de Elasticidad, Módulo de Ruptura y Resistencia a la Compresión Cilíndrica.

[54] Razón de Poisson, Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura.

Esta cantidad de datos son requeridos para el cálculo de las respuestas críticas del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y utiliza estas respuestas para calcular el incremento de daño a través del tiempo. Dichas respuestas del pavimento necesitan la mayor cantidad de datos para que de esta manera se pueda representar lo más fielmente posible la realidad. Sin embargo, algunos de estos parámetros son más sensibles que otros, y determinar su incidencia en los diseños para las condiciones de clima y tráfico chilenos es una tarea relevante que se aborda en la presente memoria.

Dada la cultura de diseño que se tiene actualmente en el país, poder recopilar toda la información requerida por la GEMDP AASHTO 2008, es una tarea no menor, pero que conlleva un beneficio tangible a la hora de diseñar pavimentos.

4.2.2. SUB-RASANTE Y BASE

Además de los parámetros del hormigón, los parámetros de la sub-rasante y la base son también necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso (explicado anteriormente) durante su vida en servicio.

4.2.2.1. PROPIEDADES DE LA SUB-RASANTE Y BASE (MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 3):

El Volumen 3 del Manual de Carreteras requiere los siguientes parámetros:

- Módulo de Reacción de la sub-rasante: El módulo de reacción de la sub-rasante, k ([MPa/m]), es el parámetro que se utiliza para caracterizar la capacidad de soporte de la sub-rasante. Muchas veces a la denominación se agrega la palabra “efectivo” para indicar que se está utilizando un valor medio compensado que toma en consideración las eventuales variaciones estacionales que, en ciertas circunstancias experimenta este parámetro a lo largo del año. En todo caso, se recomienda incluir esa consideración sólo cuando se prevea una penetración de la helada importante en suelos heladizos. En la versión del año 1986-93 del método AASHTO, el valor de este parámetro se debía deducir a partir del Módulo Resiliente (M_R)[55], pero en la nueva versión del año 1998, se retorna a determinarlo con ensayes con una placa cargada o se propone determinarlo en forma indirecta a partir de otros ensayes.
  El Volumen 3 del Manual de Carreteras especifica distintos métodos para hallar el valor de k, el que puede ser una función del tipo de suelo (finos, granulares); el CBR (aunque el rango de variación respecto al promedio es del orden de ± 50%); o utilizando Ensayes con Placa de Carga.
  Dado que sobre la sub-rasante se construirá la base y el pavimento de hormigón, caracterizar los suelos de la mejor manera posible es crucial para evitar posteriores mantenimientos en la vida temprana de la estructura.
- Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Fricción de la Base: El Volumen 3 del Manual de Carreteras no profundiza en estos dos parámetros y solo proporciona una tabla, la cual incluye valores que permiten estimar el módulo

[55] Manual de Carreteras Volumen 3 Diseño, Edición 2016, 3.603.205

de elasticidad de la base que se utilice y el coeficiente de fricción entre base y pavimento. Esta tabla depende del material que se elija para la base.

4.2.2.2. PROPIEDADES DE LA SUB-RASANTE Y BASE (GUÍA EMPÍRICO – MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS GEMDP AASHTO 2008):

Una vez explicadas las características requeridas por el Volumen 3 del Manual de Carreteras respecto a la sub-rasante y la base, revisamos la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 y las características que el diseñador debe tomar en cuenta para poder realizar el diseño del pavimento. Respecto a la sub-rasante y la base, la GEMDP AASHTO 2008 requiere dos grupos de datos de entrada, (i) Propiedades Físicas y (ii) Propiedades de Ingeniería:

- Propiedades Físicas:
    - Granulometría: La GEMDP AASHTO 2008 recomienda como datos de entrada relativo a este parámetro, el rango medio de las especificaciones del material o la granulometría promedio. Estos valores pueden ser medidos utilizando el ensayo apropiado o utilizar los valores por defecto incluidos en la GEMDP para clasificación del material.
    - Razón de Poisson: Para este parámetro la GEMDP AASHTO 2008 recomienda utilizar los valores por defecto que son provistos por el software, a menos que el diseñador tenga diferentes valores obtenidos de datos de ensayos.
    - Límites de Atterberg: La GEMDP AASHTO 2008 recomienda como valores de entrada, el promedio del rango permitido por las especificaciones del material, o el límite líquido promedio y el Índice de Plasticidad. Estos parámetros son importantes porque servirán para estimar los parámetros que no cuenten con valores específicos de ensayo.
    - Densidad Seca: La GEMDP AASHTO 2008 recomienda utilizar como dato de entrada, la densidad seca máxima definida por las especificaciones del material utilizando el esfuerzo de compactación apropiado.
    - Contenido de Humedad: Respecto a este parámetro, la GEMDP AASHTO 2008 recomienda usar como dato de entrada, el contenido óptimo de humedad, el cual se obtiene utilizando el esfuerzo de compactación apropiado.

- Propiedades de Ingeniería:
    - Módulo Resiliente: La GEMDP AASHTO 2008 requiere como propiedad el módulo elástico denominado Módulo Resiliente. Este módulo es una medida de las propiedades elásticas del suelo, que a pesar de las dificultades que acarrea el hecho de presentar ciertas características no lineales, es un parámetro fundamental para ser utilizado en análisis mecanicistas de sistemas multicapas.

      Dado que el ensaye de laboratorio para determinar el Módulo Resiliente requiere de equipos muy especializados, personal entrenado y consume un tiempo significativo, de manera que en la mayoría de las ocasiones no es posible o no resulta práctico realizar este ensaye, se recurre a estimarlo mediante correlaciones con otros ensayes. Sabiendo esto, la GEMDP

AASHTO 2008 entrega valores por defecto que pueden ser usados en caso de no contar con valores obtenidos en laboratorio o partir de otras propiedades del material.

Cabe resaltar que dichos parámetros requeridos por la GEMDP AASHTO 2008 aplican tanto a la sub-rasante como a la base, o demás capas estructurales que se utilicen para dar soporte a la carpeta de pavimento.

Se puede observar que existe una diferencia entre los parámetros requeridos por el Volumen 3 del Manual de Carreteras y la GEMDP AASHTO 2008 en cuanto a tipo de dato y cantidad. La mayoría de los datos representan las características físicas del material que actualmente no se requieren, pero el principal cambio es el parámetro "Módulo Resiliente".

En la GEMDP AASHTO 2008, el parámetro principal es el Módulo Resiliente y en el Volumen 3 del Manual de Carreteras es el Módulo de Reacción de la sub-rasante k, sin embargo, la GEMDP AASHTO 2008 convierte internamente el Módulo Resiliente para evaluar pavimentos rígidos.

El Módulo Resiliente puede ser medido directamente de laboratorio u obtenido a través del uso de correlaciones de otras propiedades de resistencia de materiales tales como el CBR. Los diferentes niveles de entrada de datos para el módulo resiliente son presentados a continuación[56]:

El ingreso del Módulo Resiliente se puede ingresar al software de la GEMDP AASHTO 2008 de distintas formas

Nivel de jerarquía 1. Pruebas de laboratorio: Los valores del Módulo Resiliente para materiales granulares no ligados, subrasante y lecho de rocas, son determinados de pruebas triaxiales cíclicas preparadas en muestras representativas. Los recomendados métodos de pruebas estándar para los módulos de prueba son:

- NCHRP 1-28A, "Método de prueba armonizado para la determinación del módulo resiliente en el diseño de pavimento flexible."
- AASHTO T 307, "Determinación del módulo resiliente del suelo y de materiales para agregados."

Nivel de jerarquía 2. Correlaciones con otras propiedades de materiales: Las correlaciones generales que describen la relación entre el índice del suelo y las propiedades de resistencia, pueden ser utilizadas en la estimación del Módulo Resiliente. La relación puede ser de forma directa o indirecta. Para la relación indirecta, primero, las propiedades de los materiales son relacionadas al CBR y luego el CBR es relacionado al Módulo Resiliente. Los modelos usados en la GEMDP para la estimación del Módulo Resiliente son presentados en la Tabla 4.2-1[57]. Para el nivel de jerarquía 2, el software de la GEMDP, permite al usuario elegir las siguientes dos opciones:

- El valor de entrada de datos representativa de Módulo Resiliente y la utilización de EICM para ajustarlo por los efectos climáticos estacionales.
- Entrada de datos de Módulo Resiliente para cada mes (estación) del año (un total de 12 meses).

[56] Parte 2, Capítulo 2: Material characterization. Guide for Mechanistic-Empirical Design of Pavement Structures. Página 2.2.66

[57] Parte 2, Capítulo 2: Material characterization. Guide for Mechanistic-Empirical Design of Pavement Structures. Página 2.2.68

Strength/Index Property	Model	Comments	Test Standard
CBR	$M_r = 2555(CBR)^{0.64}$ (TRL) Mr, psi	CBR = California Bearing Ratio, percent	AASHTO T193, "The California Bearing Ratio"
R-value	$M_r = 1155 + 555R$ (*20*) Mr, psi	R = R-value	AASHTO T190, "Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils"
AASHTO layer coefficient	$M_r = 30000\left(\frac{a_i}{0.14}\right)$ (*20*) Mr, psi	a_i = AASHTO layer coefficient	AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures
PI and gradation*	$CBR = \frac{75}{1+0.728(wPI)}$ (see Appendix CC)	wPI = P200*PI P200= percent passing No. 200 sieve size PI = plasticity index, percent	AASHTO T27. "Sieve Analysis of Coarse and Fine Aggregates" AASHTO T90, "Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils"
DCP*	$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$	CBR = California Bearing Ratio, percent DCP =DCP index, mm/blow	ASTM D 6951, "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications"

Tabla 4.2-1: Modelos relacionados al índice de materiales y propiedades de resistencia para Módulo Resiliente

Nivel de jerarquía 3. Valores típicos (basados en calibración): Para la entrada de datos del nivel 3, los valores típicos de Módulo Resiliente presentados en la Tabla 4.2-2 son recomendados. Nótese que para el nivel 3, solamente un valor típico de Modulo resiliente representativo es requerido con un contenido de humedad óptimo. El EICM es usado para modificar el Módulo Resiliente representativo para los efectos estacionales del clima. Los usuarios tienen la opción de especificar que el valor de Módulo Resiliente representativo sea usado sin ser modificado por el clima en el EICM.

Clasificación del material	Rango de valores de M_r, psi.	Valor Típico de M_r, psi.
A-1-a	38,500-42,000	40,000
A-1-b	35,500-40,000	38,000
A-2-4	28,000-37,500	32,000
A-2-5	24,000-33,000	28,000
A-2-6	21,500-31,000	26,000
A-2-7	21,500-28,000	24,000
A-3	24,500-35,500	29,000
A-4	21,500-29,000	24,000
A-5	17,000-25,500	20,000
A-6	13,500-24,000	17,000
A-7-5	8,000-17,500	12,000
A-7-6	5,000-13,500	8,000
CH	5,000-13,500	8,000
MH	8,000-17,500	11,500
CL	13,500-24,000	17,000
ML	17,000-25,500	20,000
SW	28,000-37,500	32,000
SP	24,000-33,000	28,000
SW-SC	21,500-31,000	25,500
SW-SM	24,000-33,000	28,000
SP-SC	21,500-31,000	25,500
SP-SM	24,000-33,000	28,000
SC	21,500-28-000	24,000
SM	28,000-37,500	32,000
GW	39,500-42,000	41,000
GP	35,500-40,000	38,000
GW-GC	28,000-40,000	34,500
GW-GM	35,500-40,500	38,500
GP-GC	28,000-39,000	34,000
GP-GM	31,000-40,000	36,000
GC	24,000-37,500	31,000
GM	33,000-42,000	38,500

Tabla 4.2-2: Valores típicos para el Módulo Resiliente

4.3. NIVEL DE JERARQUÍA

Es importante notar que, en un mismo diseño, tal como se mencionó anteriormente, utilizando la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, se pueden tener parámetros obtenidos mediante diferentes niveles jerárquicos, lo que significa que el nivel jerárquico no se define a nivel de proyecto, más bien individualmente a cada input.

Además, no todos los parámetros del hormigón y del suelo requeridos por la GEMDP AASHTO 2008 poseen los medios para ser ingresados por los niveles 1, 2 o 3, debido a que no tienen un procedimiento bajo norma que permita su obtención mediante un nivel 1 o bien, no existen correlaciones empíricas que permitan su estimación a partir de otras propiedades como lo establece el nivel 2, esto tanto a nivel internacional como nacional.

Respecto a los parámetros requeridos por la GEMDP AASHTO 2008 para el hormigón y el suelo, a continuación, se establecen los valores o procedimientos recomendados por la GEMDP AASHTO 2008 para obtener los parámetros de entrada del hormigón según los diferentes niveles jerárquicos [Parte 2 ARA, 2004].

	Parámetro	Nivel jerárquico
Hormigón	Peso unitario	1 ó 3
	Razón de Poisson	1 ó 3
	Coeficiente de Expansión Térmica	1, 2 ó 3
	Conductividad Térmica	1 ó 3
	Capacidad Calorífica	1 ó 3
	Absorción superficial de ondas cortas	0.85 (A menos que se disponga de información mas confiable)
	Temperatura de cero esfuerzo	1 ó 2
	Retracción última	1 ó 2
	Retracción reversible	50% (A menos que se disponga de información mas confiable)
	Tiempo requerido para desarrollar el 50% de la contracción última	35 días (A menos que se disponga de información mas confiable)
	Módulo de Ruptura	1, 2 ó 3
	Módulo de Elasticidad	1, 2 ó 3
	Tipo de Cemento	Indiferentes al nivel de entrada
	Contenido de Cemento	
	Relación Agua/Cemento	
	Tipo de Agregado	
	Método de Curado	
Sub-rasante y Base	Módulo Resiliente	2 ó 3
	Densidad Seca Máxima	2 ó 3
	Contenido de Humedad	2 ó 3
	Límites de Atterberg	1 ó 3
	Razón de Poisson	1 ó 3

Tabla 4.3-1: Nivel jerárquico de los parámetros necesarios para caracterizar los Materiales

Como se puede observar, no todos los parámetros requeridos tienen el mismo nivel de entrada, lo que le da al diseñador una mayor flexibilidad, teniendo en cuenta que no todas las agencias tienen los mismos recursos ni mismo grado de importancia de proyecto.

4.4. COMENTARIOS

Del análisis realizado entre el método de diseño del Volumen 3 del Manual de Carreteras y el nuevo método de diseño propuesto por la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 podemos concluir que, si bien la GEMDP AASHTO 2008 requiere de una gran cantidad de parámetros de entrada referentes al hormigón, las propiedades mecánicas y las propiedades térmicas resultan ser las variables más relevantes debido a la influencia y sensibilidad que poseen durante el diseño de los pavimentos rígidos. Entre las propiedades destacadas se encuentran el Módulo de Ruptura, el Módulo de Elasticidad y el Coeficiente de Expansión Térmica por ser parámetros que además de lo mencionado anteriormente, suelen tener mucha variabilidad debido a que dependen considerablemente de las características de los materiales que conforman la mezcla; por lo tanto, se recomienda que sean estimados mediante pruebas de laboratorio que aporten confiabilidad al valor utilizado.

A la luz de la calibración ya realizada en Chile para el diseño de pavimentos de hormigón utilizando la GEMDP AASHTO 2008 (Delgadillo et. al, 2014) y la recalibración posterior (Moraga, 2015), se hace relevante determinar la sensibilidad de los diseños de pavimentos ante los distintos parámetros de materiales requeridos por la GEMDP AASHTO 2008, considerando la información climática de Chile, el tráfico chileno y la calibración chilena de los modelos de deterioro. Este es uno de los objetivos principales de la presente memoria.

5. VALORES BASE Y RANGO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES (HORMIGÓN, BASE Y SUB-RASANTE) EN LA GUÍA EMPÍRICO-MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS.

5.1. INTRODUCCIÓN

Para conocer la influencia de cada uno de los parámetros necesarios para la caracterización correcta de los materiales de acuerdo a la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, se realizará un análisis de sensibilidad utilizando el software de la GEMDP AASHTO 2008. Este análisis de sensibilidad utilizará datos que se manejan en la realidad chilena, para de esta manera obtener resultados lo más cercanos a lo que los diseñadores deben enfrentar día a día, y observar el efecto en los tres criterios de falla mencionados anteriormente: IRI, Escalonamiento y Agrietamiento transversal.

El análisis de sensibilidad consiste en ir modificando parámetros mientras alguno se mantiene constante. Es bien sabido que hay parámetros que al variar también influyen en otros, y que, por ende, son interdependientes, sin embargo, dado el carácter teórico de esta memoria, esas situaciones no serán contempladas. A continuación, se presentará el valor base y rango de valores de cada uno de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad.

Existen diversas investigaciones previas en sensibilización de distintos parámetros de diseño en la GEMDP AASHTO 2008 (Tanesi et al. (2007)[58], Buch et al. (2008)[59], Ceylan et al. (2009), Haider et al. (2009)[60], Hiller and Roesler (2009)[61], Kampmann (2008)[62], McCracken et al. (2009)[63], Oh and Fernando (2008)[64], Puertas (2008)[65], Tran et. al. (2008)[66], Moon (2009)[67], Johanneck and Khazanovich (2010)[68] y Elzo et al. (2014)). El aporte de la presente memoria es realizar una sensibilización para los parámetros de materiales que es específica para las condiciones de clima y tráfico chilenas.

5.2. PARÁMETROS

Los parámetros, que se refieren al hormigón, considerados en el desarrollo del análisis de sensibilidad son los siguientes:

---

[58] Effect of Coefficient of Thermal Expansion Test Variability on Concrete Pavement Performance as Predicted by Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, Transportation Research Record Journal, Tanesi et al., 2007

[59] Evaluation of the 1-37A Design Process for New and Rehabilitated JPCP and HMA Pavements Final Report, The Michigan Department of Transportation, Buch et al., 2008

[60] Evaluation of M-E PDG for Rigid Pavements—Incorporating the State-of-the-Practice in Michigan, 9th International Conference on Concrete Pavements, Haider et al., 2009

[61] Comparison of Mechanistic-Empirical Thickness Design Methods and Predicted Critical Fatigue Locations, 9th International Conference on Concrete Pavements, Hiller and Roesler, 2009

[62] Engineering Properties of Florida Concrete Mixes for Implementing the AASHTO Recommended Mechanistic Empirical Rigid Pavement Design Guide, M.S. Thesis, Kampmann, 2008

[63] Effect of the MEPDG Hierarchical Levels on the Predicted Performance of a Jointed Plain Concrete Pavement, 9th International Conference on Concrete Pavement, McCracken et al., 2009

[64] Development of thickness design tables based on the M-E PDG, Texas Transportation Institute, Oh and Fernando, 2008

[65] Evaluating the JPCP Cracking model of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, M.S. Thesis, Puertas, 2008

[66] Coefficient of Thermal Expansion of Concrete Materials: Characterization to Support Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Transportation Research Record Journal, Tran et al., 2008

[67] Evaluation of MEPDG with TxDOT Rigid Pavement Database, FHWA/TX-09/0-5445-3, Moon, 2009

[68] Comprehensive Evaluation of Effect of Climate in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Predictions, Transportation Research Record Journal, Johanneck and Khazanovich, 2010

- Peso unitario
- Razón de Poisson
- Conductividad térmica
- Capacidad calorífica
- Absorción superficial de ondas cortas
- Coeficiente de Expansión Térmica
- Contenido de Cemento
- Razón Agua/Cemento
- Temperatura de Esfuerzo Cero
- Retracción Reversible
- Módulo de Elasticidad
- Módulo de Ruptura
- Resistencia a la Compresión Cilíndrica

Estos 13 parámetros son los que se modificarán, mientras los otros parámetros necesarios para caracterizar tanto el tráfico, clima y estructuras se mantendrán constantes.

Los parámetros antes mencionados (13 parámetros) corresponden a una parte del total de los parámetros que requiere el software de la GEMDP AASHTO 2008. En total, este software, requiere 17 parámetros referidos a las propiedades de los materiales de un pavimento de hormigón nuevo. En un estudio realizado por mi persona, previo a esta memoria, se analizó la sensibilidad de los 17 parámetros respecto a los 3 criterios de desempeño utilizados y se determinó que 4 de ellos o presentaban una sensibilidad nula en el diseño del pavimento o tienen un carácter físico que no permite sensibilizar o directamente no aplica al estudio.

Por consecuencia de lo anterior y teniendo en cuenta las investigaciones previas donde los parámetros elegidos en esta memoria se encuentran entre los más importantes y sensibles, se decide analizar y sensibilizar solo dichos parámetros.

5.3. CONSIDERACIONES INICIALES

A continuación, se presentan los parámetros de entrada, y los valores considerados, requeridos por el software AASHTOWare Pavement ME Design (Software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008) en su versión 2.2.

Esta versión ha sido utilizada para realizar las distintas corridas con las combinaciones de parámetros que más adelante se presentarán.

Los siguientes parámetros de entrada permanecerán constantes durante todo el análisis debido a que representan las características tanto geométricas como físicas de los vehículos (pesados) que circulan actualmente en Chile. Estos parámetros han sido validados en distintas memorias de la Universidad Técnica Federico Santa María (Cisternas 2011, Villalobos 2013, Núñez 2013, Juárez 2014 e Iturriaga, 2014). Dentro estos parámetros también existen algunos que se dejan por defecto debido a que no existen similares en Chile.

Parámetro	Valor	Unidad
Ubicación media de la rueda	46	[cm]
Desviación estándar del Desplazamiento Lateral del Tránsito	254	[cm]
Ancho de pista de diseño[69]	3.66	[m]
Ancho promedio de ejes	2.6	[m]
Espaciamiento entre ruedas dobles	305	[cm]
Presión de inflado	830	[kPa]
Espaciamiento entre ejes dobles	1.31	[m]
Espaciamiento entre ejes triples	1.25	[m]
Espaciamiento entre ejes quad	1.25	[m]
Espaciamiento promedio de ejes cortos	3.66	[m]
Espaciamiento promedio de ejes medios	4.57	[m]
Espaciamiento promedio de ejes largos	5.49	[m]
Porcentaje camiones con ejes cortos	33	%
Porcentaje camiones con ejes medios	33	%
Porcentaje camiones con ejes largos	34	%
Espesor de la carpeta de pavimento rígido	22	[cm]

Tabla 5.3-1: Parámetros geométricos constantes en la sensibilización

Los siguientes parámetros de entrada permanecerán constantes durante todo el análisis debido a que representan las características de construcción que se utilizan actualmente en Chile y además se consideran como constantes para el desarrollo de este análisis.

Los parámetros son:

Parámetro	Valor
Tipo de sellante	Silicona
Barra de transferencia de carga	Sin barra de traspaso
Soporte de borde	No

Tabla 5.3-2: Parámetros de construcción constantes en la sensibilización

5.4. RANGOS DE VALORES PARA PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN

Los valores promedio y/o rangos utilizados para los parámetros del hormigón serán en lo posible obtenidos de información chilena desarrollada durante los procesos de calibración previa (Delgadillo et al. 2014). En caso de no haber disponibilidad local estos serán estimados de experiencias internacionales o referencias bibliográficas.

[69] Para el ancho de la pista no se consideró 3.5 [m], que es el ancho utilizado en Chile, debido a que se utilizó el valor propuesto en la GEMDP AASHTO 2008 (3.6 [m]) y utilizado en otras memorias de la Universidad Técnica Federico Santa María. Además, en la sensibilización realizada, no se obtuvo diferencias significativas en los resultados entre estos dos valores.

5.4.1. PESO UNITARIO

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Peso unitario	2476	[kgf/m^3]	2400	2500

Tabla 5.4-1: Rango de valores para Peso Unitario

- A pesar de que en general la variación es poca y en la práctica constructiva el valor es constante, para fines de este análisis se considera un valor de 2476 [kgf/m^3] con un rango de variación de 2400 a 2500 [kgf/m^3].
- Este valor (2476 [kgf/m^3]) representa la realidad chilena para hormigones con agregado granítico y basáltico para distintas empresas productoras (Zembo, 2008)
- Además, en caso de querer variar este valor, observamos en la fórmula mostrada más abajo, que el Peso Unitario depende del contenido de cemento, variable que también consideramos, por lo que dada la baja variabilidad que en general presenta, se decide tomar los valores mostrados anteriormente:

$$\rho = 16.85G_a(100 - A) + c\left(1 - \frac{G_a}{G_c}\right) - w(G_a - 1)$$

Ecuación 5.4-1: Peso Unitario

Donde:

ρ = Peso unitario del hormigón

Ga = Gravedad específica de los agregados

Gc = Gravedad específica del cemento

A = Porcentaje de aire contenido

c = Contenido de cemento requerido

w = Contenido de agua requerido

5.4.2. RAZÓN DE POISSON

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Razón de Poisson	0.15	-	0.1	0.2

Tabla 5.4-2: Rango de valores para Razón de Poisson

- Para esta variable se toma lo recomendado por el Volumen 3 del Manual de Carreteras en su versión 2016.
- Se especifica un valor de 0.15 salvo en condiciones especiales.
- Para la variabilidad se consideran los valores de 0.1 y 0.2 para un nivel jerárquico 3 (Oda, 2013).

5.4.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Conductividad térmica	2.1	[W/m°K]	2.0	2.6

Tabla 5.4-3: Rango de valores para Conductividad Térmica

- Para esta variable se toma el valor por defecto que entrega la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, ya que es válido también para la realidad chilena (Oda, 2013).
- Para el rango de variabilidad se consideran los valores de 2.0 y 2.6, los cuales representan los valores promedio para agregado granítico y basáltico (Zembo, 2008).

5.4.4. CAPACIDAD CALORÍFICA

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Capacidad calorífica	1046.7	[J/kg°C]	1004.8	1088.5

Tabla 5.4-4: Rango de valores para Capacidad Calorífica

- Para esta variable se utiliza el valor promedio entre los sugeridos para agregados graníticos y basálticos, los cuales representan el rango de variabilidad (Oda, 2013; Zembo 2008).
- Además, los parámetros elegidos se encuentran dentro el rango que entrega la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 por defecto.

5.4.5. ABSORCIÓN SUPERFICIAL DE ONDAS CORTAS

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Absorción superficial de ondas cortas	0.85	-	0.8	0.9

Tabla 5.4-5: Rango de valores para Absorción Superficial de Ondas Cortas

- Para esta variable la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 entrega un valor por defecto para un nivel jerárquico 3 de 0.85.
- Para fines de este análisis se toma el valor 0.85 (Elzo, 2014; Zembo 2008), característico de la realidad chilena, y además este fue el valor que se utilizó para realizar la calibración de los modelos de deterioro del software de la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 (Oda, 2013).
- Para el rango de variabilidad se toma 0.8 y 0.9 (Moats et al., 1994)[70].

[70] ENVIRONMENTAL EFFECTS IN PAVEMENT MIX AND STRUCTURAL DESIGN SYSTEMS, Project No. 9-23, NCHRP, 2006

5.4.6. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Coeficiente de expansión térmica	7.77	[10^{-6}/°C]	7.02	9.21

Tabla 5.4-6: Rango de valores para Coeficiente de Expansión Térmica

- Para esta variable, una de las más importantes, la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 entrega un valor por defecto para un nivel jerárquico 3 de 9.9 y un rango de variabilidad de 7.9 a 10.9 [10^{-6}/°C].
- Dada la importancia de este parámetro en el presente análisis, se considera un valor de 7.77 [10^{-6}/°C] (Bravo, 2014) el cual corresponde al valor más característico de los hormigones chilenos.
- Para el rango de variabilidad se recomienda 7.02 a 9.21 (Bravo, 2014).

5.4.7. CONTENIDO DE CEMENTO

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Contenido de cemento	356	[kg/m^3]	237	475

Tabla 5.4-7: Rango de valores para Contenido de Cemento

- Para esta variable, debido a que es una información entregada por el proveedor de hormigón, se utilizan los valores de contenido de cemento determinados según el método del ACI Comitee 211 (ACI 211.1-91 2002) (Zembo, 2008).
- Estos contenidos de cemento tienen relación directa con la razón Agua/Cemento, pero para efectos de este análisis, ambas variables permanecerán independientes.

5.4.8. RAZÓN AGUA/CEMENTO

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Razón Agua/Cemento	0.4	-	0.5	0.6

Tabla 5.4-8: Rango de valores para Razón Agua/Cemento

- Para esta variable, en rigor se debe realizar mezclas y ensayarlas para de esta forma determinar la dosificación del hormigón, sin embargo, para la realización de este análisis se consideran los valores presentados en la norma NCh170.Of85.
- Se toma como valor referencia 0.4 y para el rango de variabilidad se consideró 0.5 y 0.6, valores que se encuentran dentro el rango propuesto por el "Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction" (2011)[71].

[71] Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction Final Report, Project 1-47, NCHRP, 2011

5.4.9. TEMPERATURA DE ESFUERZO CERO

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Temperatura de Esfuerzo Cero	32.5	[°C]	10	55

Tabla 5.4-9: Rango de valores para Temperatura Esfuerzo Cero

- Para esta variable, el software de la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 da la opción y de hecho recomienda realizar el cálculo internamente a partir de otras variables ingresadas.
- Para la realización de este análisis se consideran valores utilizados en la práctica chilena, tanto por desarrolladores independientes como empresas proveedoras.
- Se toma como valor referencia 32.5 y para el rango de variabilidad se consideró 10 y 55.

5.4.10. RETRACCIÓN REVERSIBLE

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Retracción Reversible	50	%	45	55

Tabla 5.4-10: Rango de valores para Retracción Reversible

- Para esta variable, se utiliza un valor de 50%, el cual fue el valor que se utilizó para realizar la calibración de los modelos de comportamiento del pavimento (Oda, 2013; Elzo, 2014).
- Para el rango de variabilidad, solo para efectos de análisis, se consideran los valores 45 y 55. Para esto se consideró la curva típica de retracción del hormigón de R. Park y T. Paulay. “Estructuras de concreto reforzado” p. 14.

5.4.11. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Módulo de Elasticidad	29000	[MPa]	27500	32500

Tabla 5.4-11: Rango de valores para Módulo de Elasticidad

- Para esta variable, tomamos como referencia tanto el Manual de Carreteras Volumen 3 en su versión 2016 (3.604.207) como la memoria “Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP” (Oda, 2013).
- Se considera un valor de 29000 [MPa] (Manual de Carreteras Volumen 3 versión 2016)
- Para el rango de variabilidad se utilizan los resultados de “Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP” (Oda, 2013) debido a que se concluye que el valor propuesto por el Manual de Carreteras Volumen 3 no representa la realidad chilena. De los hormigones ensayados se utiliza el menor valor (27500 [MPa]) y el mayor valor obtenido entre estos (32500 [MPa]), ambos a los 28 días.

5.4.12. MÓDULO DE RUPTURA

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Módulo de Ruptura	5.2	[MPa]	4.6	5.7

Tabla 5.4-12: Rango de valores para Módulo de Ruptura

- Para esta variable, tomamos como referencia la memoria "Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP" (Oda, 2013).
- Se considera un valor de referencia de 5.2 [MPa] (Oda, 2013).
- Para el rango de variabilidad se utilizan los resultados de "Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP" (Oda, 2013). De los hormigones ensayados se utiliza el menor valor (4.6 [MPa]) y el mayor valor obtenido entre estos (5.7 [MPa]), ambos a los 28 días.

5.4.13. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CILÍNDRICA

Variable	Valor	Unidad	Mín.	Máx.
Resistencia a la Compresión Cilíndrica	41	[MPa]	35	47

Tabla 5.4-13: Rango de valores para Resistencia a la Compresión Cilíndrica

- Para esta variable, tomamos como referencia la memoria "Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP" (Oda, 2013).
- Se considera un valor de referencia de 41 [MPa] (Oda, 2013).
- Para el rango de variabilidad se utilizan los resultados de "Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP" (Oda, 2013). De los hormigones ensayados se utiliza el menor valor (35 [MPa]) y el mayor valor obtenido entre estos (47 [MPa]), ambos a los 28 días.

5.5. OTRAS VARIABLES CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS

5.5.1. TIPO DE AGREGADO

Variable	Valor	Unidad
Tipo de Agregado	Granítico y Basáltico	-

Tabla 5.5-1: Valores para Tipo de Agregado

- De acuerdo a lo especificado por el SERNAGEOMIN se considera agregado tipo granítico para los hormigones de Santiago (Norte y Sur) y agregado tipo basáltico para los hormigones provenientes de Concepción.
- Para esta variable, tomamos como referencia las memorias "Caracterización de Hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP" (Oda, 2013) y "Medición del Coeficiente de Expansión Térmica en hormigones chilenos para pavimentos" (Bravo, 2014). Se considera el Tipo de Agregado como Granítico.

5.5.2. TIPO DE CEMENTO

Variable	Valor	Unidad
Tipo de Cemento	II	-

Tabla 5.5-2: Valores para Tipo de Cemento

- Para esta variable, tomamos como referencia la memoria "Análisis de Espectros de Carga para 6 Plazas de Pesaje Chilenas y 4 "WIM" Zona Urbana Santiago Norte, y su Influencia en el Desempeño de los Pavimentos de Hormigón" (Iturriaga, 2014).
- Se considera como valor para este análisis un Tipo de Cemento II.

5.5.3. VIDA DE DISEÑO

Variable	Valor	Unidad
Vida de diseño	240 (20)	meses (años)

Tabla 5.5-3: Valores para Vida de diseño

- Para esta variable, tomamos como referencia el Manual de Carreteras Volumen 3 Edición 2016 (Tabla 3.604.204.A) donde se especifica la vida de diseño de acuerdo a la clasificación del camino.
- En dicha tabla se especifica, para un camino con "Tránsito alto en zonas urbanas", una vida de diseño entre 10 y 30 años. Teniendo en cuenta eso, elegimos para nuestro análisis una vida de diseño de 20 años.

5.6. VALORES PARA PARÁMETROS DE LA SUB-RASANTE Y BASE

5.6.1. SUB-RASANTE

A continuación, se presentan los valores de los parámetros considerados, referidos a la sub-rasante, requeridos por el software AASHTOWare Pavement ME Design en su versión 2.2 (Software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos).

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Clasificación AASHTO	A-6	-	Iturriaga, 2014
CBR	10	%	Iturriaga, 2014
Módulo resiliente	77	[MPa]	Iturriaga, 2014
Otros valores	Defecto GEMDP AASHTO 2008	-	Iturriaga, 2014

Tabla 5.6-1: Valores de parámetros considerados para sub-rasante

5.6.2. BASE GRANULAR

A continuación, se presentan los valores de los parámetros considerados, referidos a la base granular, requeridos por el software AASHTOWare Pavement ME Design en su versión 2.2 (Software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008).

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Clasificación AASHTO	A-1-a	-	Iturriaga, 2014
CBR	50	%	Iturriaga, 2014
Módulo resiliente	215	[MPa]	Iturriaga, 2014
Espesor capa	150	[mm]	Iturriaga, 2014
Erosionabilidad	4	-	Iturriaga, 2014
Pérdida total de la fricción losa - base	240	meses	Iturriaga, 2014

Tabla 5.6-2: Valores de parámetros considerados para Base granular

Estos parámetros se mantienen constantes durante el desarrollo del análisis de sensibilidad.

5.7. VALORES BASE PARA LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO

Tal como se mencionó en las secciones 2.2.5 Predicción de Deterioros y 2.2.6 Predicción de la Regularidad (IRI), estos representan los criterios de desempeño del pavimento utilizados por la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMPD AASHTO 2008.

5.7.1. IRI

Criterio	Valor inicial[72]	Valor máximo	Unidad
IRI	1.5	4.5	[m/km]

Tabla 5.7-1: Valores base para IRI

- Para el criterio de desempeño IRI, tomamos como referencia el Manual de Carreteras Volumen 7 Edición 2016 donde se especifica un valor de IRI inicial para pavimentos chilenos entre 1.1 y 1.8 [m/km].
- Para nuestro análisis consideramos un valor inicial promedio ajustado entre los valores que nos entrega el Manual de Carreteras Volumen 7. El valor a utilizar será de 1.5 [m/km].
- El valor de IRI máximo se especifica en el Manual de Carreteras Volumen 7 Edición 2016 en función del tipo de camino que uno esté diseñando. En este caso se toma 4.5 [m/km].

5.7.2. ESCALONAMIENTO

Criterio	Valor máximo	Unidad
Escalonamiento	5	[mm]

Tabla 5.7-2: Valores base para Escalonamiento

- Según el Manual de Carreteras Volumen 3 Edición 2016 (3.604.212 (3)):
  "Para que el diseño sea aceptable y salvo que expresamente la Dirección de Vialidad acepte para un caso específico otra cosa, el escalonamiento no debe superar los 5 [mm]"
- Se asume un valor de 5 [mm] para el criterio de Escalonamiento.

5.7.3. AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

Criterio	Valor máximo	Unidad
Agrietamiento transversal	15	%

Tabla 5.7-3: Valores base para Agrietamiento transversal

[72] Para el valor inicial de IRI no se considera el rango propuesto por el Volumen 7 del Manual de Carreteras, sino más bien se considera un promedio lineal entre ambos (1.1 [m/km] y 1.8 [m/km]), resultando en un valor inicial de IRI aproximado a un decimal de 1.5 [m/km]

- Para este criterio el MOP a través del Manual de Carreteras no presenta un porcentaje límite de losas agrietadas, por lo que se aplica el valor establecido por defecto en la MEPDG y que corresponde a 15% de losas agrietadas.

5.7.4. CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO

Es importante destacar que esta definición varía de las versiones previas de la Guía de Diseño GEMDP AASHTO 2008, en donde la confiabilidad se definía en función del número estimado de ejes equivalentes necesarios para llegar a un nivel de serviciabilidad terminal (N) que fuera menor que el número de ejes equivalentes aplicados actualmente en el pavimento (n).

Criterio	Valor máximo	Unidad
Confiabilidad	85	%

Tabla 5.7-4: Valores base para Confiabilidad

- Para la confiabilidad se escoge un valor de 85%.

6. SENSIBILIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO UTILIZANDO EL SOFTWARE DE LA GUÍA EMPÍRICO-MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS.

6.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros necesarios para el diseño de pavimentos rígidos utilizando el nuevo método empírico – mecanicista propuesto en la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 a través del software en su versión 2.2, es necesario realizar una matriz de casos, para la cual es necesario elegir que valores se adoptarán para los parámetros Clima, Tráfico, etc.

A continuación, se presentarán los valores adoptados para los parámetros expuestos y posteriormente se explicará la matriz de casos elegida para realizar la sensibilización.

6.2. BASES DE DATOS Y CRITERIOS NECESARIOS PARA MATRIZ DE CASOS

6.2.1. ESTACIONES CLIMÁTICAS

A continuación, se presentan las estaciones climáticas consideradas en este análisis:

Clima	
Ciudad	**Estación climática**
Chacalluta	Arica_1970-1999.CH (2251)
Santiago	Santiago_1970-1999.CH (2131)
Punta Arenas	El Tepual/Punta Arenas_1970-1999.CH (2451)

Tabla 6.2-1: Estaciones climáticas utilizadas

6.2.2. ESPECTROS DE CARGA

Tal como se expuso anteriormente, una de las mayores innovaciones de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 es la introducción de los espectros de carga completos por eje. De esta forma, para realizar un análisis completo, se utilizará en este estudio espectros de carga completos por eje obtenidos en estudios anteriores específicos.

A continuación, se presentan los espectros de carga considerados en este análisis:

Tráfico		
Ciudad	**Espectro de carga**	**Fuente**
Arica	Chungará 34	Iturriaga, 2014
Santiago	Santiago SH7 - IZQ	Iturriaga, 2014

Tabla 6.2-2: Espectros de Carga completos por Eje utilizados

6.2.3. EJES EQUIVALENTES

Dado que los métodos actuales oficiales de diseño de pavimentos rígidos en Chile utilizan el concepto de Ejes Equivalentes, es necesario encontrar una equivalencia entre los Espectros de Carga completos por Eje y a cuantos Ejes Equivalentes equivaldría en el diseño actual.

Según los parámetros de Tráfico ingresados al software de la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008, este arroja un output de a cuántos Ejes Equivalentes equivaldrían los inputs de tráfico ingresados (parámetros de volumen y Espectros de Carga completos por Eje).

Si se ingresan los valores reales de TDMAC de cada estación de donde se utilizan los Espectros de Carga completos por Eje, el nivel de Ejes Equivalentes será distinto para cada una. Por lo tanto, para efectos de este análisis no se considera el volumen de tráfico real que existe en cada estación de pesaje, siendo necesaria la utilización de un valor ficticio de TDMAC (obtenido de manera iterativa) de manera tal que produzca el nivel de ejes equivalentes requeridos.

Se utiliza un nivel de 40 millones de Ejes Equivalentes, para producir un valor ficticio de volumen de tráfico.

Ejes equivalentes			
Estación de pesaje	**EE**	**TMDAC**	**Fuente**
Chungará 34	40 millones	2434	Iturriaga, 2014

Tabla 6.2-3: Equivalencia entre EE y Espectros de Carga completos por Eje

6.2.4. LARGO DE LOSA

A continuación, se presentan los largos de losa considerados en este análisis:

Largo de losa	
Valor	Unidad
3	[m]
3.5	[m]
4	[m]
4.5	[m]

Tabla 6.2-4: Valores de Largos de losa utilizados

6.2.5. ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN

El Alabeo Permanente por construcción es una curvatura cóncava permanente de la losa de hormigón producida por diferenciales de temperatura y retracción hidráulica entre la parte superior e inferior de la losa.

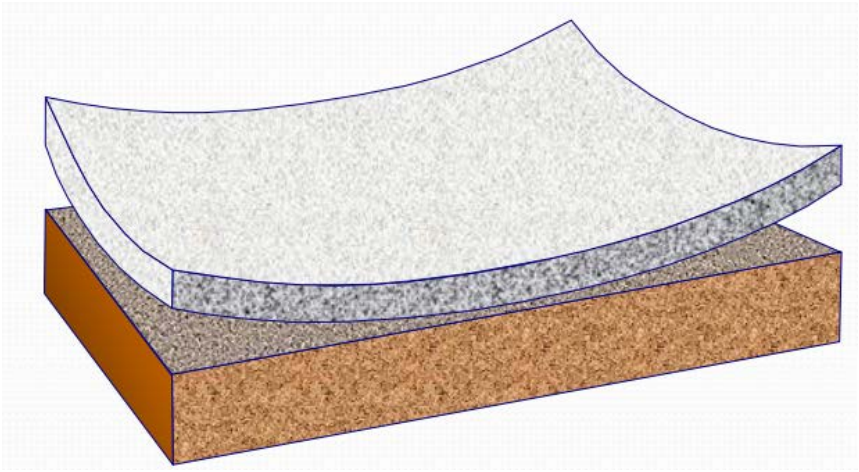


Figura 6.2-1: Representación Alabeo Permanente por construcción

A continuación, se presentan los valores de Alabeo permanente por construcción utilizados en este análisis:

Alabeo permanente por construcción	
Valor	Unidad
-6	[°C]
-10	[°C]
-14	[°C]
-18	[°C]
-22	[°C]
-24	[°C]

Tabla 6.2-5: Valores de Alabeo permanente por construcción utilizados

6.3. FORMATO DE ARCHIVOS UTILIZADOS EN MATRIZ DE CASOS

Debido a la cantidad de parámetros necesarios para realizar el análisis de sensibilidad y los distintos rangos de valores que pueden adoptar cada uno de estos, es necesario generar un formato de nombre de archivo, para que el posterior análisis de los datos y presentación de los resultados resulte mucho más fácil y cómodo.

El formato elegido es el que se muestra a continuación:

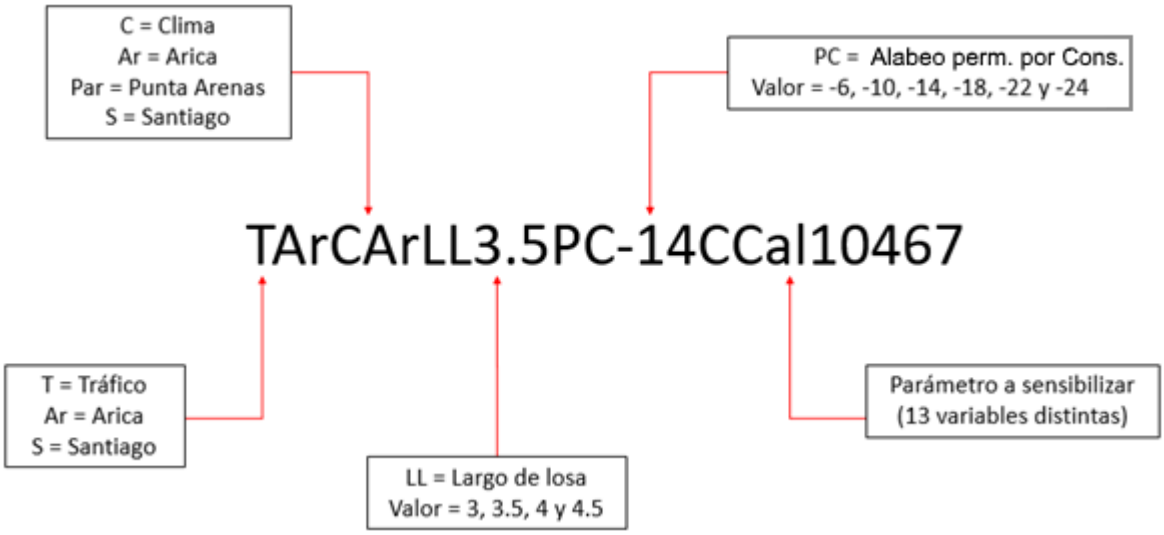


Figura 6.3-1: Formato de nombre de archivos para Matriz de Casos

Como se observa, el formato de nombre de archivos adoptado y la explicación de cada parte, tiene considerado los valores base y criterios elegidos que se mostraron anteriormente.

6.4. MATRIZ DE CASOS PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación, se explica la matriz de casos considerada para la realización del análisis de sensibilidad utilizando el software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008.

Los elementos que componen la matriz de casos son:

- 1 opción de Ejes Equivalentes (40 Millones)
- 2 opciones de Tráfico (Arica, Santiago)
- 3 opciones de Clima (Arica, Santiago, Punta Arenas)
- 4 opciones de Largo de Losa (3, 3.5, 4 y 4.5 [m])
- 6 opciones de Alabeo por construcción (-6, -10, -14, -18, -22 y -24 [°C])
- 13 opciones de parámetros de los materiales (Peso Unitario, Razón de Poisson, Conductividad Térmica, Capacidad Calorífica, Absorción Superficial de Ondas Cortas, Coeficiente de Expansión Térmica, Contenido de Cemento, Razón Agua/Cemento, Temperatura de Esfuerzo Cero, Retracción Reversible, Módulo de Elasticidad, Módulo de Ruptura y Resistencia a la compresión cilíndrica)
- 3 opciones de Rango de Valores (de acuerdo a cada parámetro)

Con lo expuesto anteriormente, tenemos las siguientes matrices de casos (expuestas en distintos niveles debido a la cantidad de datos):

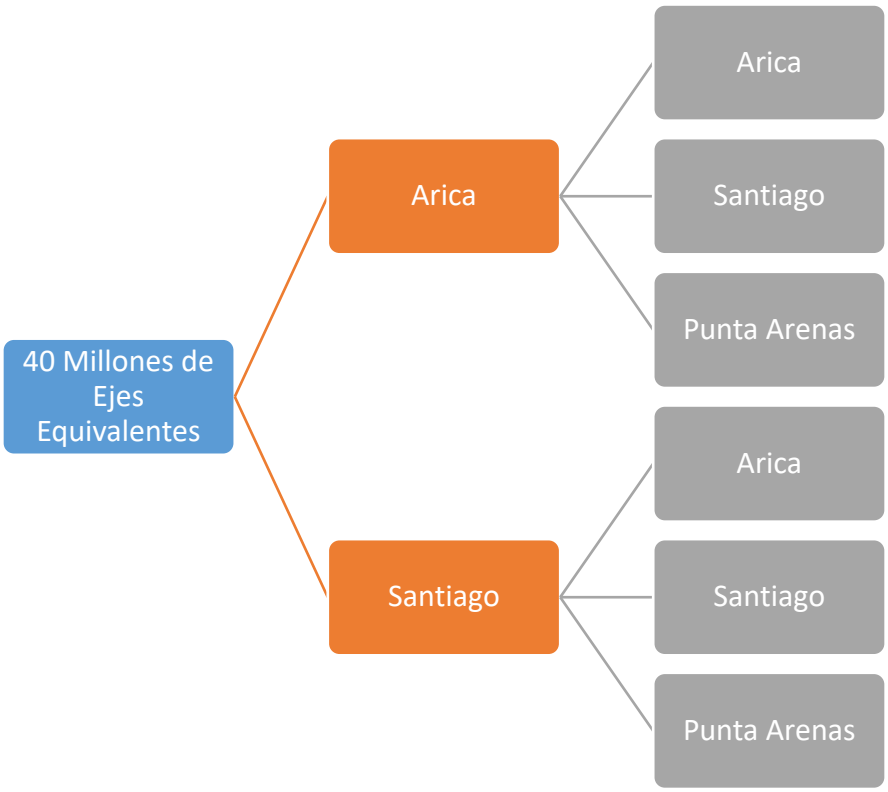


Figura 6.4-1: Matriz de Casos (EE, Tráfico, Clima)

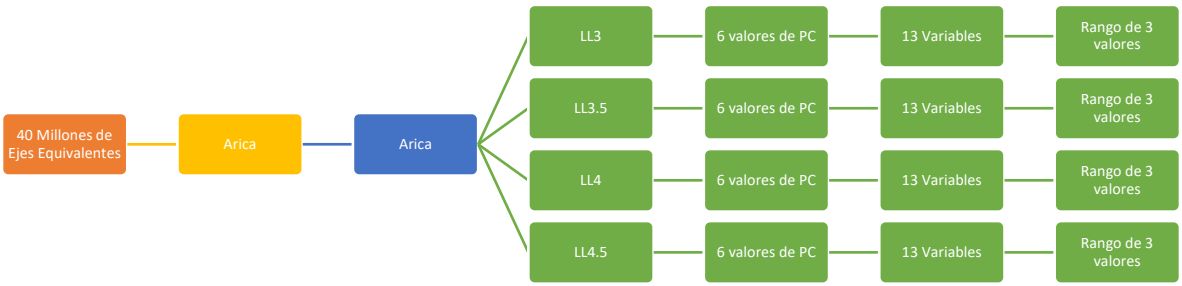


Figura 6.4-2: Matriz de Casos para Tráfico: Arica y Clima: Arica

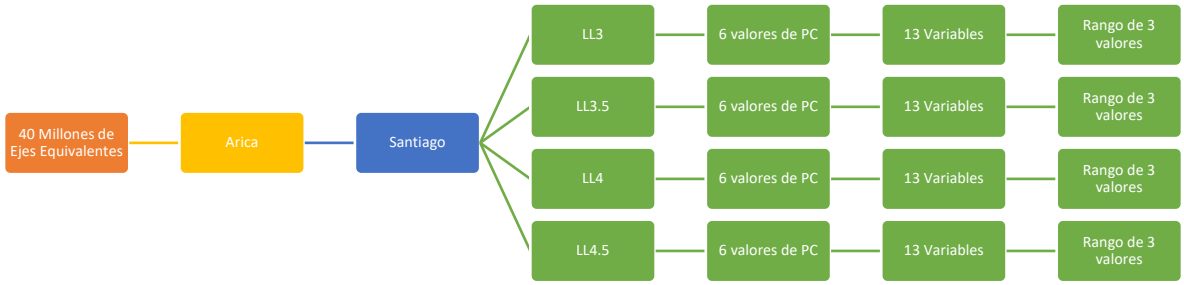


Figura 6.4-3: Matriz de Casos para Tráfico: Arica y Clima: Santiago

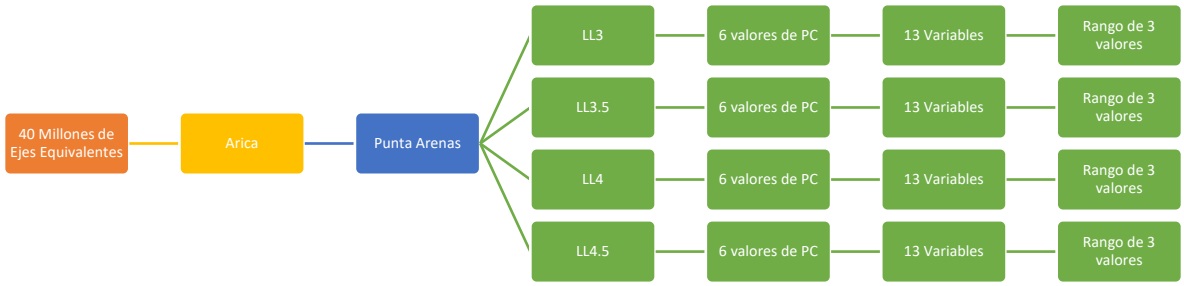


Figura 6.4-4: Matriz de Casos para Tráfico: Arica y Clima: Punta Arenas

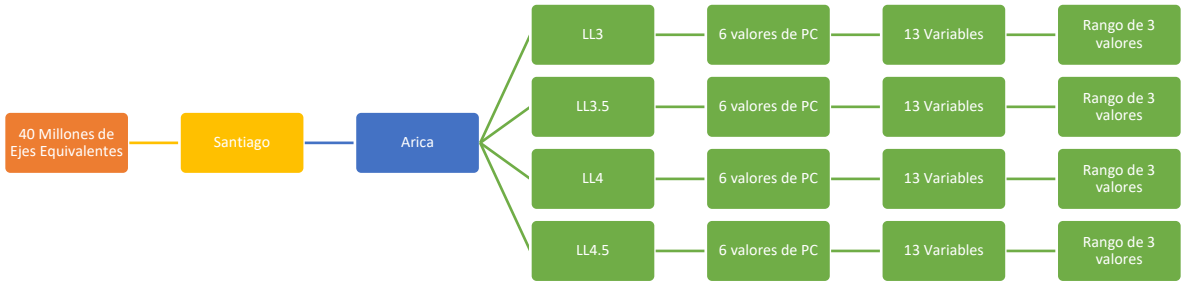


Figura 6.4-5: Matriz de Casos para Tráfico: Santiago y Clima: Arica

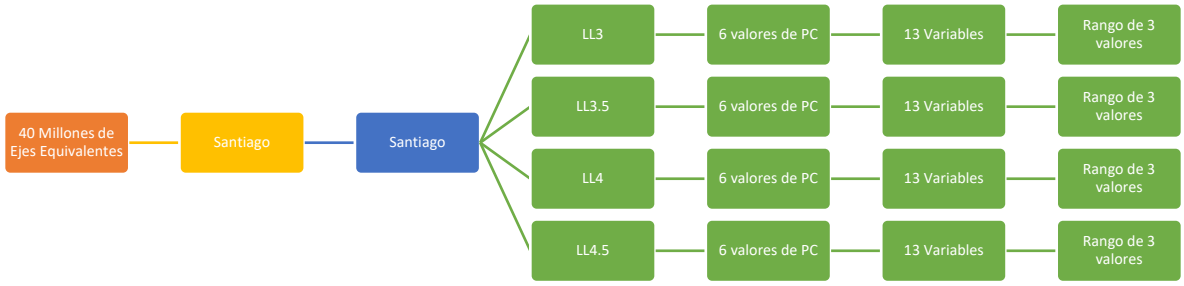


Figura 6.4-6: Matriz de Casos para Tráfico: Santiago y Clima: Santiago

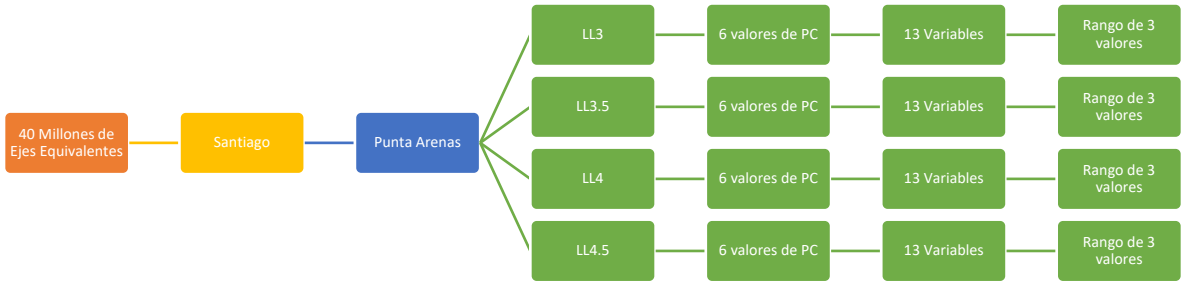


Figura 6.4-7: Matriz de Casos para Tráfico: Santiago y Clima: Punta Arenas

Es importante notar que el análisis de sensibilidad utilizando el software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 se realiza solamente con 2 espectros de carga (Tráfico) y 3 estaciones climáticas (Clima) debido a que las matrices mostradas anteriormente, utilizando todas las variables expuestas y solamente 2 espectros de carga y 3 estaciones climáticas, genera un total de 5616 combinaciones distintas. Por ejemplo, el hecho de considerar un espectro de carga más para realizar el análisis de sensibilidad, significaría un total de 8424 combinaciones distintas. Motivos que se exponen a continuación y el carácter teórico de esta memoria, hacen inviable la opción de considerar un espectro de carga más, por lo que finalmente se eligen los elementos expuestos anteriormente.

Las combinaciones generadas con los elementos elegidos y expuestos líneas arriba (5616 combinaciones distintas) deben ser ingresadas manualmente al software AASHTOWare Pavement ME Design en su versión 2.2 (software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008) debido a que dicha versión no permite el ingreso de parámetros mediante base de datos o de manera automatizada.

Para el ingreso de los espectros de carga, se tuvo que desarrollar un archivo en formato XML, el cual permitía cargar de una sola vez los datos necesarios para cada tipo de camión. Aun así, el ingreso de este archivo XML al software AASHTOWare Pavement ME Design debía hacerse de forma manual para cada corrida realizada.

Posterior a la generación de los resultados de los 5616 archivos, estos debían ser organizados de acuerdo a los criterios de desempeño y en un formato acorde que permita la representación gráfica de tantas variables a la vez. Para esto se utilizaron rutinas Macro desarrolladas en VBA para Excel y software especializado.

Los 5616 archivos de resultados deben ser procesados y ordenados en filas, debido a que el software especializado utiliza este formato de entrada de datos. Dado que el tiempo de vida de la vía considerado en el análisis de sensibilidad son 20 años, se generan 240 datos para cada combinación distinta. Teniendo en consideración que, como se mencionó,

tenemos 5616 combinaciones distintas y 3 criterios de desempeño a analizar, el número total de datos generados son 4043530 millones.

7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN LA GEMDP AASHTO 2008

7.1. INTRODUCCIÓN

Una vez determinada la matriz de casos necesaria para el análisis de sensibilidad, se procede a realizar la carga de los datos en el software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008. Para esto, se ingresan todos los valores base que se mencionaron anteriormente, así como las bases de datos de Tráfico (Espectros de Carga completos por Eje), de Clima (archivos *.dat obtenidos de otras memorias y contienen los datos reales de estaciones climáticas en Chile), de TMDAC y los parámetros geométricos asociados al tráfico pesado y la estructura de pavimento.

Una vez ingresados los datos se realiza la corrida, que dura aproximadamente 15 minutos. El software de la GEMDP AASHTO 2008 permite realizar la corrida de hasta 100 casos al mismo tiempo, pero esto sujeto a las capacidades técnicas del equipo donde está instalado el software. Dado que el equipo donde se encuentra instalado el software no contaba con las mejores características, este solo podía realizar corridas en grupos de 20, sin sufrir caídas ni cierres forzados, aunque de igual forma, el tiempo por cada corrida se mantiene igual y la modificación de datos debe hacerse caso a caso.

Posterior a la corrida de los distintos casos, es necesario extraer de todos los archivos que se generan, el archivo EXCEL que contiene toda la información y resultados de la corrida.

Debido a la cantidad de corridas realizadas (5616) y la necesidad de renombrar los archivos de acuerdo al formato de nombre establecido anteriormente, es necesario la utilización de algún software que automatice el procedimiento. Para esto se utilizan dos programas que se encargan de extraer el archivo con extensión *.xls, copiar a otra carpeta y posteriormente renombrar de acuerdo a los parámetros indicados. De todas formas, este procedimiento no es totalmente automático debido a que es necesario la intervención del usuario para indicar respecto a que parámetros se está realizando la clasificación. El procedimiento completo dura 1.20 [min] por caso.

Con los archivos renombrados de acuerdo al formato establecido, es necesario extraer de cada archivo con extensión *.xls los resultados de la corrida para los 240 meses pero diferenciando por criterio de desempeño (IRI, Escalonamiento, Agrietamiento transversal) para lo cual es necesario desarrollar un código MACRO en VBA de Excel, ya que dada la estructura de los archivos generados por el software, estos tienen la misma posición siempre, pero realizar el procedimiento a mano demoraría demasiado tiempo. Una vez generado el código se procede a separar en tres archivos los datos extraídos, donde cada uno corresponde a un criterio de desempeño. El tiempo en realizar el procedimiento completo para cada caso es de 1 [min], aunque este tiempo depende de que el equipo donde se encuentra instalado el software no se sobrecargue, por lo que este paso debe realizarse sin ningún otro proceso en paralelo.

Los archivos con extensión *.xls obtenidos para cada criterio de desempeño necesitan ser ordenados de acuerdo a los parámetros que se están estudiando. Para esto es necesario desarrollar otro código MACRO en VBA de EXCEL. El tiempo en generar los nuevos archivos *.xls con los datos ordenados por criterio de desempeño es de 1.3 [min].

Los resultados de este procedimiento, generan tres archivos, de acuerdo a los criterios de desempeño indicados anteriormente, con casi 1400000 filas. Para poder manejar

convenientemente estos archivos se utilizó el software especializado llamado “TABLEAU Desktop” en su versión 10.1. Este software, especializado en el manejo, visualización y análisis de grandes bases de datos, no es de licencia gratuita, sin embargo, ofrecen una versión para estudiantes con una duración de 1 año. Para el desarrollo de esta memoria se utilizó la versión para estudiantes. el cual realiza el procesamiento de grandes bases de datos y muestra los resultados gráficamente.

A continuación, se presentan los resultados de los 13 parámetros considerados en la sensibilización del diseño separados en los criterios de desempeño (Agrietamiento transversal, Escalonamiento e IRI).

Para la presentación de los resultados, las variables Largo de Losa y Alabeo permanente por construcción se mantendrán constantes en 3.5 [m] y -10 [°C] respectivamente. Esto debido a que las losas en Chile se construyen actualmente con ese tamaño y el valor de Alabeo permanente por construcción no es considerado (actualmente) como determinante en el diseño de pavimentos rígidos. Posteriormente se mostrará como este parámetro incide en el diseño de pavimentos rígidos nuevos.

Los resultados completos para las sensibilizaciones de cada parámetro se encuentran en el Anexo A. A continuación, se presentan y discuten los principales resultados para cada uno de los deterioros (Imágenes de alta resolución se encuentran en la carpeta Anexo C).

7.2. SENSIBILIDAD EN EL AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

Analizados los 13 parámetros, procedemos a resumir los resultados obtenidos.

De los 13 parámetros analizados y sensibilizados, se concluye que:

- El parámetro Peso Unitario presenta una sensibilidad baja a nula, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que solo para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una baja sensibilidad.
  Es importante concluir que este parámetro en la práctica presenta un rango de variación nulo o muy menor al considerado en el análisis de sensibilidad, por lo que, finalmente, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es poco sensible a este parámetro. (**BS**)
- El parámetro Razón de Poisson presenta una sensibilidad baja a nula, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que solo para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una baja sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es poco sensible a este parámetro. (**BS**)
- El parámetro Conductividad Térmica presenta una sensibilidad baja a nula, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que solo para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una baja sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es poco sensible a este parámetro. (**BS**)
- El parámetro Capacidad Calorífica presenta una sensibilidad nula, aunque existe una diferencia entre los resultados, lo que demuestra que es dependiente del clima. El criterio de desempeño Agrietamiento transversal no es sensible a este parámetro. (**NS**)

- El parámetro Absorción Superficial de Ondas Cortas presenta una sensibilidad baja a nula, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que solo para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una baja sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es poco sensible a este parámetro. (**BS**)
- El parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta una sensibilidad media a alta, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica presenta una sensibilidad media y para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una alta sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Contenido de Cemento presenta una sensibilidad baja a nula, y dicha sensibilidad es dependiente del clima. Se observa que solo para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una baja sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es poco sensible a este parámetro. (**BS**)
- El parámetro Razón Agua/Cemento presenta una sensibilidad muy baja a nula, y dicha sensibilidad es dependiente del clima. Se observa que solo para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una muy baja sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Temperatura de Esfuerzo Cero presenta una sensibilidad nula.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Retracción Reversible presenta una sensibilidad nula.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Módulo de Elasticidad presenta una sensibilidad alta, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica presenta una sensibilidad alta y para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una muy alta sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Módulo de Ruptura presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica presenta una sensibilidad alta y para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una muy alta sensibilidad.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Resistencia a la Compresión Cilíndrica presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica presenta una sensibilidad alta y para la estación climática de Santiago, este parámetro presenta una muy alta sensibilidad. Para la estación climática de Punta Arenas, la sensibilidad es nula.
  El criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible a este parámetro. (**MS**)

A continuación, los parámetros más sensibles en el criterio de desempeño Agrietamiento transversal:

- Coeficiente de Expansión Térmica:

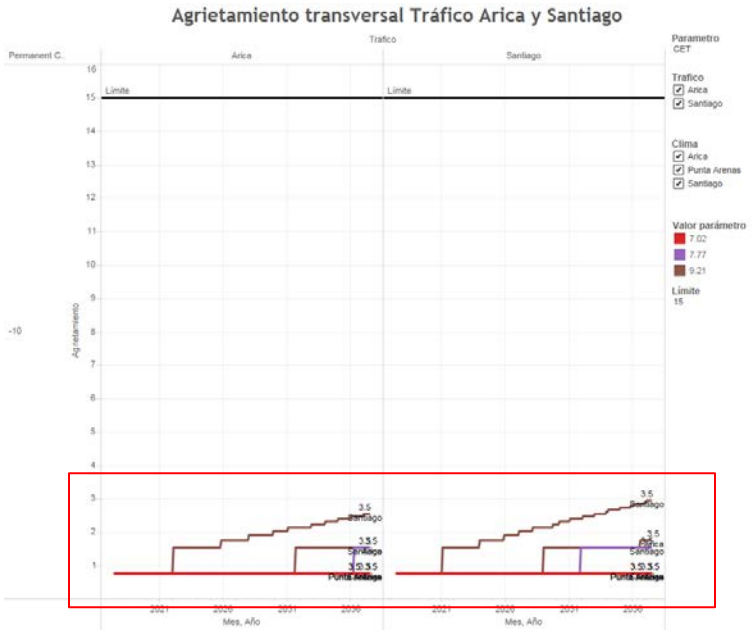
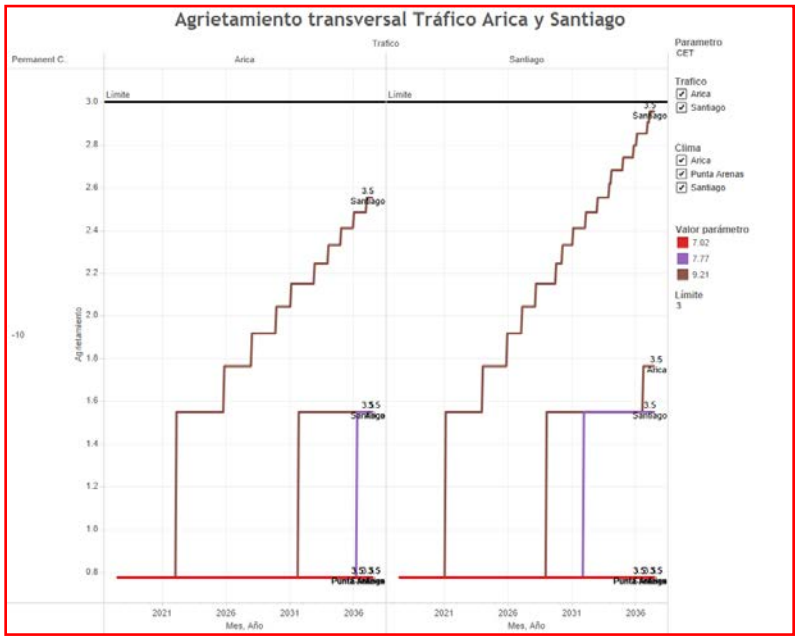


Figura 7.2-1: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

Dado que el límite (15%) está muy por encima de los valores obtenidos, se realiza un acercamiento al gráfico para mejor entendimiento y presentación de los resultados.



- Módulo de Ruptura:

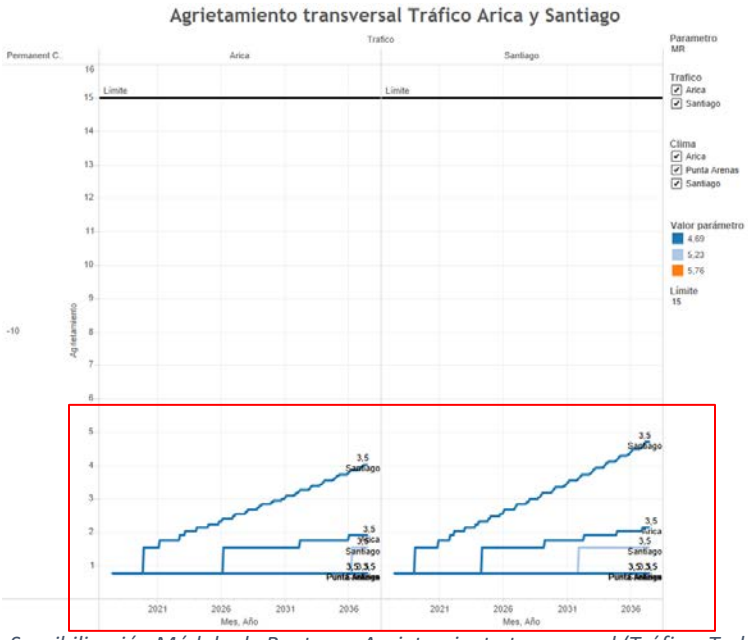
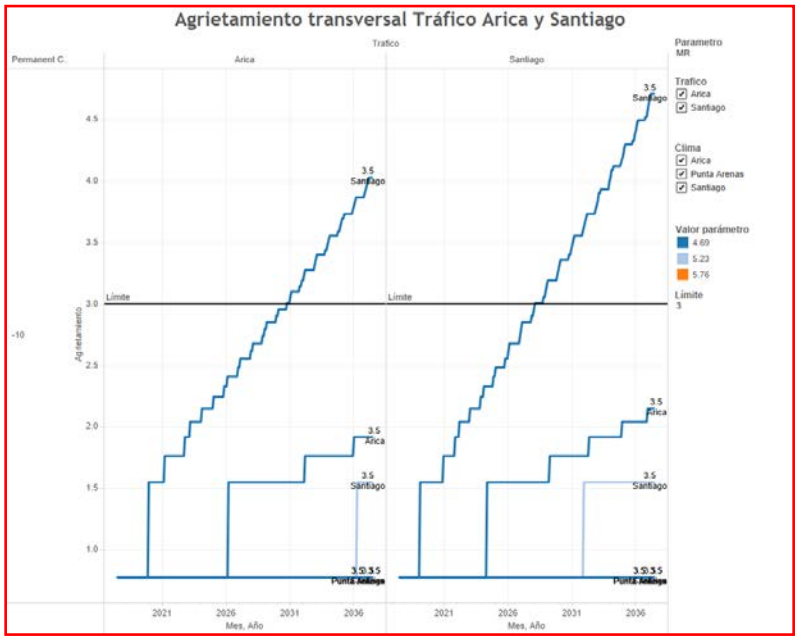


Figura 7.2-2: Sensibilización Módulo de Ruptura - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

Dado que el límite (15%) está muy por encima de los valores obtenidos, se realiza un acercamiento al gráfico para mejor entendimiento y presentación de los resultados.



A continuación, los parámetros no sensibles en el criterio de desempeño Agrietamiento transversal:

- Temperatura de Esfuerzo Cero:

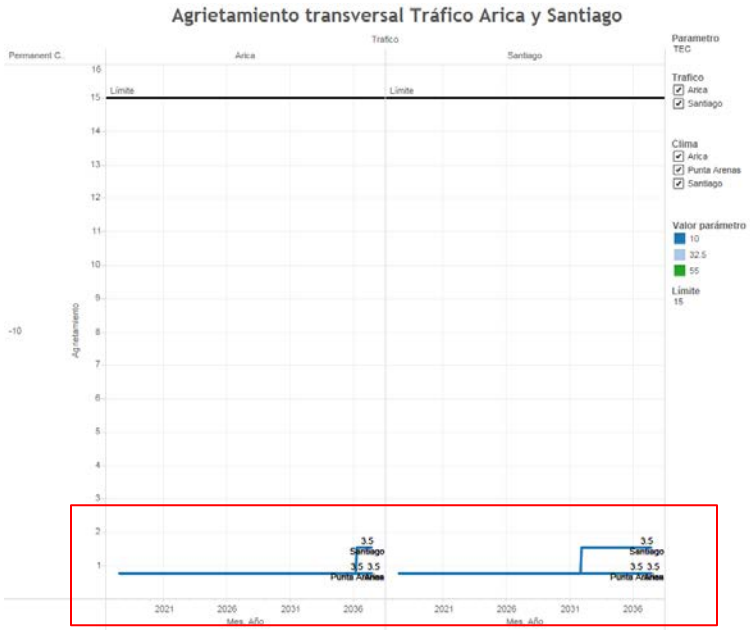
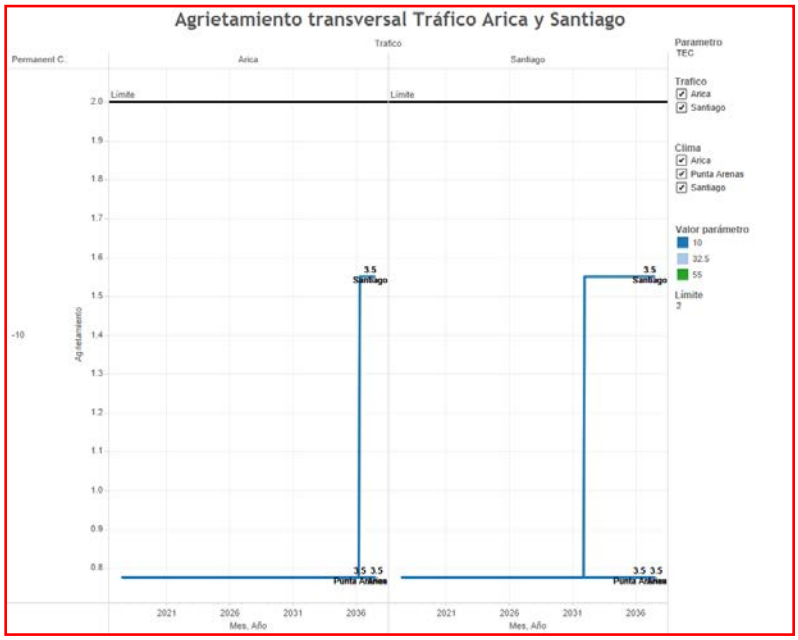


Figura 7.2-3: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

Dado que el límite (15%) está muy por encima de los valores obtenidos, se realiza un acercamiento al gráfico para mejor entendimiento y presentación de los resultados.



Se observa que aun así la variación es nula.

- Capacidad Calorífica:

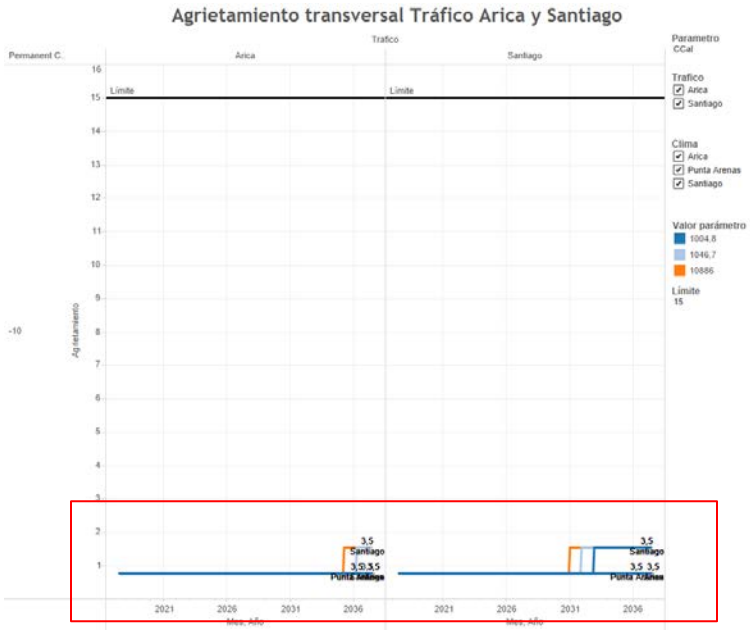
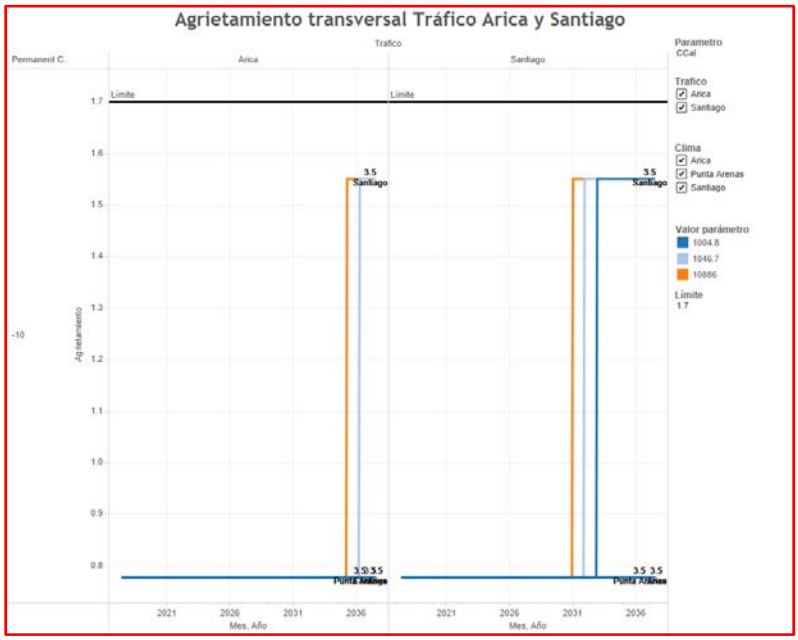


Figura 7.2-4: Sensibilización Capacidad Calorífica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

Dado que el límite (15%) está muy por encima de los valores obtenidos, se realiza un acercamiento al gráfico para mejor entendimiento y presentación de los resultados.



Se observa que aun así la variación es nula.

7.3. SENSIBILIDAD EN EL ESCALONAMIENTO

Analizados los 13 parámetros, procedemos a resumir los resultados obtenidos.

De los 13 parámetros analizados y sensibilizados, se concluye que:

- El parámetro Peso Unitario presenta una sensibilidad alta, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite.
  El criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Razón de Poisson presenta una sensibilidad alta, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Conductividad Térmica presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Capacidad Calorífica presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Absorción Superficial de Ondas Cortas presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite.
  El criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Contenido de Cemento presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima. Se observa que, para la estación climática de Arica y Santiago, el criterio de desempeño Escalonamiento tiene la mayor sensibilidad.
  El criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Razón Agua/Cemento presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima. Se observa que, prácticamente

para todas las estaciones climáticas (Arica, Santiago y Punta Arenas), el criterio de desempeño Escalonamiento no cumple con el límite impuesto.
El criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible a este parámetro. (**MS**)

- El parámetro Temperatura de Esfuerzo Cero presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima. Se observa que, prácticamente para todas las estaciones climáticas (Arica, Santiago y Punta Arenas), el criterio de desempeño Escalonamiento tiene una gran variación.
  El criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Retracción Reversible presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Módulo de Elasticidad presenta una sensibilidad media, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento tiene una sensibilidad media a este parámetro. (**S**)
- El parámetro Módulo de Ruptura presenta una sensibilidad media, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento tiene una sensibilidad media a este parámetro. (**S**)
- El parámetro Resistencia a la Compresión Cilíndrica presenta una sensibilidad media, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño Escalonamiento cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño Escalonamiento está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño Escalonamiento tiene una sensibilidad media a este parámetro. (**S**)

A continuación, los parámetros más sensibles en el criterio de desempeño Escalonamiento:

- Coeficiente de Expansión Térmica:

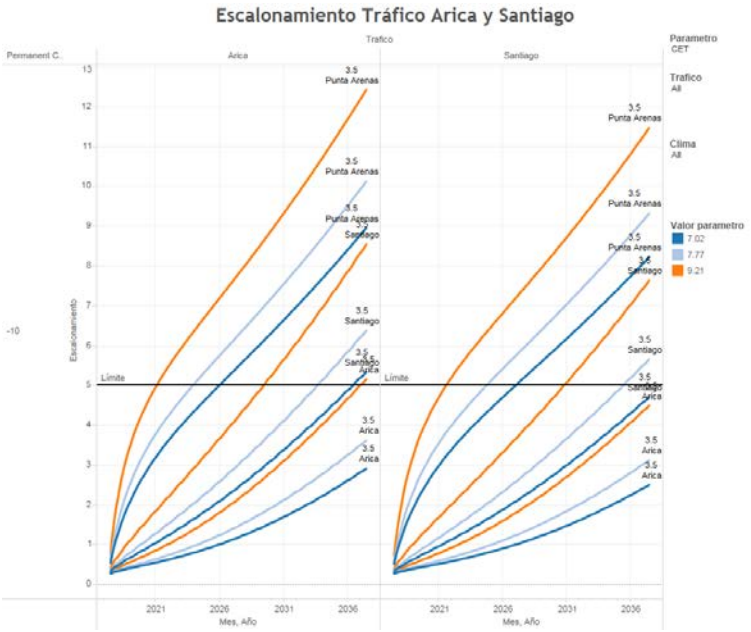


Figura 7.3-1: Sensibilización Coeficiente Expansión Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

- Contenido de Cemento:

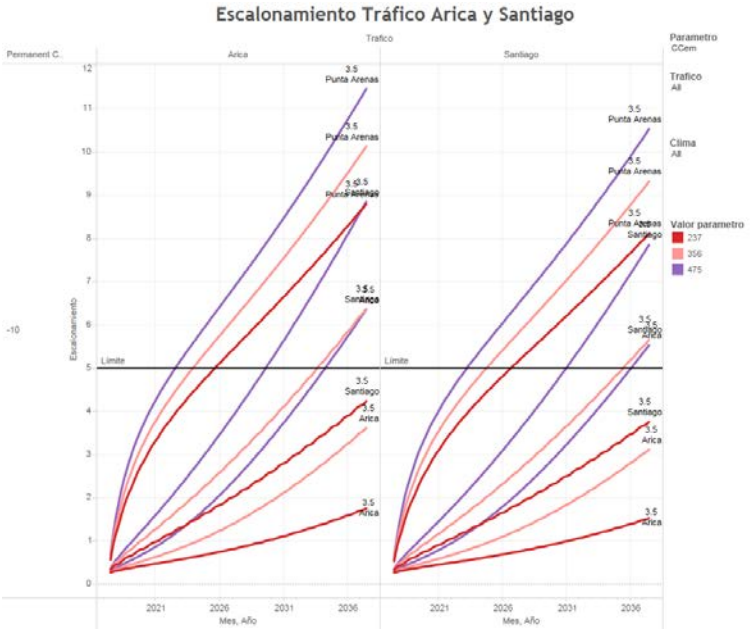


Figura 7.3-2: Sensibilización Contenido de Cemento - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

A continuación, los parámetros no sensibles en el criterio de desempeño Escalonamiento:

- Retracción Reversible:

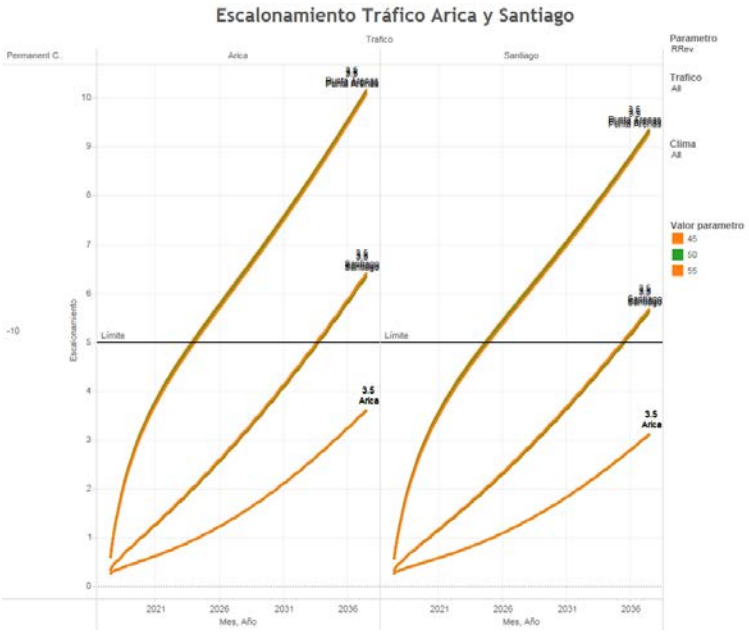


Figura 7.3-3: Sensibilización Retracción Reversible - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

- Conductividad Térmica:

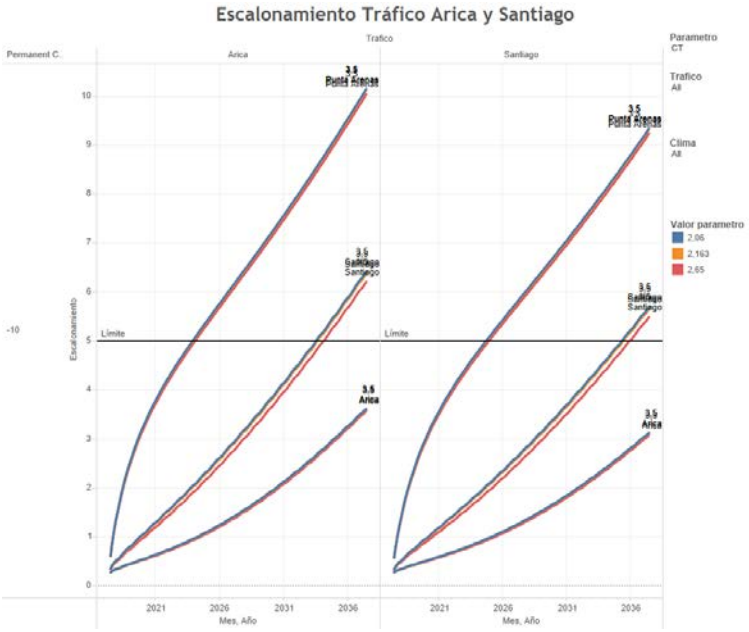


Figura 7.3-4: Sensibilización Conductividad Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

7.4. SENSIBILIDAD EN EL IRI

Analizados los 13 parámetros, procedemos a resumir los resultados obtenidos.

De los 13 parámetros analizados y sensibilizados, se concluye que:

- El parámetro Peso Unitario presenta una sensibilidad media, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente para la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI es sensible a este parámetro. (**S**)
- El parámetro Razón de Poisson presenta una sensibilidad media, y dicha sensibilidad es muy dependiente del clima y el tráfico. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y tráfico Arica y estación climática Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente para la estación climática de Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI es sensible a este parámetro. (**S**)
- El parámetro Conductividad Térmica presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Capacidad Calorífica presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Absorción Superficial de Ondas Cortas presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima y el tráfico. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite (para estación climática Santiago depende del tráfico).
  El criterio de desempeño IRI es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Contenido de Cemento presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima y el tráfico. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de

desempeño IRI está por sobre el límite (para estación climática Santiago depende del tráfico).
El criterio de desempeño IRI es muy sensible a este parámetro. (**MS**)

- El parámetro Razón Agua/Cemento presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima y el tráfico. Se observa que para la estación climática de Arica y tráfico Arica. el criterio de desempeño IRI solo cumple con algunos valores el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite (para estación climática Santiago solo un valor cumple).
  El criterio de desempeño IRI es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Temperatura de Esfuerzo Cero presenta una sensibilidad muy alta, y dicha sensibilidad es también muy dependiente del clima y el tráfico. Algunos valores cumplen dependiendo de la estación climática y también del tráfico.
  El criterio de desempeño IRI es muy sensible a este parámetro. (**MS**)
- El parámetro Retracción Reversible presenta una sensibilidad nula. A pesar de esto, se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI no es sensible a este parámetro. (**NS**)
- El parámetro Módulo de Elasticidad presenta una sensibilidad media. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI es sensible a este parámetro. (**S**)
- El parámetro Módulo de Ruptura presenta una sensibilidad media a la variación de este. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas. La variación debido al clima es muy alta.
  El criterio de desempeño IRI es sensible a este parámetro. (**S**)
- El parámetro Resistencia a la Compresión Cilíndrica presenta una sensibilidad baja. Se observa que para la estación climática de Arica el criterio de desempeño IRI cumple con el límite, sin embargo, para la estación climática de Santiago y Punta Arenas, el criterio de desempeño IRI está por sobre el límite, especialmente con la estación climática de Punta Arenas (con tráfico Arica). Para el tráfico Santiago, la única estación climática que no cumple es Punta Arenas.
  El criterio de desempeño IRI tiene una sensibilidad baja a este parámetro. (**BS**)

A continuación, los parámetros más sensibles en el criterio de desempeño IRI:

- Coeficiente de Expansión Térmica:

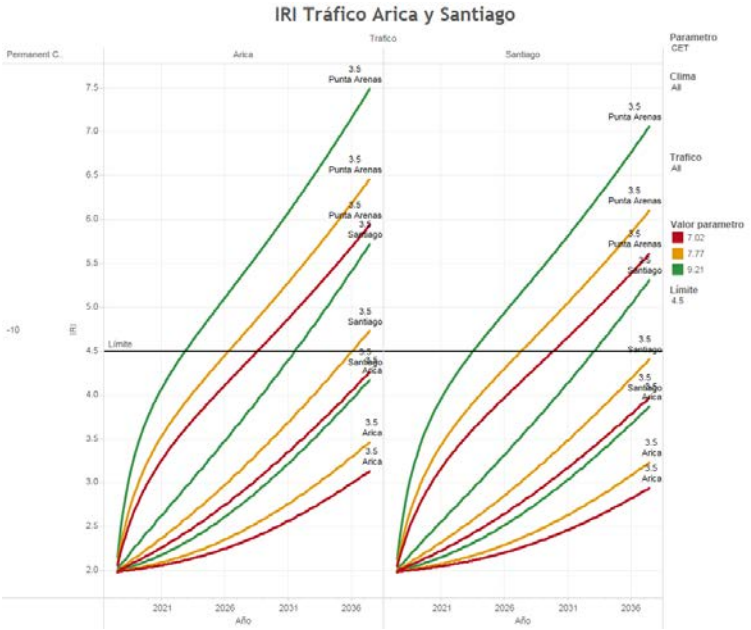


Figura 7.4-1: Sensibilización Coeficiente Expansión Térmica - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

- Contenido de Cemento:

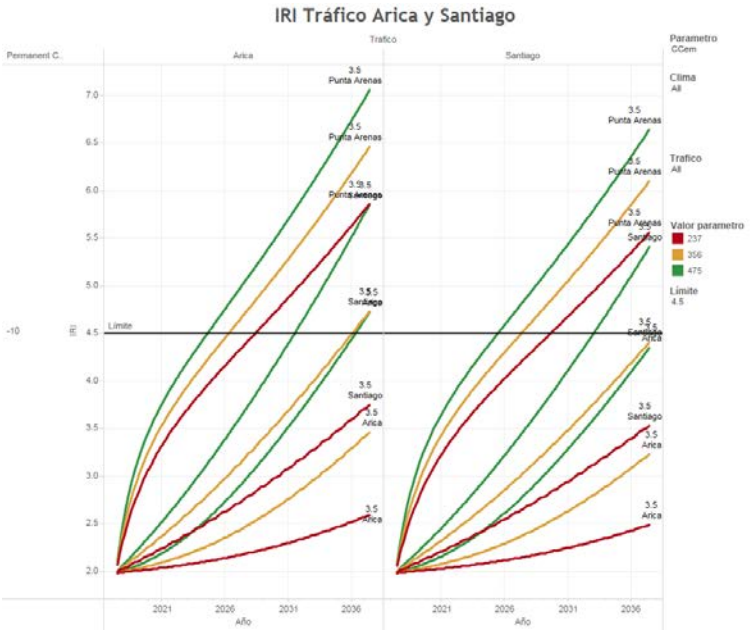


Figura 7.4-2: Sensibilización Contenido de Cemento - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

A continuación, los parámetros no sensibles en el criterio de desempeño IRI:

- Conductividad Térmica:

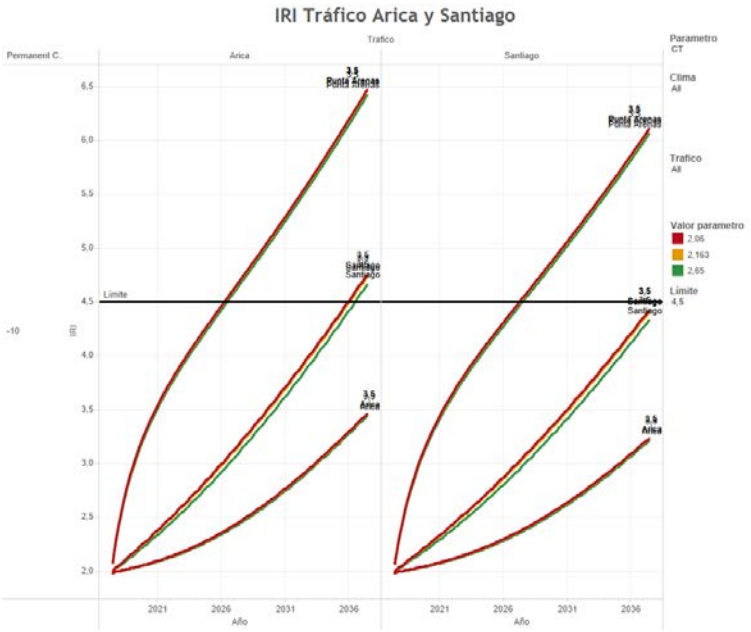


Figura 7.4-3: Sensibilización Conductividad Térmica - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

- Absorción Superficial de Ondas Cortas:

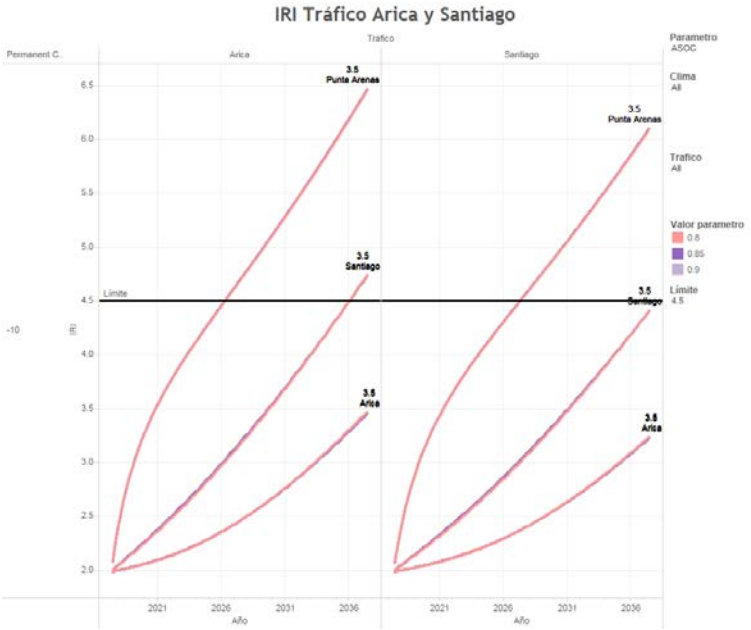


Figura 7.4-4: Sensibilización Absorción Superficial de Ondas Cortas - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Todos)

7.5. RESUMEN DE RESULTADOS DE SENSIBILIDAD

A continuación, se presenta una tabla resumen con los distintos grados de sensibilidad que tiene cada parámetro respecto a los criterios de desempeño Agrietamiento transversal, Escalonamiento e IRI[73].

Parámetro	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento transversal
Peso Unitario	S	MS	BS
Razón de Poisson	S	MS	BS
Conductividad Térmica	NS	NS	BS
Capacidad Calorífica	NS	NS	NS
Absorción Superficial de Ondas Cortas	NS	NS	BS
Coeficiente de Expansión Térmica	MS	MS	MS
Contenido de Cemento	MS	MS	BS
Razón Agua/Cemento	MS	MS	NS
Temperatura de Esfuerzo Cero	MS	MS	NS
Retracción Reversible	NS	NS	NS
Módulo de Elasticidad	S	S	MS
Módulo de Ruptura	S	S	MS
Resistencia a la Compresión Cilíndrica	BS	S	MS

Leyenda: NS = No Sensible, BS = Baja Sensibilidad, S = Sensible, MS = Muy sensible
Largo de Losa = 3.5 [m], Alabeo por construcción = -10 [°C]

Tabla 7.5-1: Resumen de sensibilidad de criterios de desempeño respectivo a cada parámetro

Obtenida la tabla anterior, donde se resume la sensibilidad de cada parámetro respecto a los criterios de desempeño utilizando valores de la realidad chilena actual, podemos comparar con los resultados obtenidos por estudios similares a nivel internacional.

Para esto se utilizan las publicaciones y trabajos más importantes de los autores mencionados anteriormente y que además engloban otros tantos estudios realizados con antelación. Los datos se resumen y organizan de tal forma que la lectura y comparación resulte fácil.

Para uno de los estudios a nivel internacional más importante ("Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction") tenemos:

[73] Límites para distintos grados de sensibilidad: <0.000015 – NS; >=0.000055 y <0.000025 – BS; >=0.000025 y <0.000055 – S; >0.000055 – MS. Para esto se utilizó las herramientas internas del software Tableau. (Parámetros a considerar en el rango son Delta del valor del coeficiente y el intercepto de la pendiente, así como el valor t para verificación de los datos). Estos rangos se realizan internamente en el software Tableau y con ayuda de planillas de Excel.

Parámetro	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento transversal
Peso Unitario	MS	MS	MS
Razón de Poisson	S	S	S
Conductividad Térmica	S	S	MS
Capacidad Calorífica	-	-	-
Absorción Superficial de Ondas Cortas	S	S	MS
Coeficiente de Expansión Térmica	MS	MS	MS
Contenido de Cemento	S	S	S
Razón Agua/Cemento	S	S	MS
Temperatura de Esfuerzo Cero	-	-	-
Retracción Reversible	-	-	-
Módulo de Elasticidad	S	S	MS
Módulo de Ruptura	S	S	MS
Resistencia a la Compresión Cilíndrica	-	-	-

Leyenda: S = Sensible, MS = Muy sensible, - = No aplica

Tabla 7.5-2: Resumen de sensibilidad de criterios de desempeño respectivo a cada parámetro (Estudio internacional)

Y los parámetros más importantes para algunos de los autores más relevantes en la materia, según criterio de desempeño:

Autor	Parámetro	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento transversal
Schwartz et al (2011)	Alabeo permanente por construcción		MS	MS
	Temperatura de Esfuerzo Cero		MS	MS
	Módulo de Ruptura			MS
	Resistencia a la Compresión Cilíndrica			MS
	Coeficiente de Expansión Térmica		MS	MS
Ceylan et al (2011)	Módulo de Ruptura	MS		MS
	Peso Unitario		MS	
Guclu et al (2009)	Coeficiente de Expansión Térmica		MS	MS
	Conductividad Térmica			MS
	Módulo de Ruptura			MS
	Resistencia a la Compresión Cilíndrica			MS
	Alabeo permanente por construcción	MS	MS	MS
	Temperatura de Esfuerzo Cero	MS		

Tabla 7.5-3: Resumen de parámetros más sensibles según autores

Parámetro	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento transversal
Peso Unitario	MS	MS	MS
Razón de Poisson	-	-	MS
Conductividad Térmica	-	-	MS
Coeficiente de Expansión Térmica	MS	MS	MS
Módulo de Elasticidad	-	-	MS
Módulo de Ruptura	MS	-	MS

Leyenda: MS = Muy sensible, - = No aplica

Tabla 7.5-4: Resumen parámetros más sensibles "Sensitivity quantification of jointed plain concrete pavement mechanistic-empirical performance predictions" (2013). Ceylan, Kim, Gopalakrishnan, Schwartz and Li.

Dado que cada estudio y análisis se realizó de manera distinta, en lugares distintos, con datos iniciales e históricos distintos, realizar una comparación directa sería inútil por lo que se procede a identificar aquellos parámetros que resulten comunes para los estudios y resultados aquí mostrados, a manera de reafirmar la necesidad de estudios futuros para la correcta caracterización de la realidad chilena y la importancia de estos en el diseño de pavimentos rígidos nuevos.

Podemos concluir que el parámetro que resalta por ser Muy Sensible (MS), tanto en los resultados internacionales como los de esta memoria, es el Coeficiente de Expansión Térmica (CET), el cual presenta la sensibilidad más alta en los tres criterios de desempeño considerados para pavimentos de hormigón rígido.

Otro parámetro que se observa es muy importante para el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es el Módulo de Ruptura, el cual presenta en todos los resultados mostrados anteriormente, incluido el de esta memoria, un valor de Muy Sensible (MS).

Es importante notar también, que el parámetro Peso Unitario tiene un valor Muy Sensible (MS) para los distintos criterios de desempeño en la mayoría de los estudios de sensibilidad realizados internacionalmente. En el análisis de esta memoria se obtiene un valor con sensibilidad Media a Baja (S a BS). Podemos concluir al respecto que este valor en el día a día de las construcciones no varía, de hecho, el valor que se asume en la práctica es siempre el mismo. En los estudios internacionales, el rango que dan a este valor es muy grande, por lo que se aleja de la realidad cotidiana.

Hay varios parámetros que en los estudios internacionales no se toman en cuenta para la sensibilización dado que no son medibles rutinariamente, debido a que requiere de un largo periodo de tiempo para desarrollarse o los métodos para la medición resultan muy complicados y de un alto valor económico. Para estos casos, la GEMDP AASHTO 2008 entrega la opción de estimar a partir de otros parámetros o aceptar el valor por defecto. También da la opción de ingresar algunos, solo cuando otros parámetros tienen un Nivel de jerarquía 2 o 3. Tal como se mencionó anteriormente, esto genera una interdependencia entre las variables, que, dado el carácter teórico de esta memoria, no se contempla.

8. SENSIBILIDAD (TEÓRICA) DEL LARGO DE LOSA Y ALABEO PERMANENTE POR CONSTRUCCIÓN

8.1. INTRODUCCIÓN

El Análisis de Sensibilidad de los parámetros necesarios para la caracterización de los materiales en los criterios de desempeño utilizando el software de la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos se realizó considerando un Largo de Losa = 3.5 [m] y un valor de Alabeo por construcción = -10 [°C].

Sim embargo en este capítulo se utilizarán otros valores de Largo de Losa y Alabeo permanente por construcción para generar un Análisis de Sensibilidad de los parámetros necesarios para la caracterización de los materiales.

Los resultados detallados se presentan en el Anexo B. A continuación se presentará de manera resumida los resultados de este análisis.

Los datos a utilizar para las variables Largo de Losa y Alabeo permanente por construcción son:

Parámetro	Valores
Largo de Losa	3.0; 4.0; 4.5
Alabeo permanente por construcción	-6; -10; -14; -18; -22; -24

Tabla 8.1-1: Valores de Largo de Losa y Alabeo permanente por construcción usados en el análisis de sensibilidad

8.2. SENSIBILIDAD EN EL AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

Teniendo en cuenta los largos de losa y valores de Alabeo permanente por construcción junto a los 13 parámetros necesarios para la caracterización del hormigón se realiza nuevamente el Análisis de Sensibilidad y obtenemos los siguientes resultados para el criterio de desempeño Agrietamiento transversal:

- El parámetro Peso Unitario presenta una sensibilidad nula para largos de losa 3 y 4 [m], además cumpliendo con el límite impuesto. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Razón de Poisson presenta una sensibilidad baja a media para largos de losa 3 y 4 [m], pero es muy dependiente de la estación climática para cumplir con el límite impuesto. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto.

Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.

- El parámetro Conductividad térmica presenta una sensibilidad baja a nula para largos de losa 3 y 4 [m], pero es muy dependiente de la estación climática y el valor de Alabeo permanente por construcción para cumplir con el límite impuesto. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Capacidad Calorífica presenta una sensibilidad nula para largos de losa 3 y 4 [m], además cumpliendo con el límite impuesto. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Absorción Superficial de Ondas Cortas presenta una sensibilidad baja a nula para largos de losa 3 y 4 [m], pero es muy dependiente de la estación climática y el valor de Alabeo permanente por construcción para cumplir con el límite impuesto. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta una sensibilidad baja a media para largos de losa 3 y 4 [m], pero es muy dependiente de la estación climática (Arica y Punta Arenas) y el valor de Alabeo permanente por construcción para cumplir con el límite impuesto. Para la estación climática Santiago presenta una sensibilidad media a alta, pero también dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Contenido de Cemento presenta una sensibilidad baja a nula para largos de losa 3 y 4 [m], y se observa que cumple con el límite impuesto para las estaciones climáticas de Arica y Punta Arenas y tráfico Arica y Santiago. Para la estación climática Santiago presenta una sensibilidad baja a nula, pero también dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción y el tráfico para cumplir con el límite impuesto. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida

que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho.

Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.

- El parámetro Razón Agua/Cemento presenta una sensibilidad nula para largos de losa 3 y 4 [m], y se observa que cumple con el límite impuesto para todas las estaciones climáticas y tráfico Arica. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho.

  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Temperatura de Esfuerzo Cero presenta una sensibilidad nula para largos de losa 3 y 4 [m], y se observa que cumple con el límite impuesto para las estaciones climáticas de Arica, Punta Arenas y Santiago, y tráfico Arica. Solamente no cumple para tráfico Santiago y estación climática Santiago y valores muy bajos de Alabeo permanente por construcción. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho.

  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Retracción Reversible presenta una sensibilidad nula para largos de losa 3 y 4 [m], y se observa que cumple con el límite impuesto para las estaciones climáticas de Arica, Punta Arenas y Santiago, y tráfico Arica. Solamente no cumple para tráfico Santiago y estación climática Santiago y valores muy bajos de Alabeo permanente por construcción. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve muy sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho.

  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Módulo de Elasticidad presenta una sensibilidad baja a media para largos de losa 3 y 4 [m] la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Esta sensibilidad es mayor a medida que el valor Alabeo permanente por construcción es menor. Cumplir con el límite impuesto es muy dependiente de la estación climática, el tráfico y el valor de Alabeo permanente por construcción elegido. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve altamente sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho.

Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.

- El parámetro Módulo de Ruptura presenta una sensibilidad baja a alta para largos de losa 3 y 4 [m] la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Esta sensibilidad es mayor a medida que el valor Alabeo permanente por construcción es menor. Cumplir con el límite impuesto es muy dependiente de la estación climática, el tráfico y el valor de Alabeo permanente por construcción elegido. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve altamente sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho. Esto es más marcado para las estaciones climáticas de Arica y Santiago.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.
- El parámetro Resistencia a la Compresión Cilíndrica presenta una sensibilidad baja a alta para largos de losa 3 y 4 [m] la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Esta sensibilidad es mayor a medida que el valor Alabeo permanente por construcción es menor. Cumplir con el límite impuesto es muy dependiente de la estación climática, el tráfico y el valor de Alabeo permanente por construcción elegido. Sin embargo, para largo de losa de 4.5 [m], a medida que cambia el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio de desempeño Agrietamiento transversal se vuelve altamente sensible, además de que a menores valores de Alabeo permanente por construcción no se cumple el límite impuesto por mucho. Esto es más marcado para las estaciones climáticas de Arica y Santiago.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Agrietamiento transversal es muy sensible al largo de losa, Alabeo permanente por construcción, estación climática y tráfico.

A continuación, los parámetros más sensibles en el criterio de desempeño Agrietamiento transversal:

- Coeficiente de Expansión Térmica:

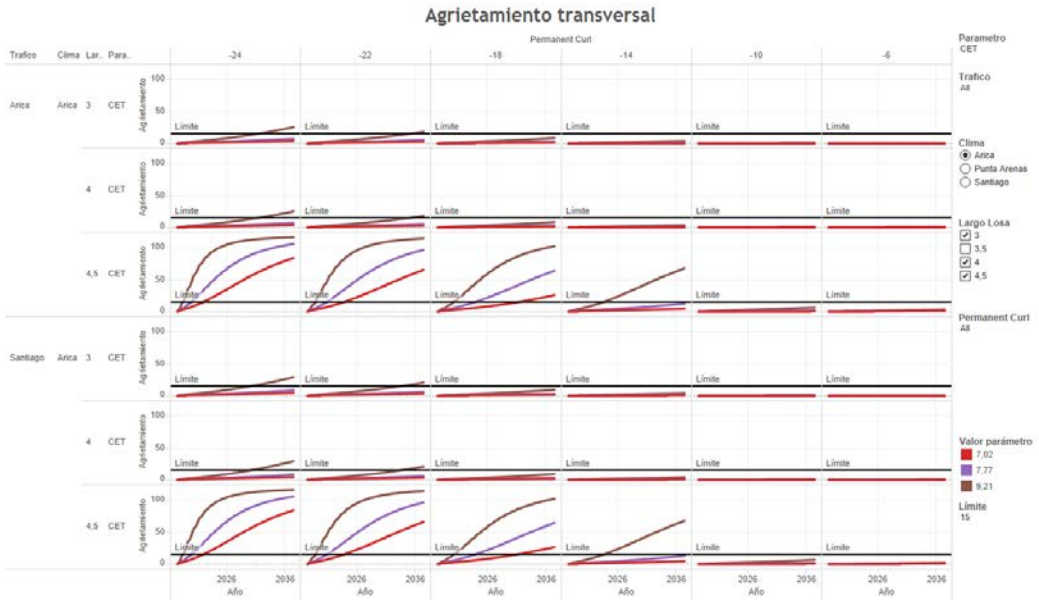


Figura 8.2-1: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

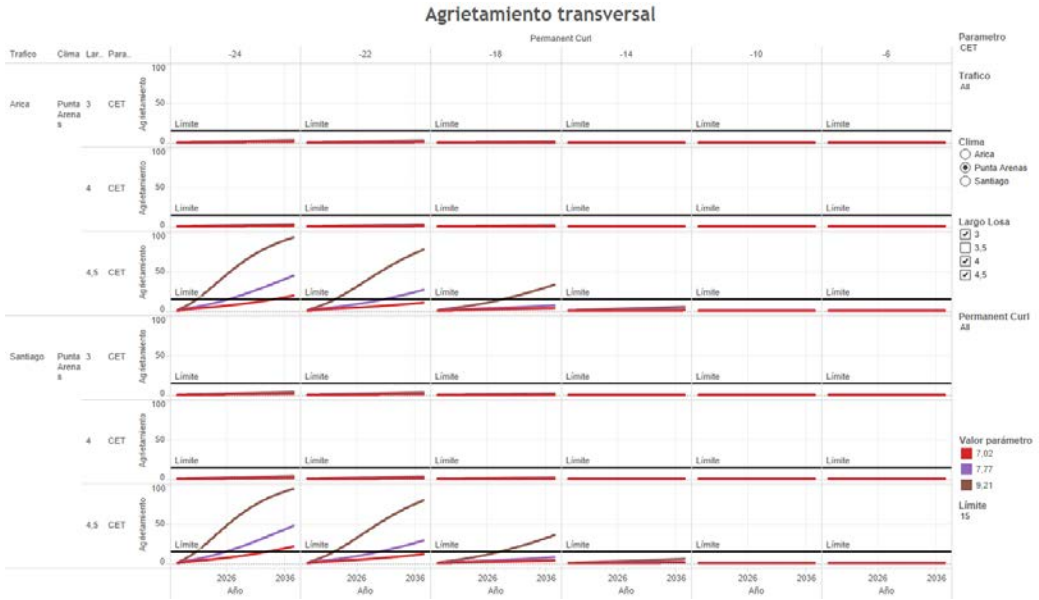


Figura 8.2-2: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

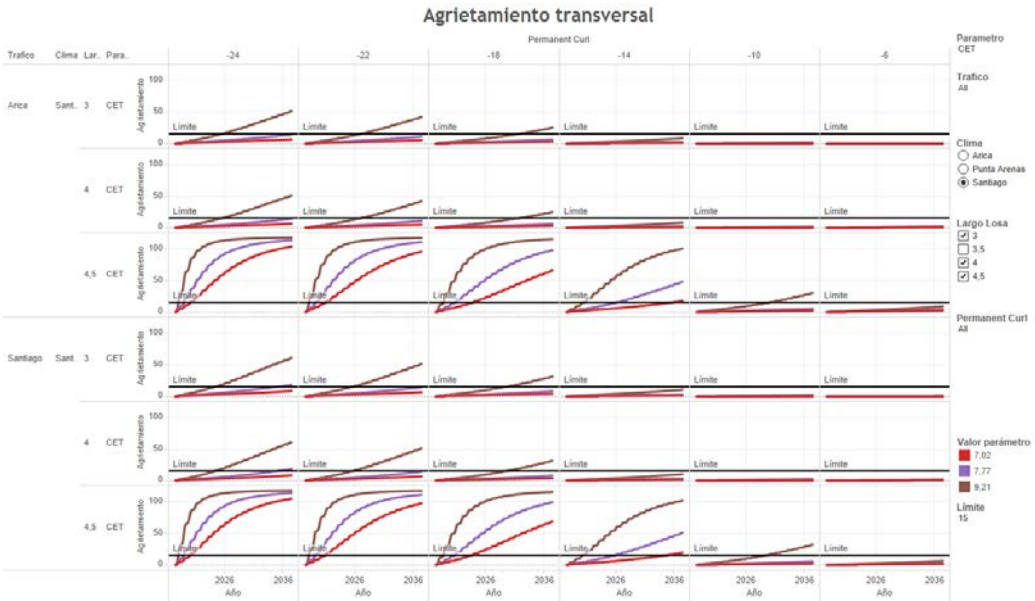


Figura 8.2-3: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

- Resistencia a la Compresión Cilíndrica:

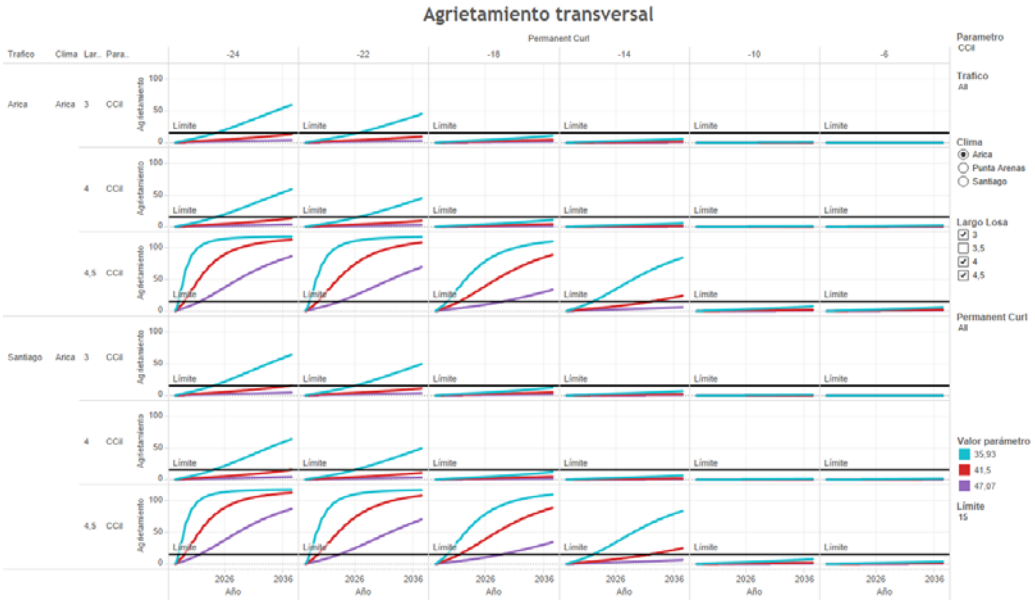


Figura 8.2-4: Sensibilización Resist. a la Compresión Cilíndrica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

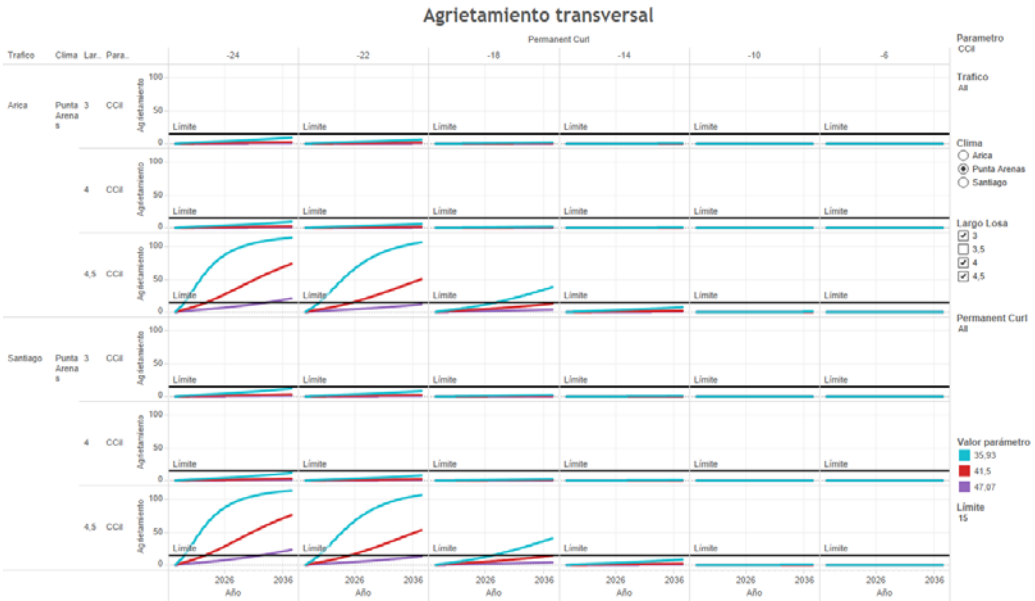


Figura 8.2-5: Sensibilización Resist. a la Compresión Cilíndrica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

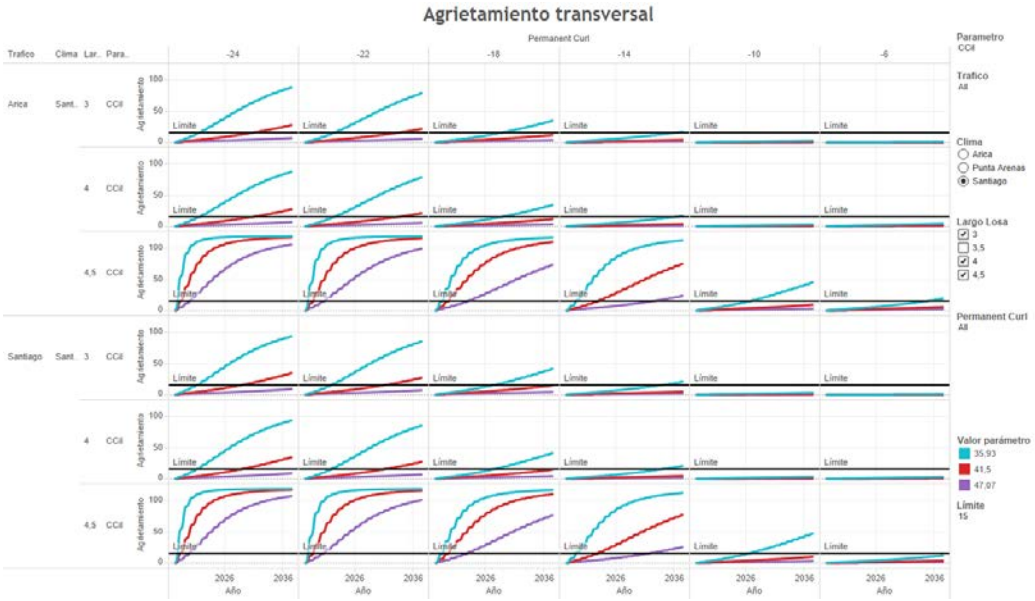


Figura 8.2-6: Sensibilización Resist. a la Compresión Cilíndrica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

A continuación, algunos parámetros no sensibles en el criterio de desempeño Agrietamiento transversal:

- Peso Unitario:

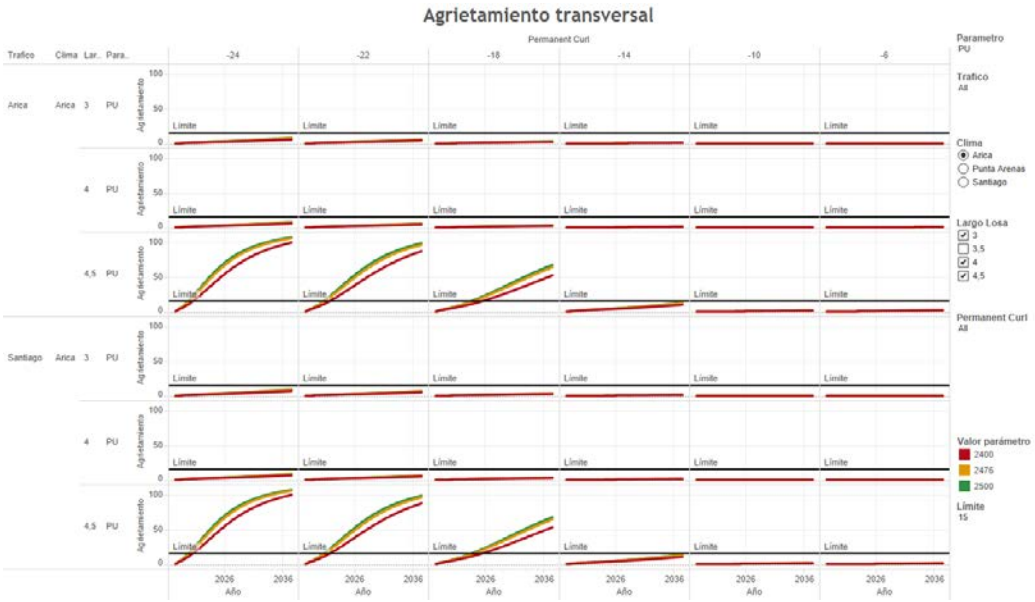


Figura 8.2-7: Sensibilización Peso Unitario - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

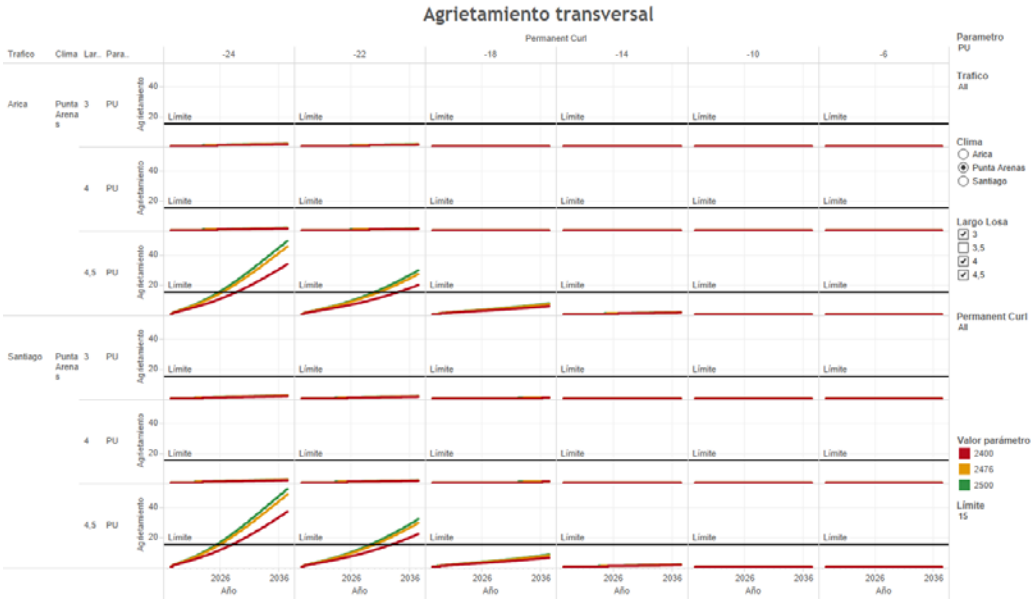


Figura 8.2-8: Sensibilización Peso Unitario - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

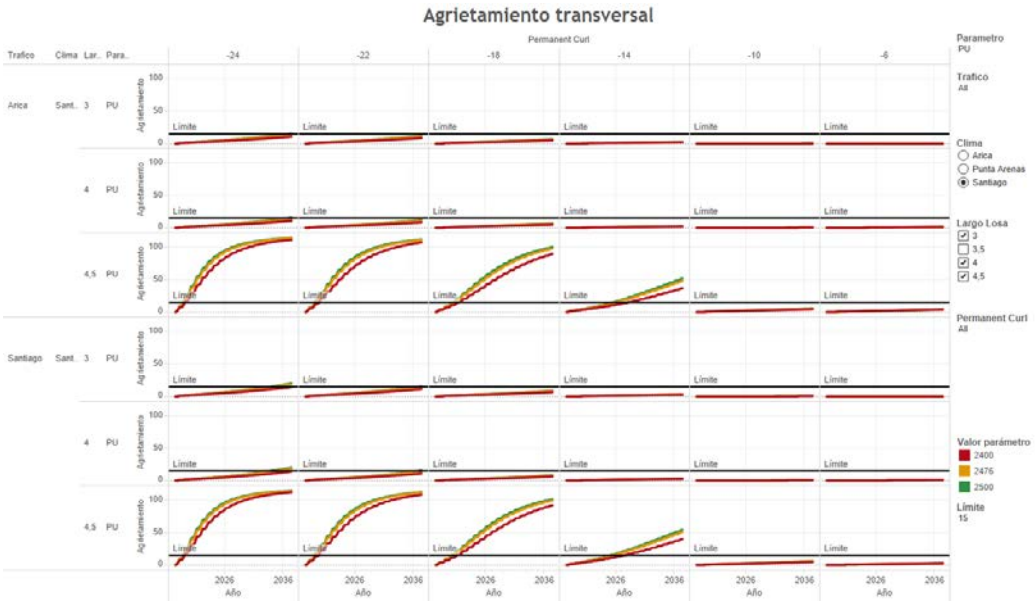


Figura 8.2-9: Sensibilización Peso Unitario - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

- Capacidad Calorífica:

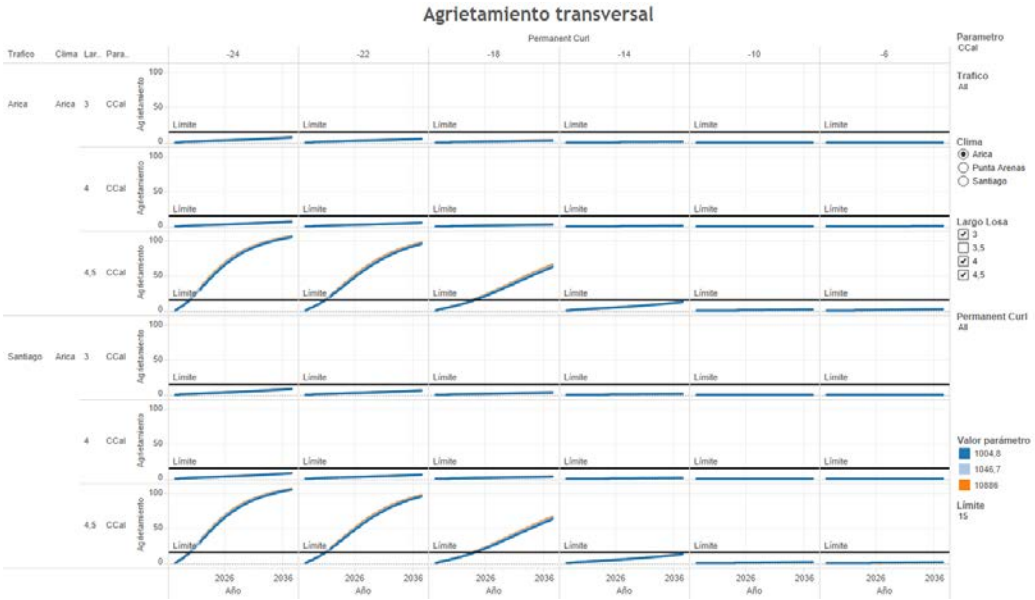


Figura 8.2-10: Sensibilización Capacidad Calorífica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

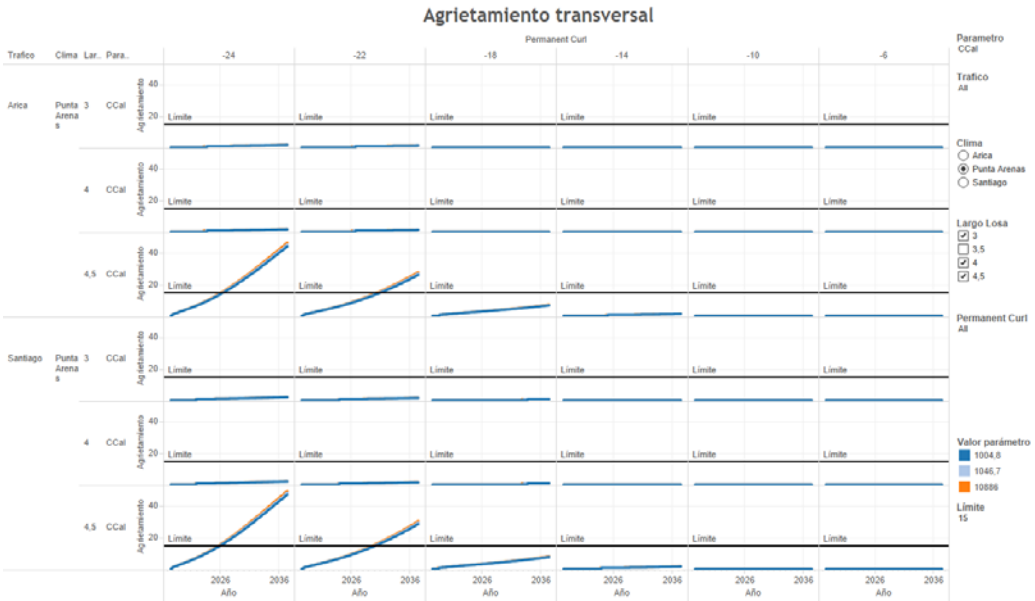


Figura 8.2-11: Sensibilización Capacidad Calorífica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

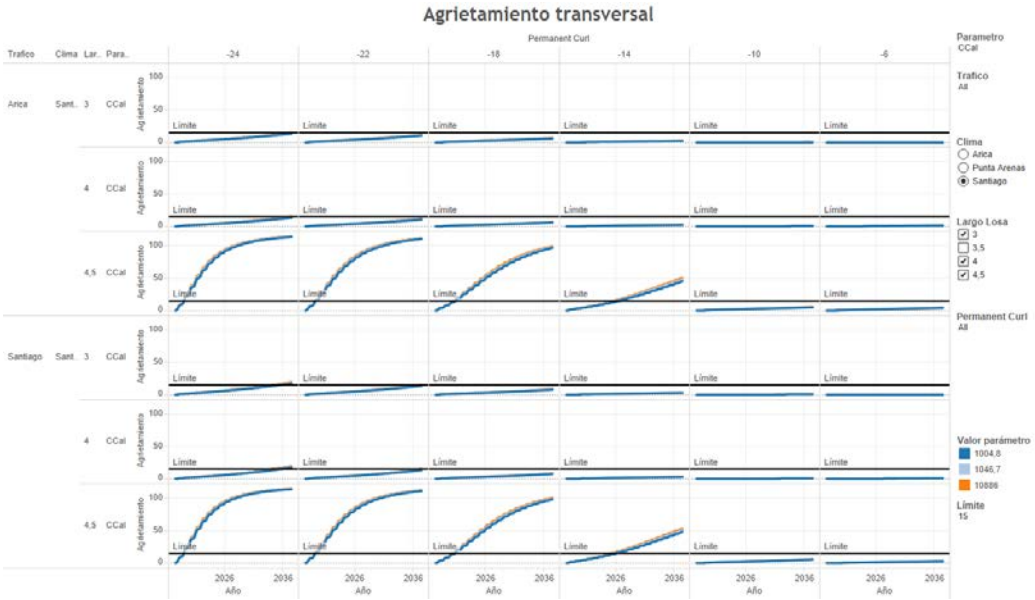


Figura 8.2-12:Sensibilización Capacidad Calorífica - Agrietamiento transversal (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

8.3. SENSIBILIDAD EN EL ESCALONAMIENTO

Teniendo en cuenta los largos de losa y valores de Alabeo permanente por construcción junto a los 13 parámetros necesarios para la caracterización del hormigón se realiza nuevamente el Análisis de Sensibilidad y obtenemos los siguientes resultados para el criterio de desempeño Escalonamiento:

- El parámetro Peso Unitario presenta una sensibilidad media a baja para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Razón de Poisson presenta una sensibilidad media a baja para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Conductividad térmica presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Capacidad Calorífica presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Absorción Superficial de Ondas Cortas presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta una sensibilidad media a alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo las más desfavorables, la estación climática de Punta Arenas y Santiago.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.

- El parámetro Contenido de Cemento presenta una sensibilidad media a alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción. Para las estaciones climáticas de Punta Arenas y Santiago no hay valores del parámetro que cumplan al fin de la vida útil de la vía. Para la estación climática de Arica hay algunos valores del parámetro que cumplen con el límite impuesto, pero también dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Razón Agua/Cemento presenta una sensibilidad media a alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción. Para las estaciones climáticas de Punta Arenas y Santiago no hay valores del parámetro que cumplan al fin de la vida útil de la vía. Para la estación climática de Arica hay algunos valores del parámetro que cumplen con el límite impuesto, pero también dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Temperatura de Esfuerzo Cero presenta una sensibilidad muy alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción. Para las estaciones climáticas de Arica, Punta Arenas y Santiago hay algunos valores del parámetro que cumplen con el límite impuesto, pero también dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más crítica la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Retracción Reversible presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Se observa que únicamente para la estación climática de Arica y valores de largo de losa de 3 y 4 [m] con valores de Alabeo permanente por construcción bajos (-6; -10; -14) se cumple el límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Módulo de Elasticidad presenta una sensibilidad baja a media para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño Escalonamiento se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción. Para las estaciones climáticas de Arica y Santiago hay algunos valores del parámetro que cumplen con el límite impuesto, pero también dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Para la estación climática de Punta Arenas no hay ninguna combinación que cumpla con el valor límite impuesto.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Módulo de Ruptura presenta una sensibilidad nula a media para todos los largos de losa, la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Esta sensibilidad es mayor a medida que el valor Alabeo permanente por construcción es menor. Cumplir con el límite impuesto es muy dependiente de la estación climática, el tráfico y el valor de Alabeo permanente por construcción

elegido. Para la estación climática de Arica con largo de losa 3 y 4 [m] y valores de Alabeo permanente por construcción (-4; -10) se cumple el límite impuesto. Para el resto de los casos, no se cumple.
Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.

- El parámetro Resistencia a la Compresión Cilíndrica presenta una sensibilidad nula a media para todos los largos de losa, la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Esta sensibilidad es mayor a medida que el valor Alabeo permanente por construcción es menor. Cumplir con el límite impuesto es muy dependiente de la estación climática, el tráfico y el valor de Alabeo permanente por construcción elegido. Para la estación climática de Arica con largo de losa 3 y 4 [m] y valores de Alabeo permanente por construcción (-4; -10) se cumple el límite impuesto. Para el resto de los casos, no se cumple.
Se puede concluir que el criterio de desempeño Escalonamiento es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.

A continuación, los parámetros más sensibles en el criterio de desempeño Escalonamiento:

- Temperatura de Esfuerzo Cero:

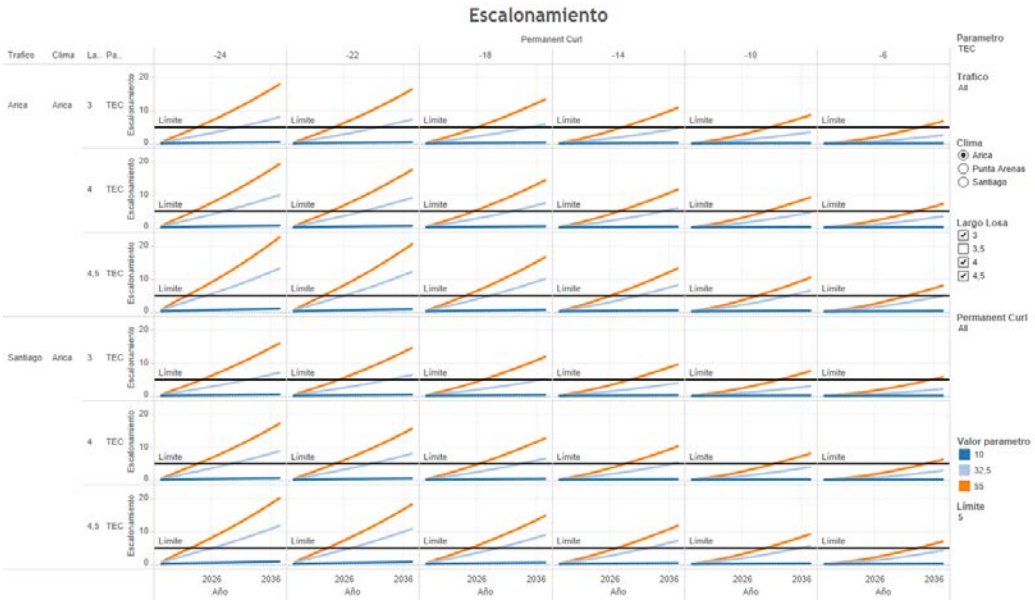


Figura 8.3-1: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

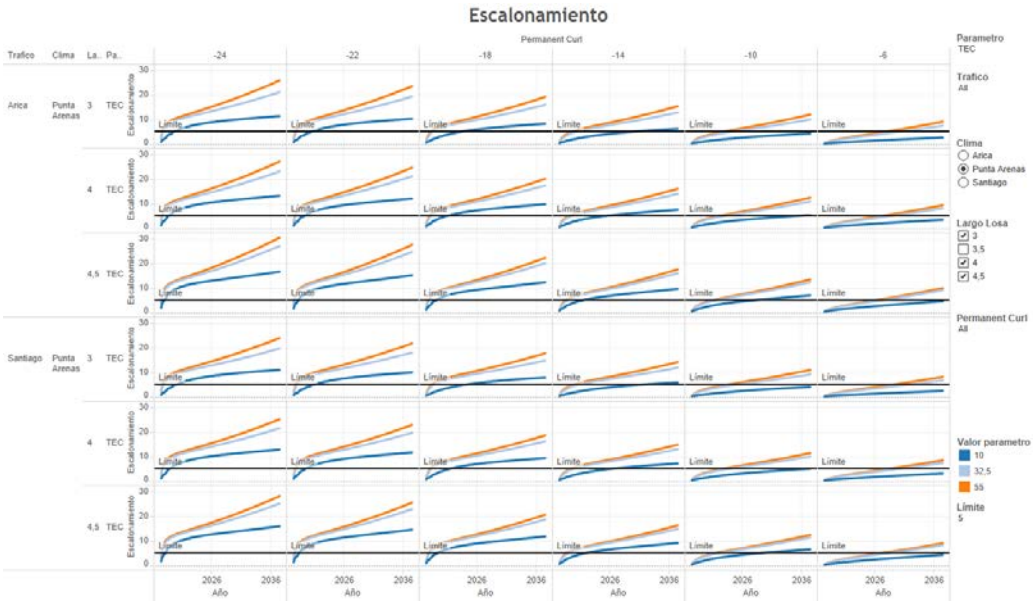


Figura 8.3-2: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

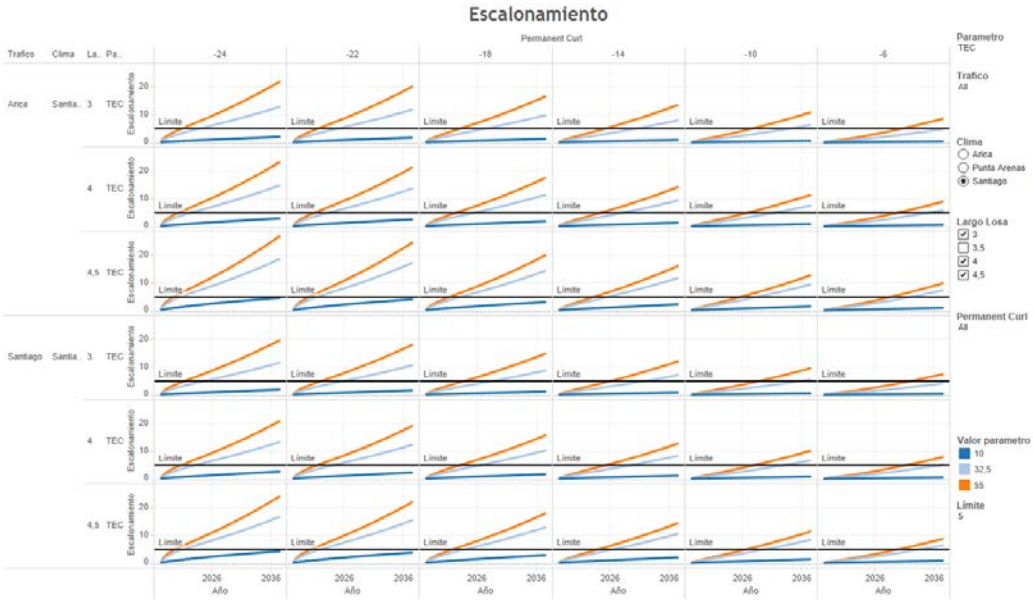


Figura 8.3-3: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

- Coeficiente de Expansión Térmica:

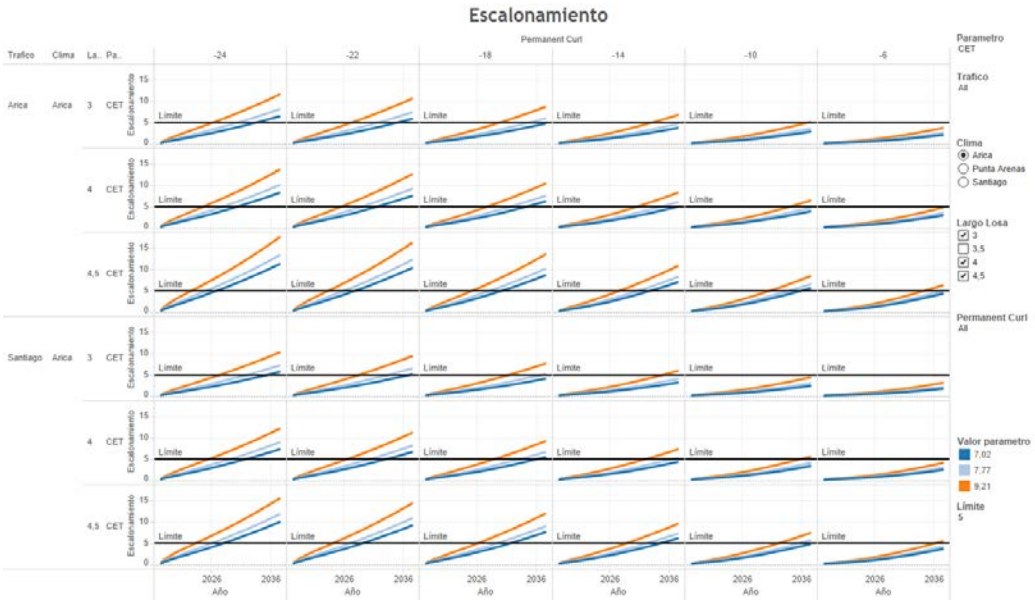


Figura 8.3-4: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

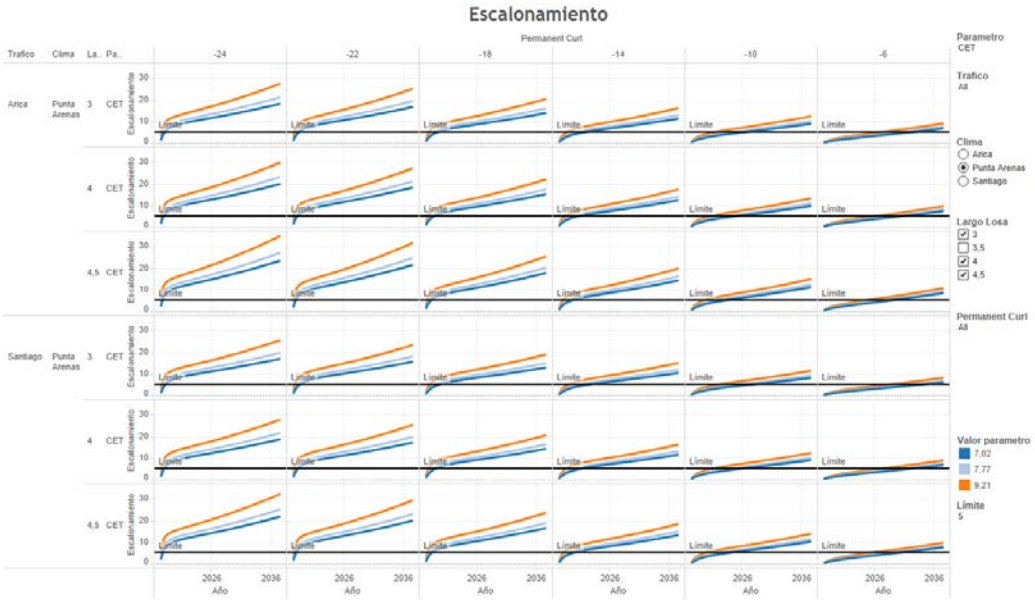


Figura 8.3-5: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

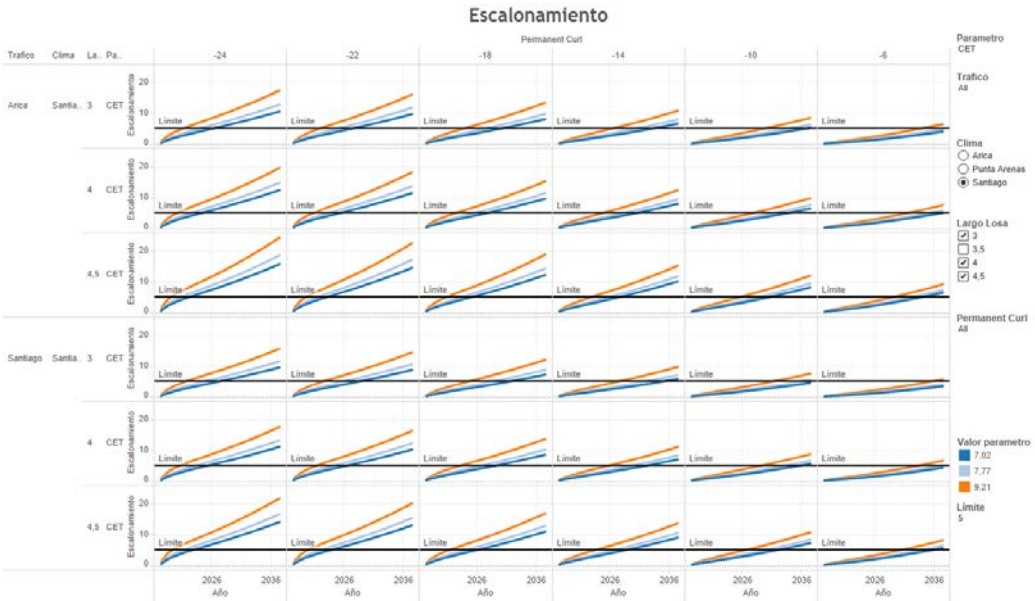


Figura 8.3-6: Sensibilización Coeficiente de Expansión Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

A continuación, algunos parámetros no sensibles en el criterio de desempeño Agrietamiento transversal:

- Retracción Reversible:

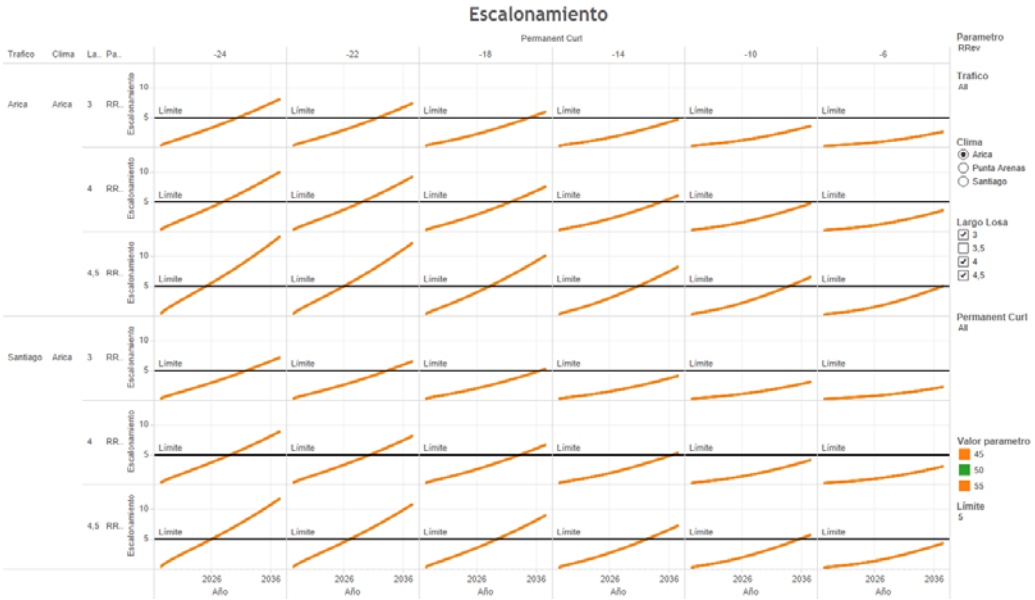


Figura 8.3-7: Sensibilización Retracción Reversible - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

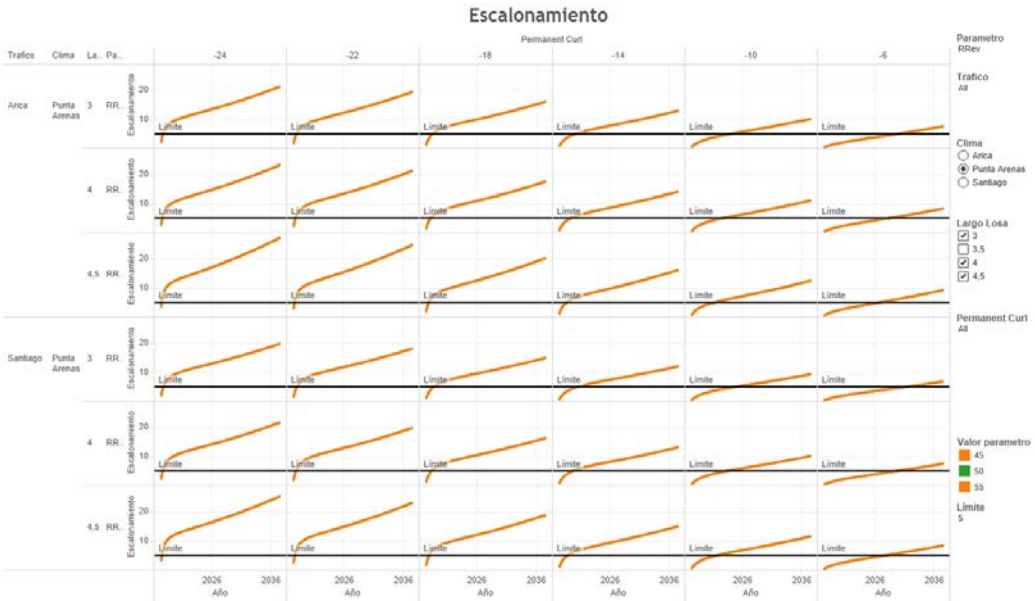


Figura 8.3-8: Sensibilización Retracción Reversible - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

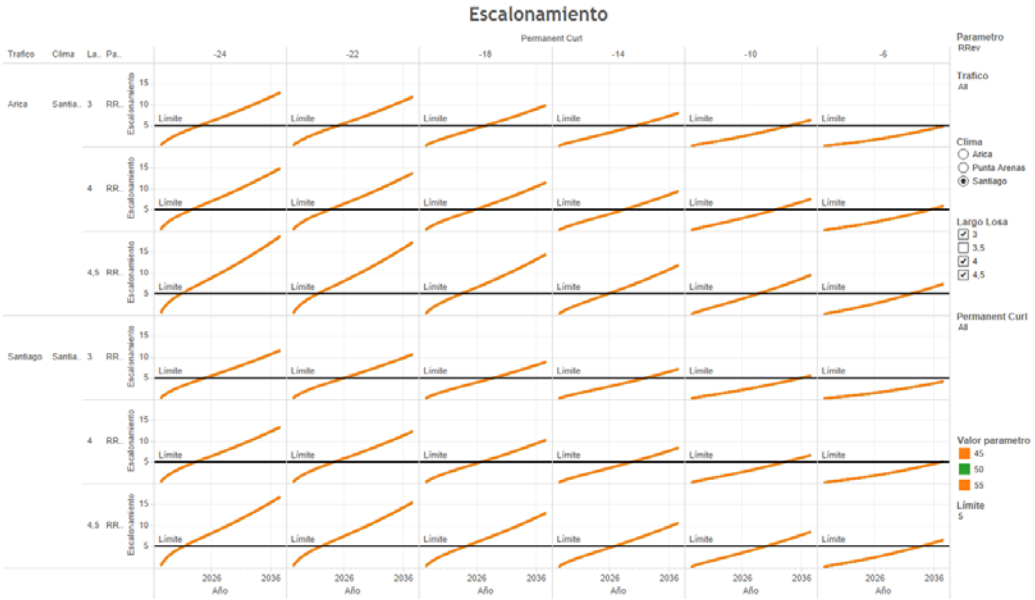


Figura 8.3-9: Sensibilización Retracción Reversible - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

- Conductividad térmica:

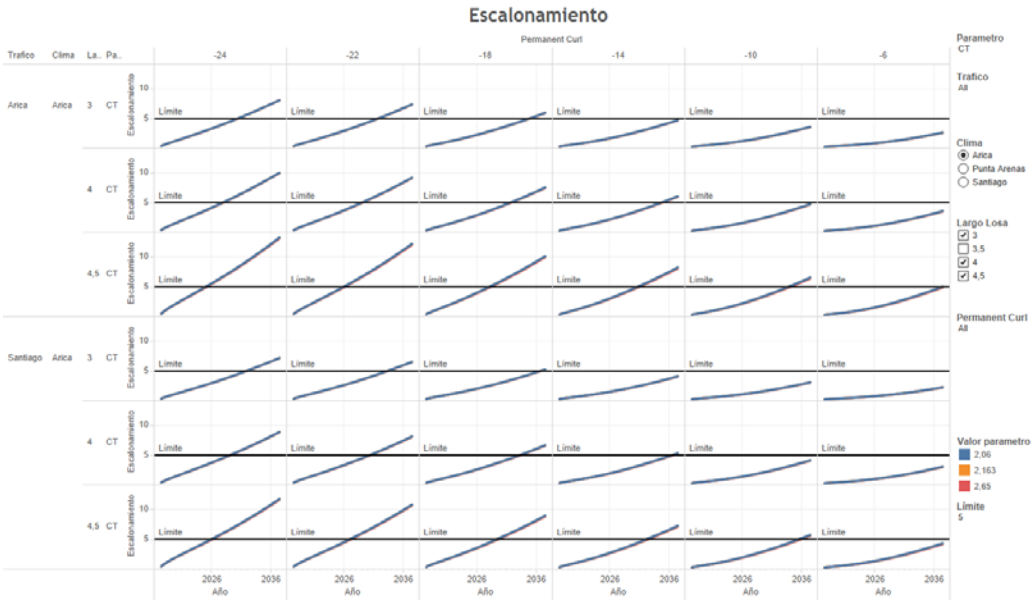


Figura 8.3-10: Sensibilización Conductividad Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

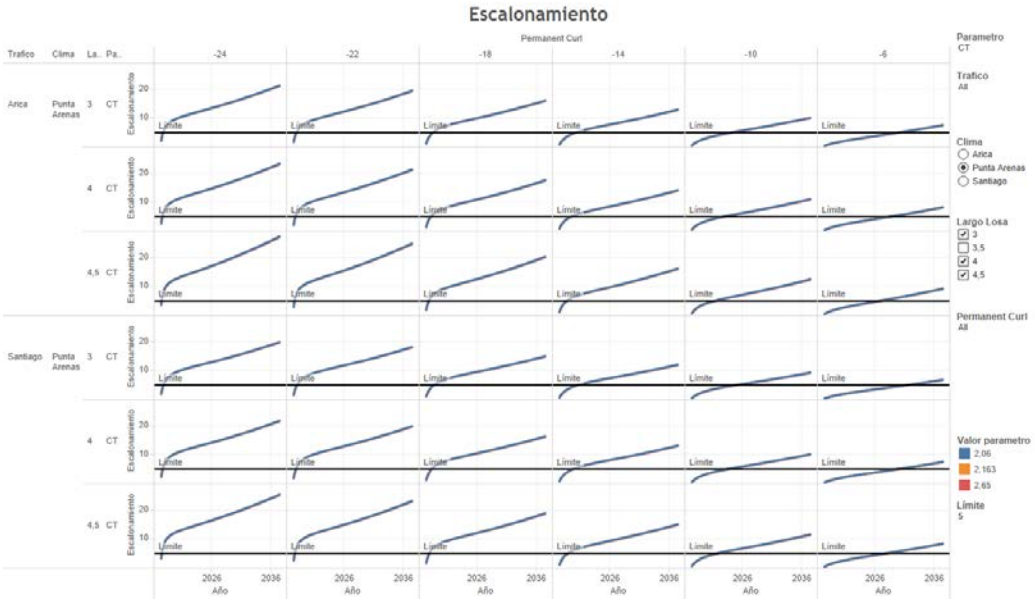


Figura 8.3-11: Sensibilización Conductividad Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

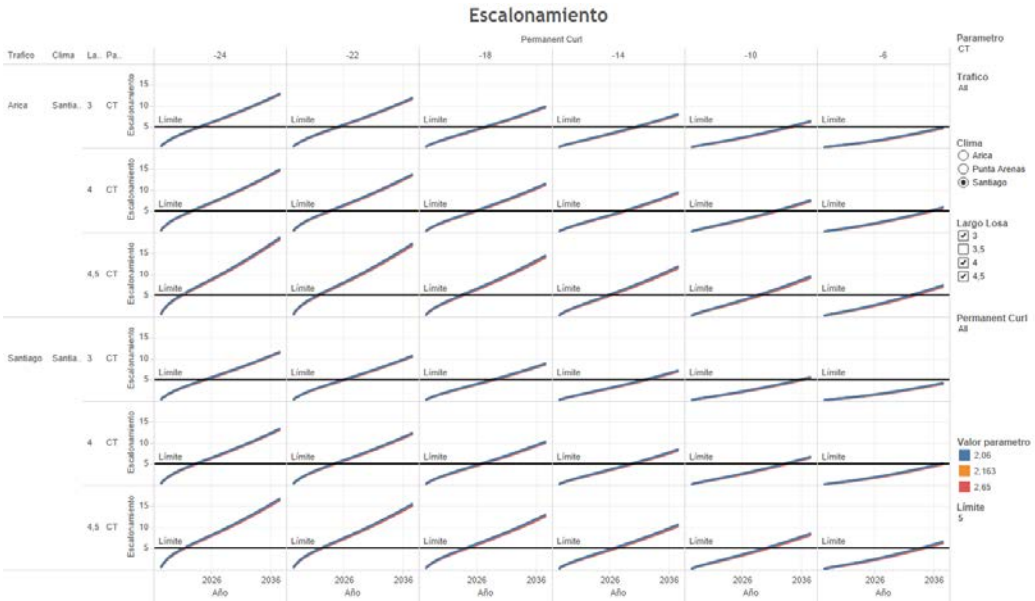


Figura 8.3-12: Sensibilización Conductividad Térmica - Escalonamiento (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

8.4. SENSIBILIDAD EN EL IRI

Teniendo en cuenta los largos de losa y valores de Alabeo permanente por construcción junto a los 13 parámetros necesarios para la caracterización del hormigón se realiza nuevamente el Análisis de Sensibilidad y obtenemos los siguientes resultados para el criterio de desempeño IRI:

- El parámetro Peso Unitario presenta una sensibilidad media a baja para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Razón de Poisson presenta una sensibilidad media a baja para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Conductividad térmica presenta una sensibilidad nula para los largos de losa 3 y 4 [m]. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción. Para la estación climática Punta Arenas la sensibilidad es nula. Para largo de losa 4.5 [m] la sensibilidad es baja a media, dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Capacidad Calorífica presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Absorción Superficial de Ondas Cortas presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta una sensibilidad alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.

- El parámetro Contenido de Cemento presenta una sensibilidad alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Razón Agua/Cemento presenta una sensibilidad alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Temperatura de Esfuerzo Cero presenta una sensibilidad muy alta para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Retracción Reversible presenta una sensibilidad nula para todos los largos de losa. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Módulo de Elasticidad presenta una sensibilidad nula para los largos de losa 3 y 4 [m]. Para largo de losa 4.5 [m] la sensibilidad es baja a media. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Módulo de Ruptura presenta una sensibilidad media a alta para todos los largos de losa, la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Respecto al valor límite impuesto para el criterio de desempeño IRI se observa que es completamente dependiente de la estación climática y del valor de Alabeo permanente por construcción, siendo la más desfavorable, la estación climática de Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.
- El parámetro Resistencia a la Compresión Cilíndrica presenta una sensibilidad nula a media para todos los largos de losa, la cual es muy dependiente del valor de Alabeo permanente por construcción. Esta sensibilidad es mayor a medida que el valor Alabeo permanente por construcción es menor. La estación más crítica en cuanto al límite impuesto es Punta Arenas.
  Se puede concluir que el criterio de desempeño IRI es muy sensible al Alabeo permanente por construcción y estación climática.

A continuación, los parámetros más sensibles en el criterio de desempeño IRI:

- Temperatura de Esfuerzo Cero:

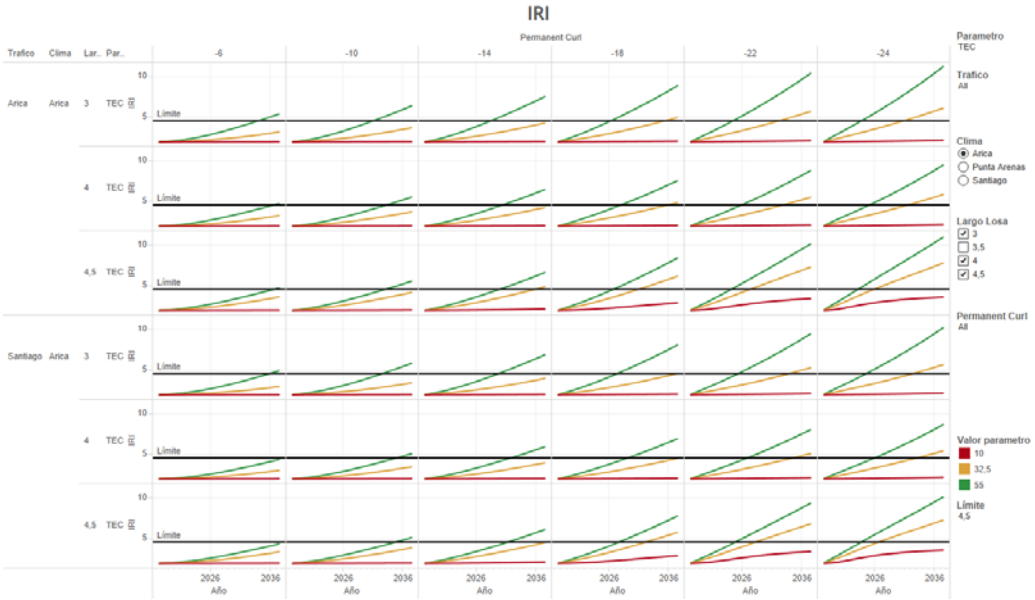


Figura 8.4-1: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

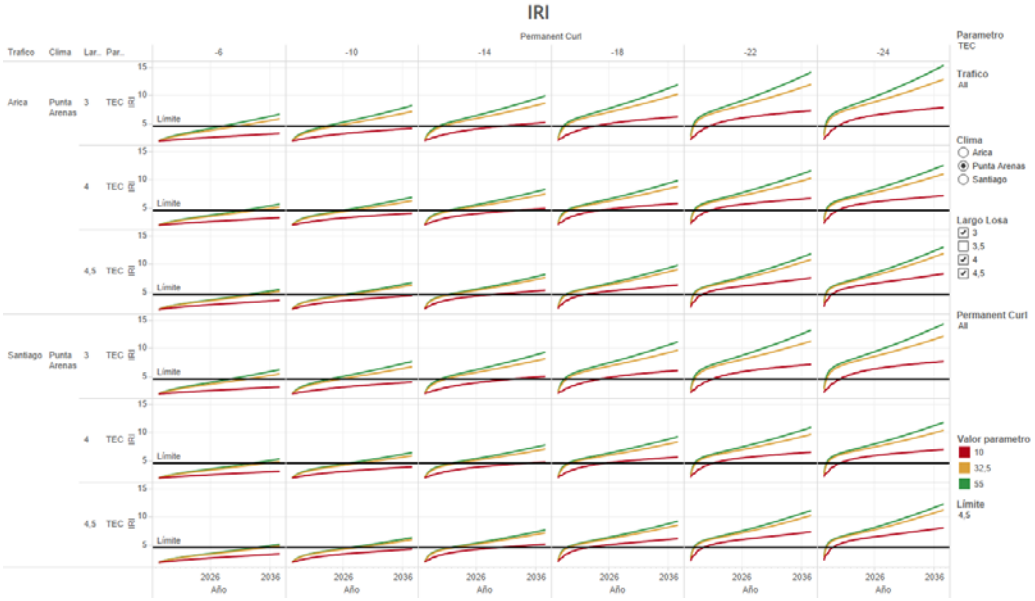


Figura 8.4-2: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

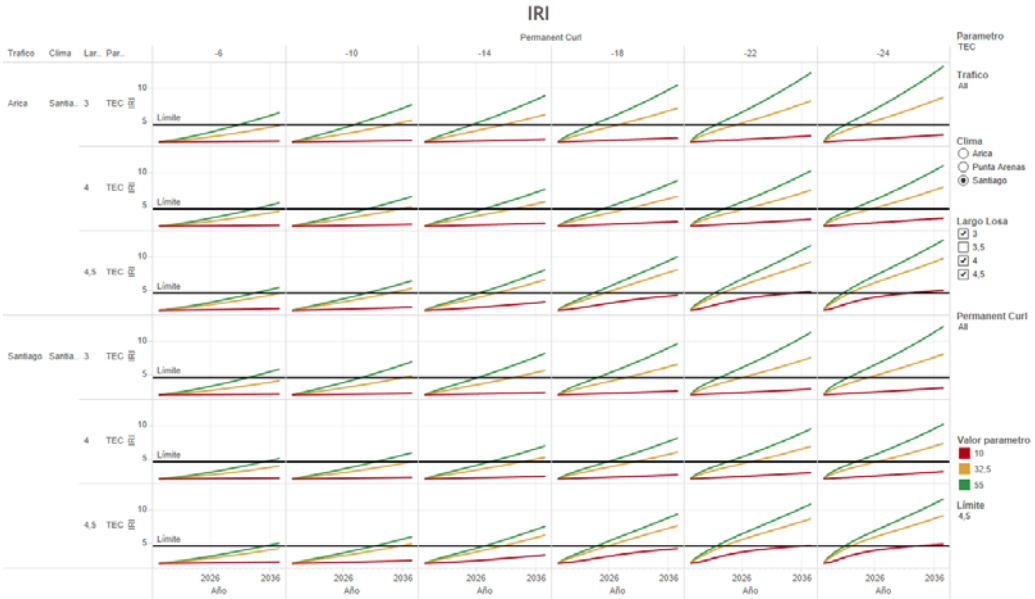


Figura 8.4-3: Sensibilización Temperatura Esfuerzo Cero - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

- Contenido de Cemento:

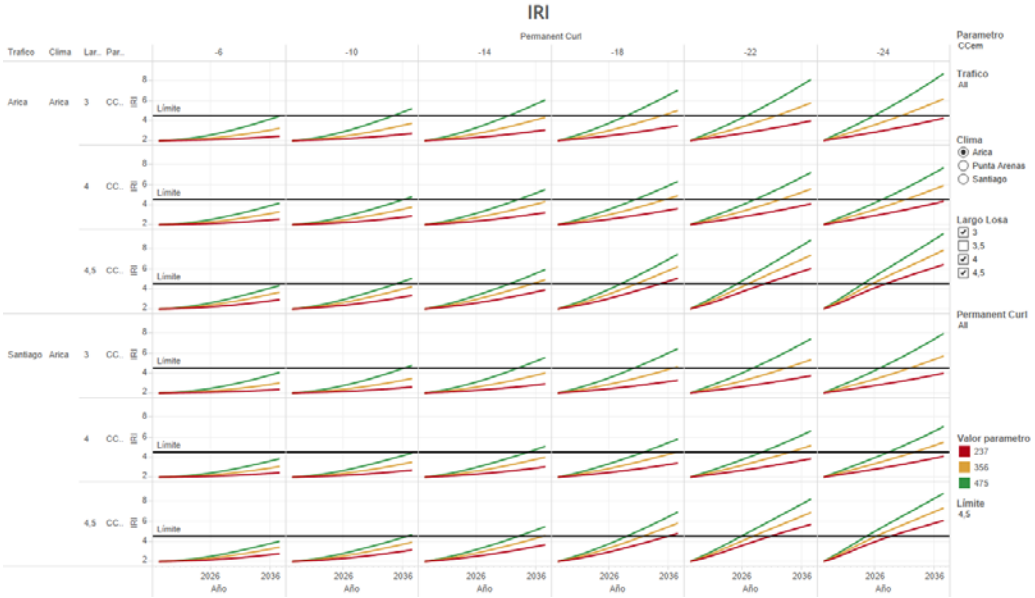


Figura 8.4-4: Sensibilización Contenido de Cemento - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

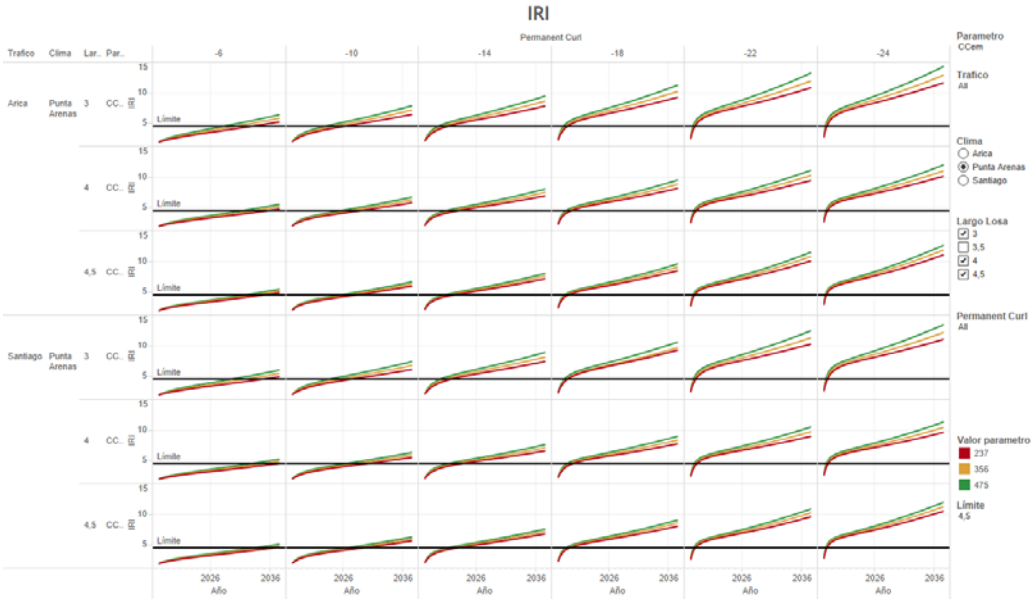


Figura 8.4-5: Sensibilización Contenido de Cemento - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

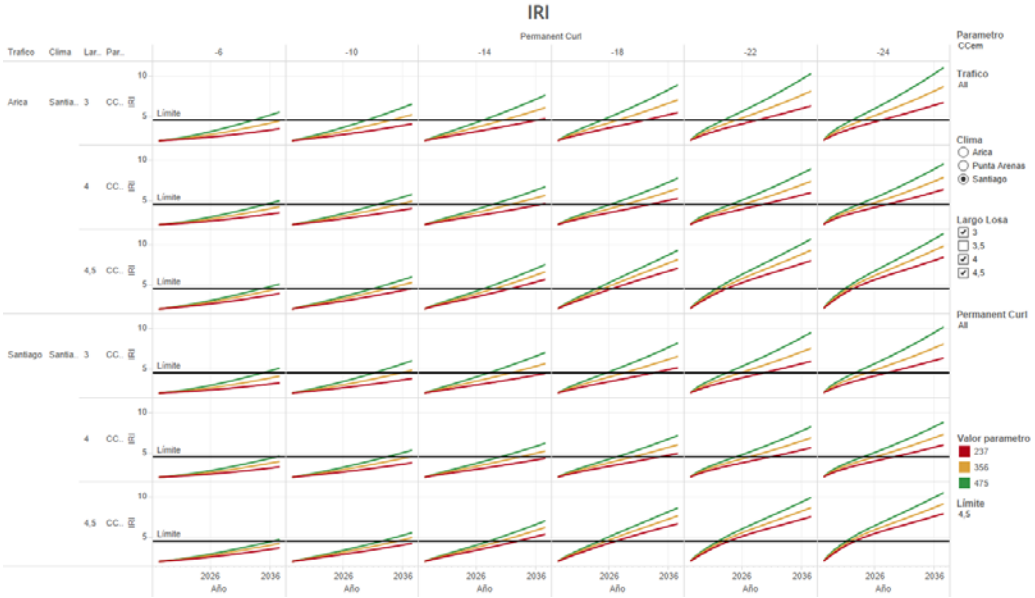


Figura 8.4-6: Sensibilización Contenido de Cemento - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

A continuación, algunos parámetros no sensibles en el criterio de desempeño IRI:

- Capacidad Calorífica:

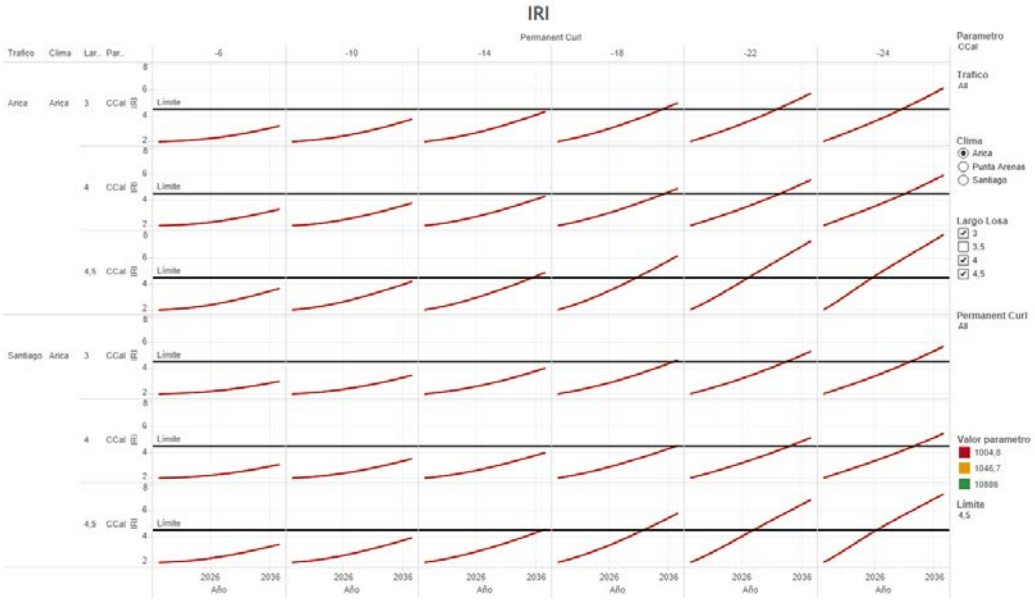


Figura 8.4-7: Sensibilización Capacidad Calorífica - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

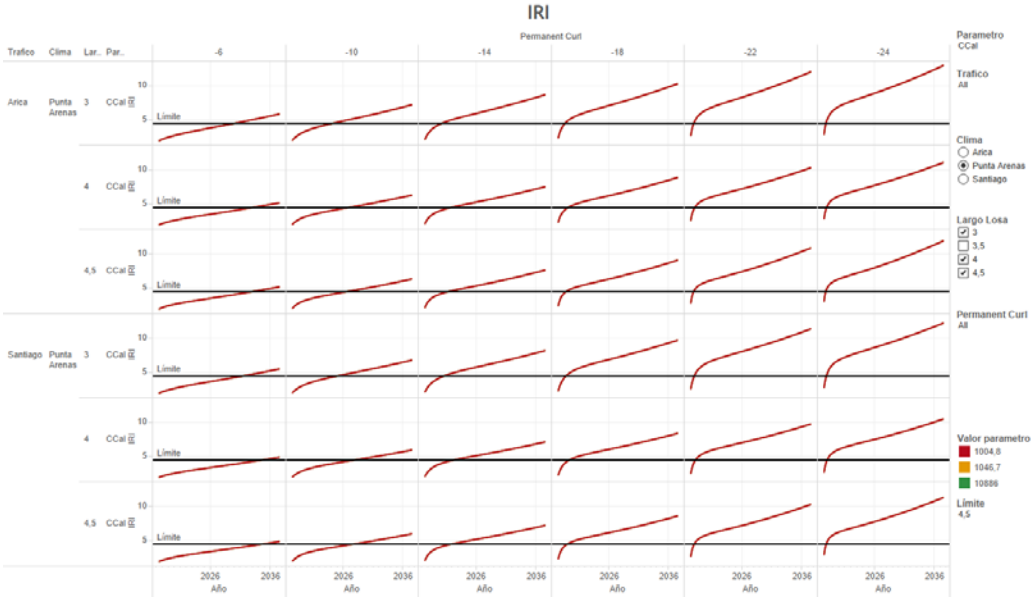


Figura 8.4-8: Sensibilización Capacidad Calorífica - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

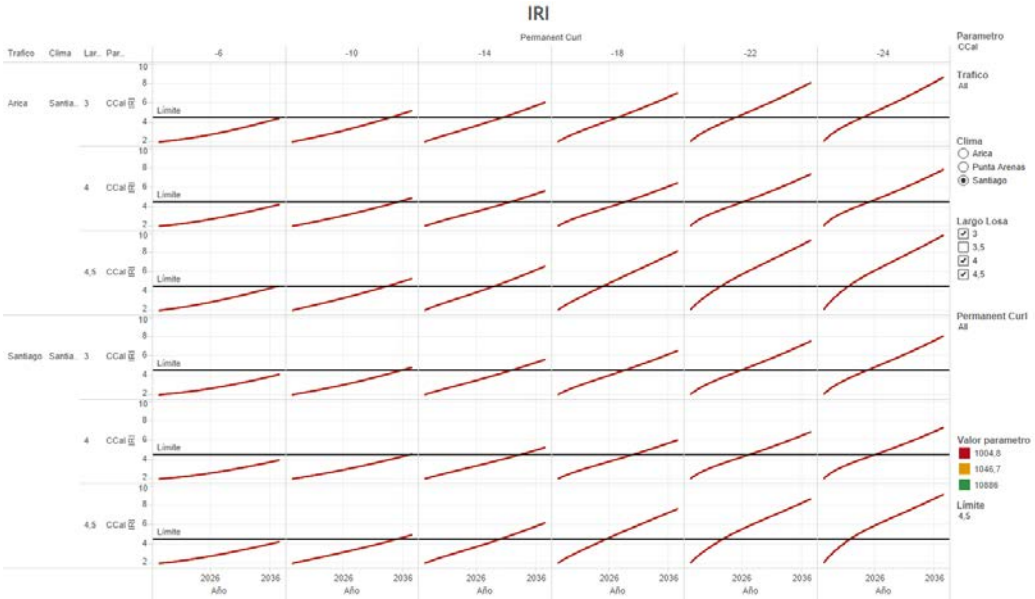


Figura 8.4-9: Sensibilización Capacidad Calorífica - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

- Retracción Reversible:

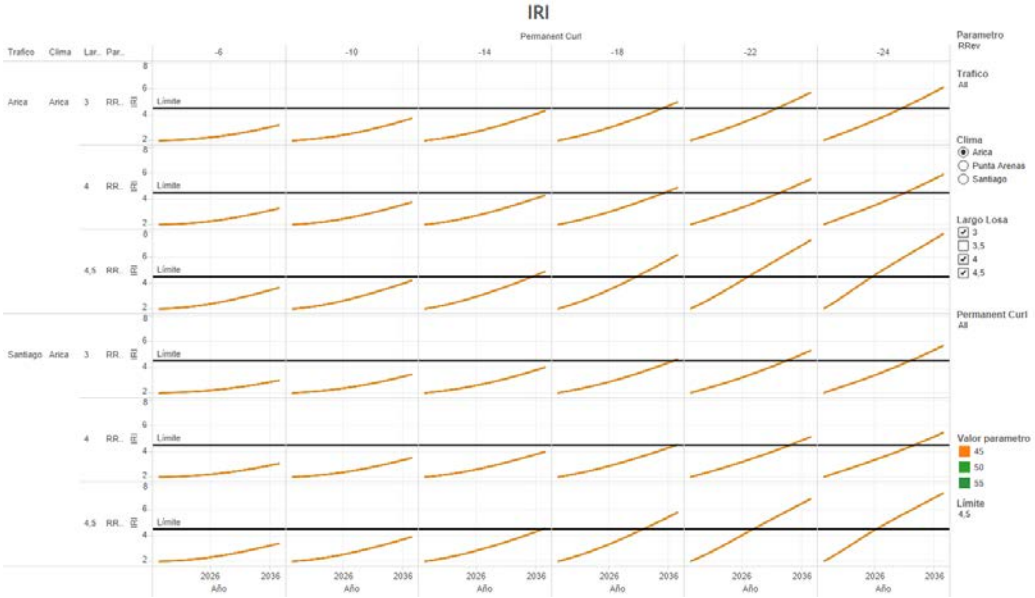


Figura 8.4-10: Sensibilización Retracción Reversible - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Arica)

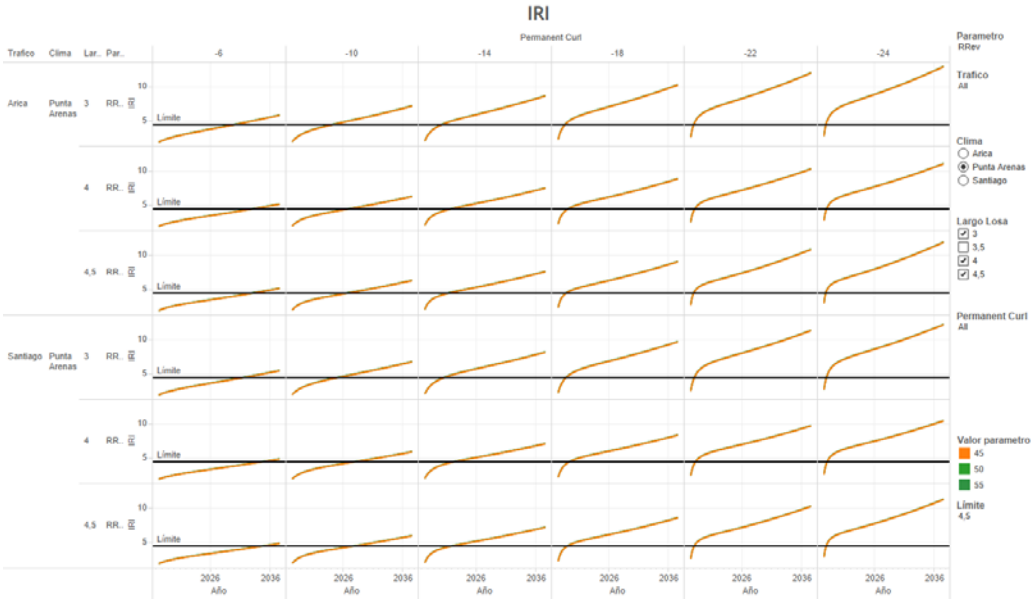


Figura 8.4-11: Sensibilización Retracción Reversible - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Punta Arenas)

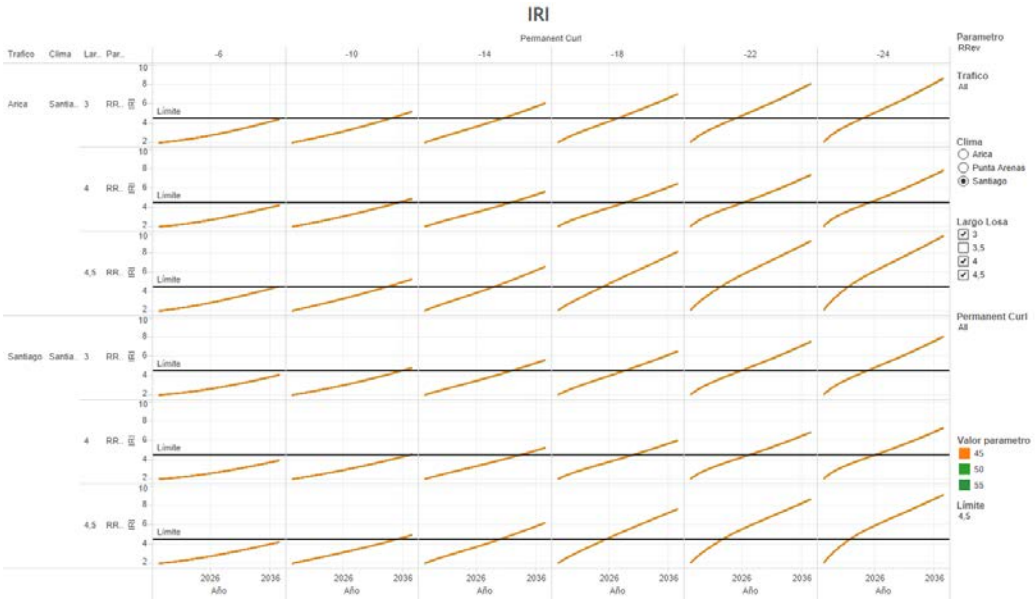


Figura 8.4-12: Sensibilización Retracción Reversible - IRI (Tráfico: Todos, Clima: Santiago)

9. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

De la comparación de los dos métodos de diseño de pavimentos rígidos expuestos en esta memoria, se puede concluir que actualmente en Chile, los hormigones de pavimentos se especifican solamente mediante la resistencia característica a la flexotracción asociada a una fracción defectuosa y a una cierta edad, datos que han pasado a ser insuficientes en la medida que los métodos de diseño de pavimentos han ido evolucionando. Métodos de diseño de pavimentos como la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos GEMDP AASHTO 2008 requieren de una especificación más detallada de los hormigones, que incluya propiedades mecánicas y térmicas de estos.

Se observan diferencias importantes en cuanto a la cantidad y calidad de los datos que requiere cada método. Mientras el método actual utilizado por los diseñadores chilenos caracteriza el tráfico, clima y materiales con muy pocos datos o mediciones y tablas que no llegan a representar fielmente la realidad actual, la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos requiere 17 parámetros solamente para caracterizar correctamente el hormigón. Esta diferencia en la cantidad de datos, viene también con un incremento tanto económico como laboral, el cual debe ser absorbido por las agencias gubernamentales o grandes empresas, ya que el beneficio a mediano y largo plazo es mucho mayor que la inversión.

Además de la cantidad de parámetros impuesta por el nuevo método, podemos indicar que el nivel de jerarquía para cualquier dato necesario en el diseño, representa una gran innovación, dando una total libertad al diseñador para adecuarse a las distintas situaciones y realidades que pueden enfrentar los involucrados. Esto significa que no necesariamente debes contar con los datos locales más exactos para comenzar el diseño de la vía; te permite destinar los recursos económicos a aquellos parámetros que prueben ser los más sensibles en los criterios de desempeño del pavimento, uno de los objetivos principales de esta memoria, y utilizar un nivel más general para el resto de los parámetros.

Respecto a la información de tránsito requerida por el método de la Guía Empírica – Mecanicista de Diseño de Pavimentos, el cambio más importante e innovador es el uso de los espectros de carga, que dejan atrás el antiguo concepto de Cargas de Eje Simple Equivalente (ESALS, por sus siglas en inglés). El principal beneficio de utilizar las distribuciones de carga (espectros de carga) es que proporcionan un enfoque más directo y racional para el análisis y diseño de las estructuras de pavimento. Este enfoque estima los efectos del tráfico actual sobre la respuesta del pavimento y las distintas fallas a las que está asociado el pavimento rígido. Estudios realizados sobre los espectros de carga (Delgadillo, 2011; Iturriaga, 2014) concluyeron que a pesar que la GEMDP AASHTO 2008 proporciona espectros de carga por defecto, estos no pueden ni deben usarse en la realidad chilena debido a que, si se consideran, se puede generar un sub o sobre dimensionamiento en el diseño. Esto demuestra que los espectros de carga en Chile son mucho más agresivos que los utilizados en Estados Unidos de América. La recomendación es realizar mediciones y recopilación de datos que puedan caracterizar el tráfico pesado chileno actual en las principales vías de conexión interurbanas para de esta forma, diseñar con la información más actualizada y fidedigna posible.

En el apartado de parámetros requeridos para la caracterización de los materiales, el método actual, como se dijo anteriormente, se limita a unos cuantos datos, mientras que el nuevo método de diseño empírico – mecanicista incrementa sustancialmente la cantidad. Introduciendo además parámetros que en sí mismos representan algo muy novedoso. Parámetros como Retracción Reversible o Temperatura de Esfuerzo Cero, no son medidos

rutinariamente debido a que requieren un largo periodo de tiempo para desarrollarse. Otros parámetros como Conductividad Térmica y la Absorción Superficial de Ondas Cortas, han sido recientemente incorporados en el diseño de pavimentos, se podría decir junto con este método empírico – mecanicista, por lo que no existe mucho conocimiento al respecto y las normas que especifican procedimientos para efectuar la medición de dichos parámetros se encuentran en desarrollo o directamente no existen.

El análisis de sensibilidad realizado de los parámetros necesarios para la caracterización de los materiales en los desempeños de los pavimentos nos provee de resultados interesantes. Claramente se puede observar que existen parámetros que son muy importantes en el diseño de pavimentos y con mayor razón si consideramos las condiciones chilenas. Es notable que pequeñas variaciones en un parámetro dado generan una gran diferencia en los criterios de desempeño del pavimento, validando así uno de los objetivos de esta memoria.

De los 13 parámetros considerados para realizar el análisis de sensibilidad de los criterios de desempeño de pavimentos, tomando en cuenta la información climática de Chile, el tráfico chileno y la calibración chilena de dichos modelos de deterioro, podemos concluir que hay ciertos parámetros que resultan cruciales para el diseño. Esto porque al menos dos de los tres criterios de desempeño tienen una sensibilidad muy alta respecto a dichos parámetros.

Tanto para el criterio de desempeño IRI como Escalonamiento, observamos que los parámetros “Coeficiente de Expansión Térmica”, “Contenido de Cemento”, “Razón Agua/Cemento” y “Temperatura de Esfuerzo Cero”, utilizando valores de la realidad chilena, son muy sensibles. Esta alta sensibilidad significa que, pequeñas variaciones en los valores adoptados al momento de diseñar, generan una gran diferencia en los criterios de desempeño antes mencionados. Esta gran diferencia puede generar que, mientras para un valor del parámetro cumple para otro valor muy parecido, el diseño no cumpla con los límites impuestos para cada criterio de desempeño involucrado. Esto demuestra la necesidad de realizar una caracterización completa y exhaustiva de los parámetros mencionados, previo al diseño del pavimento rígido, enfocando los recursos económicos y fuerza de trabajo en obtener valores con Nivel de Jerarquía 1, ya que estos asegurarán que el diseño final del pavimento cuente con la información completa y que los criterios de desempeño representen la realidad del lugar donde se construirá la vía.

Respecto al criterio de desempeño Agrietamiento transversal, los parámetros “Coeficiente de Expansión Térmica”, “Módulo de Elasticidad”, “Módulo de Ruptura” y “Resistencia a la Compresión Cilíndrica”, utilizando los valores obtenidos a través de memorias de titulación o estudios específicos que identifican la realidad chilena, generan en este la mayor sensibilidad. En este criterio en particular, una pequeña variación de los cuatro parámetros antes mencionados, genera una diferencia muy grande, la cual debe ser analizada, dado que, para el resto de los 13 parámetros, la sensibilidad del criterio de desempeño Agrietamiento transversal es prácticamente nula o muy baja.

El resto de los parámetros tienen una variabilidad de sensibilidad en los criterios de desempeño que va a de nula a media, predominando una baja sensibilidad, considerando tanto IRI, Escalonamiento como Agrietamiento transversal. A pesar de que dichos parámetros presentan una sensibilidad baja, es igual de importante, necesario y recomendable realizar una caracterización completa de estos parámetros en los materiales que se utilizarán en la construcción de la vía. Contar con la información más actualizada y precisa siempre traerá beneficios al diseño.

Es importante recalcar que los resultados mencionados anteriormente y obtenidos del análisis de sensibilidad de los criterios de desempeño para un parámetro dado, se obtuvieron considerando un Largo de Losa = 3.5 [m] y Alabeo permanente por construcción = -10 [°C]. Estos dos parámetros permanecieron constantes a lo largo de dichos análisis.

Los estudios de análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados en el diseño de pavimentos rígidos utilizando la Guía Empírico – Mecanicista de Diseño de Pavimentos AASHTO 2008 realizados internacionalmente difieren en cuanto a lugar de realización, metodología, parámetros considerados, datos iniciales e históricos muy distintos, calibración de modelos de deterioro, etc., por lo que realizar una comparación directa entre este estudio y aquellos sería algo infructífero. Sin embargo, como todos los estudios de este tipo, en la mayoría de los ámbitos científicos, proveen de una bibliografía y referencias muy buenas. Es así que, observamos que el parámetro Coeficiente de Expansión Térmica presenta la mayor sensibilidad, tanto en los resultados de esta memoria como de los estudios internacionales, siendo los tres criterios de desempeño (IRI, Escalonamiento y Agrietamiento transversal) muy sensibles a pequeñas variaciones de este parámetro. También observamos que el parámetro Módulo de Ruptura es muy sensible considerando el criterio de desempeño Agrietamiento trasversal. En los estudios internacionales más relevantes, este parámetro es considerado como uno de los más importantes para el criterio de desempeño Agrietamiento transversal, junto al mencionado, Coeficiente de Expansión Térmica.

Una diferencia importante entre los estudios internacionales y esta memoria, se da en el parámetro Peso Unitario, el cual, de manera similar en la mayoría de los estudios, obtiene un valor de Muy sensible para los 3 criterios de desempeño de pavimentos rígidos. En esta memoria se obtiene un valor de sensibilidad de medio a bajo. Al respecto concluimos que en la práctica del día a día, el valor de este parámetro está estandarizado y se asume constante para fines de diseño. Se podría dar variaciones muy pequeñas de este valor, las cuales se estudiaron aquí y generaron resultados de sensibilidad bajos. Como recomendación, generar un estudio al respecto más profundo podría dar más claridad a esta diferencia.

Para el resto de los parámetros la comparación se torna más complicada, ya que directamente hay muchos parámetros que no se toman en cuenta o los resultados obtenidos difieren totalmente. Esto valida la importancia de calibrar los modelos de deterioro, obtener datos y condiciones chilenas y generar estudios locales, para así contar con resultados que respalden la elección o no de algún parámetro en particular y su respectivo nivel de jerarquía.

Respecto al análisis de sensibilidad teórico del largo de losa y Alabeo permanente por construcción, se concluye que los criterios de desempeño son muy sensibles a variaciones de estas dos variables. Ya en el análisis de sensibilidad de los criterios de desempeño para un parámetro dado, se pudo constatar la importancia de tanto el clima como el tráfico, dado que si para un clima, el criterio de desempeño cumplía con el límite impuesto, para otro clima y otro espectro de carga, este fallaba y sobrepasa el límite por mucho. En el análisis de sensibilidad del largo de losa y Alabeo permanente por construcción, los principales actores son la estación climática y el Alabeo permanente por construcción, generando resultados completamente inesperados. Se observa que mientras para un valor bajo de Alabeo permanente por construcción, el límite impuesto para decidir si se cumple o no el criterio de desempeño se encuentra muy sobredimensionado, para un valor un poco distinto, el diseño cambia radicalmente y nos encontramos con que el límite impuesto parecería equivocado, dado que el valor de falla es demasiado grande. Este análisis asume que el alabeo de construcción puede ser transformado en un alabeo térmico equivalente, lo

que no ha sido demostrado científicamente por ningún estudio previo. Los mecanismos de cambio de geometría que se generan durante la retracción plástica que genera parte del alabeo permanente no son equivalentes a las curvaturas de los alabeos térmicos, fundamentalmente en la parte inferior de las losas, que es la parte relevante pues modifica las condiciones de apoyo.

Respecto al largo de losa, observamos que, para el criterio de desempeño Agrietamiento transversal, un largo de losa = 4.5 [m] es muy perjudicial, ya que manteniendo constante el valor de Alabeo permanente por construcción, el criterio cumple para largos de losa de 3 y 4 [m], mientras que para un largo de losa de 4.5 [m], el resultado final difiere en demasía del límite impuesto. Respecto a los criterios de desempeño IRI e Escalonamiento, observamos que el largo de losa no es un parámetro sensible, ya que, a mismo valor de Alabeo permanente por construcción, los resultados al final de la vida útil de la vía son muy parecidos o los mismos. Sin embargo, en esta misma situación y para estos dos criterios, si modificamos el valor de Alabeo permanente por construcción, los diseños que cumplían para un largo de losa de 4.5 [m], no cumplen para dicho largo de losa.

Del análisis de sensibilidad teórico realizado se puede concluir que un menor largo de losa (3 [m]) genera una menor cantidad de corridas con criterios de desempeño por encima del valor límite impuesto. Esta conclusión no se puede generalizar a los tres tipos de criterio de desempeño (IRI, Escalonamiento y Agrietamiento transversal) y tampoco aplica a todos los climas y tráficos. Es necesario profundizar el tema, pero para efectos de esta memoria, un largo de losa = 3 [m], genera diseños de pavimentos con el mejor desempeño.

En este análisis de sensibilidad teórico, se produce una gran diferencia entre la sensibilidad aportada por los 13 parámetros necesarios para la caracterización del hormigón y la sensibilidad del largo de losa, estación climática o valor de Alabeo permanente por construcción. Es tal la sensibilidad que aporta, por ejemplo, un cambio en el valor de Alabeo permanente por construcción o el largo de losa, que parámetros con una sensibilidad nula o muy baja, pasan a tener una sensibilidad muy alta y a ser determinantes en el diseño satisfactorio del pavimento rígido.

En general, para este análisis de sensibilidad teórico, no se puede tener una tendencia clara respecto a si alguno de los parámetros elegido, cumple el IRI, escalonamiento o agrietamiento transversal. Esto porque hay muchas variables que deben ser consideradas y definidas de forma correcta.

Se recomienda a futuro realizar más estudios sobre la influencia del largo de losa y Alabeo permanente por construcción en el diseño de pavimentos rígidos nuevos, ya que se comprobó que variaciones de este parámetro generan resultados muy distintos, además de que es necesario, así como en todos los parámetros del nuevo método de diseño empírico – mecanicista, saber que valores representan la realidad chilena de manera correcta. Utilizar el valor por defecto que entrega el software de la GEMDP AASHTO 2008 puede que genere un sub o sobre dimensionamiento en los diseños de pavimentos rígidos nuevos que actualmente se realizan en Chile.

Finalmente, el método empírico – mecanicista representa el estado del arte en diseños de pavimentos rígidos, y a nivel internacional representa la única forma correcta de realizar un diseño, dado los beneficios que genera y el carácter modular que presenta, permitiendo introducir mejoras e innovaciones a futuro sin generar algún atraso o cambio en la forma de trabajo. Chile debe desarrollar e impulsar a nivel gubernamental, estudios y mediciones que permitan caracterizar todos los parámetros y variables propias del país, ya que, como se demuestra en esta memoria, cambios pequeños y parámetros que anteriormente no se tomaban en cuenta, van a generar importantes diferencias en diseños futuros.

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO (1993). “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. U.S.A.

- AASHTO (2008). “Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice, Interim Edition”. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. U.S.A.

- ARA, Inc., ERES Consultants Division (2004), “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Design Inputs Manual”, National Cooperative Highway Research Program and Transportation Research Board, Report 1-37A, Washington, DC. U.S.A.

- Bravo M., (2014) “Medición del Coeficiente de Expansión Térmica en hormigones chilenos para pavimentos”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Burgos N. (2008) “Comparación de varias estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, Sector Polpaico – La Trampilla”, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Cisternas M. (2012) “Determinación de la Desviación Lateral del Tráfico para 3 casos de trazado en planta en pavimentos rígidos chilenos”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Constanzo R. (2011) “Efecto de la Desviación Lateral del tráfico en el diseño de losas cortas en una vía expresa, troncal y colectora”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Covarrubias J. MSc, PhD (2006) “Concrete Pavements with Small Size Slabs for Heavier Loads or Thinner Slabs”, Santiago, Chile.

- Covarrubias J., Roesler J., Roco V., Binder C. “Effect of Built-In Curling on Concrete Pavement Performance and Design in Chile”, Santiago, Chile.

- de Solminihac H., Salsilli R., Kohler E., Bengoa E. (2003) “Analysis of Pavement Serviceability for the AASHTO Design Method: The Chilean Case”, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 28, Number 2B.

- Delgadillo R., Wahr C., Alarcon J.P. (2011) “Towards the Implementation of the MEPDG in Latin-America, preliminary work carried out in Chile”, Civil Engineering Department, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Dzotepe G., Ksaibati K. Ph.D., P.E (2010) “Implementation of the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)”, Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, Laramie, WY, U.S.A.

- Elzo I. (2014) “Variables sensibles en el diseño de pavimentos rígidos en el contexto de la MEPDG para futuros proyectos de medición y bases de datos”, Adaptación y aplicación de la Guía Empírico Mecanicista de Pavimentos de Hormigón AASHTO 2009 GEMDP de EEUU, Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, Santiago, Chile.

- Guclu A., Ceylan H., Gopalakrishnan K., and Kim, S. (2009) “Sensitivity Analysis of Rigid Pavement Systems Using the Mechanistic-Empirical Design Guide Software”, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 135, No. 8, pp 555-562.

- Hanna A. (2013) “Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction”, Research Results Digest 372, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC. U.S.A.

- Hein D., Sullivan S. (2012) “Concrete Coefficient of Thermal Expansion (CTE) and its significance in Mechanistic-Empirical Pavement Design”, Presentation at the Advances in Pavement Evaluation and Instrumentation of the 2012 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, New Brunswick, Canada.

- Informe Final (2014) “Adaptación y Aplicación de la Guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos de Hormigón AASHTO 2008 GEMDP de EEUU”, Proyecto INNOVA 11BPC-10220, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Iturriaga F. (2014) “Análisis de Espectros de Carga para 6 plazas de pesaje chilenas y 4 “WIM” Zona urbana Santiago Norte, y su influencia en el desempeño de los pavimentos de hormigón”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- John R. Stone, PhD, Youngsoo R. Kim, PhD, George F. List, PhD, William Rasdorf, PhD, Fatemeh Sayyady, Fadi Jadoun, and Aditya N. Ramachandran (2011) “Development of Traffic Data Input Resources for the Mechanistic Empirical Pavement Design Process”, North Carolina Department of Transportation, Raleigh, NC, U.S.A.

- Juárez M., (2013) “Análisis de Espectros de Carga para 4 plazas de pesaje chilenas ubicadas en Ruta 5 Norte y Ruta 5 Sur, y su importancia en el desempeño de los pavimentos de hormigón utilizados en Chile”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Manual de Carreteras (2013). Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Santiago, Chile.

- Manual de Carreteras (2016). Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Santiago, Chile.

- Méndez M., Alvarenga E. (2006) “Algunas consideraciones sobre el Parámetro Confiabilidad (R) utilizado en el diseño de pavimentos según AASHTO 1993”, Ministerio de Obras Públicas, Transporte, y de Vivienda y Desarrollo Urbano, República de El Salvador.

- Nuñez A. (2013) “Análisis de Espectros de Carga para 3 plazas de pesaje chilenas, Zona Centro Sur, y su influencia en el desempeño de los pavimentos de hormigón”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Oda, J. (2013). Caracterización de hormigones de pavimentos chilenos y estudio de sus desempeños mediante la GEMDP”. Memoria de titulación, Universidad Técnica Federico Santa María.

- Olavarría S. (2013) “Caracterización de Tránsito de vehículos pesados en base al Método AASHTO de Espectros de carga, para las Regiones XIV y X”, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

- SERVIU Metropolitano (1998). “Metodología para la Determinación de las Solicitaciones de Transito para el Diseño Estructural de Pavimentos, Región Metropolitana”, DICTUC. Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Schwartz C., Li R., Kim S., Ceylan H., Gopalakrishnan K. (2011) “Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction”, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, College Park, MD and Ames, IA, U.S.A.

- Tableau Desktop v10.1 Academic “www.tableau.com/products/desktop”

- Villalobos F. (2013) “Análisis de Espectros de Carga para 3 plazas de pesaje chilenas, Zona Centro Norte, y su influencia en el desempeño de los pavimentos de hormigón”, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Virginia Transportation Research Council Research Report (2010). “Analysis of Virginia – Specific Traffic Data Inputs for Use with the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide”, Bryan C. Smith, and Brian K. Diefenderfer, Ph.D., P.E., Charlottesville, VA, U.S.A.

- Yang, H. Huang (2004). Pavement Analysis and Design, 2a. ed., New Jersey, Prentice Hall.

- Zembo G. (2008) “Comparación de Diseños de Pavimentos Rígidos Nuevos”, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.