

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



APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA
EN LA TOMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN
DEL TIPO DE PAVIMENTO EN CHILE

Memoria de titulación presentada por
CARLOS RODRIGO SANHUEZA MEJÍAS

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mauricio Salgado Torres

Profesor Co-Referente
Rodrigo Delgadillo Sturla

Diciembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

Después de un largo proceso de formación académica, puedo decir que: Todo está hecho.

Pero esto no sería posible, si no fuese por todas esas personas que de alguna u otra forma, hacen que esto sea una realidad y sea necesario dedicarles algunas palabras.

De manera especial, mi padre Carlos Sanhueza, y mi madre Nancy Mejías; que me han entregado todo su amor y apoyo. Pero principalmente, por los valores y principios inculcados, para poder ser una persona correcta e íntegra.

A mi hermano Javier Sanhueza, amigos y compañeros de toda la vida; que con sus risas, compañerismo y empatía, lograron hacer más llevadera la vida universitaria.

A los profesores, por la entrega de conocimiento y herramientas necesarias, para el buen desempeño profesional.

Al profesor Mauricio Salgado, le agradezco su disposición de aceptarme como memorista y guiarme en cada paso, con mucha paciencia y simpatía, en el desarrollo de la presente memoria.

Finalmente, todo se lo debo al creador y sostenedor del universo. Quién siendo Dios, no estimo dejar su divinidad y ser uno semejante a mí, para que tú y yo pudiésemos vivir. Y ténganlo presente, mis queridos, que muy pronto se cumplirá: **“He aquí, viene con las nubes y todo ojo le verá, aun los que le traspasaron; y todos los linajes de la tierra harán lamentación por Él; sí. Amén”**.

RESUMEN

Habitualmente en nuestro país la selección del tipo de pavimento, se realiza a través de la alternativa con mínimo costo directo inicial. Esta forma de seleccionar, no considera las mantenciones y conservaciones que probablemente se deban ejecutar en el futuro, lo que trae como consecuencia el consumo de mayores recursos en el largo plazo.

Por lo anterior, en la presente memoria se plantea realizar un análisis del costo del ciclo de vida, con los diversos métodos de diseño de pavimentos vigentes o utilizados en Chile (AASHTO 93, AASHTO 98, MEPDG, OPTIPAVE y diseño MOP en asfalto); para cuatro volúmenes de tránsito y tres niveles de calidad del suelo, en la Zona Central del país. Para obtener las diversas mantenciones y/o conservaciones realizadas a los pavimentos, el programa HDM-4 versión 2.08, debió ser ajustado para modelar el desempeño de los diversos métodos de diseño, en un período de tiempo de 20 años. A través de una serie de criterios de falla (tanto en el IRI, agrietamiento, escalonamiento, etc), las conservaciones tipo ejecutadas en los pavimentos en Chile, son posibles de determinar. Finalmente, con precios vigentes utilizados por el Estado se obtiene el costo inicial y el costo del ciclo de vida, para cada una de las alternativas de pavimento.

Se presentan los resultados de los espesores obtenidos para las diversas capas que componen a un pavimento flexible o rígido. Además, se entregan los costos iniciales de cada una de las diversas alternativas de pavimento. A la vez, el análisis del costo del ciclo de vida es presentado para cada nivel de tránsito y ajustado a una curva del tipo exponencial, donde lo anterior está referido a la respectiva tasa de descuento real utilizado. Para ambos análisis de costos se desarrolla el comparativo al considerar el precio del asfalto durante el año 2008, y el de este en el año 2015, a manera de analizar el efecto que tiene la subida del petróleo en el asfalto.

Se concluye que el precio de las capas asfálticas, no es fácil de predecir ni de estimar ya que está relacionado a los vaivenes del precio del petróleo, lo que incide enormemente en los costos iniciales y del ciclo de vida. En los pavimentos de hormigón se hace necesario diseñar, para tránsitos medios y altos, considerando la realización de conservaciones del estilo de cepillados o implementando barras de transferencia de carga. Finalmente, el uso de altas tasas de descuento real, incentiva la realización de carreteras cuyo costo inicial sea el menor posible.

Palabras claves: análisis del costo del ciclo de vida (ACCV), pavimento asfáltico, pavimento de hormigón, losas cortas, conservación de los pavimentos, HDM-4.

ABSTRACT

In our country, the pavement type selection is often done through the option with lowest minimum direct initial costs. This selection method, does not consider the maintenances and conservations that probably will be executed in the future, which results in long-term greater resource consumption.

Accordingly, in this report it is posed to implement a life-cycle cost analysis (LCCA), with the different pavement design methods which are valid or used in Chile (AASHTO 93, AASHTO 98, MEPDG, OPTIPAVE and MOP asphalt design); for four traffic volumes and three ground quality levels, in the Central Zone of the country. To get the different paving maintenances/preservations, the software HDM-4 version 2.08 had to be adjusted for a period of twenty years. Through a series of failure criteria (such as IRI, cracking, faulting, among others) the standard conservations executed on the pavements in Chile, are possible to determine. Finally, with the current prices used by the Government, the initial cost and the life-cycle cost is obtained for each one of the paving alternatives.

The results of the obtained thicknesses are shown for the different layers that conform a flexible or rigid pavement. Besides, the initial costs for each of the road alternatives are exposed. At the same time, the life-cycle cost analysis is presented for each traffic level, adjusted to an exponential curve, where the previously mentioned data is referred to the respective real discount rates utilized. For both cost analyses, the comparative is developed when considering the asphalt prices of 2008 and the current year, 2015, in order to analyze the effect the increasing oil prices have on asphalt.

It is concluded that the price of the asphalt layers is not easy to determine or predict, as it is related to the fluctuations in oil prices, which greatly affect the initial and life cycle costs. For concrete pavement, it is necessary to design, for medium and high traffic, considering the realization of conservations like diamond grindings, or the implementation of dowels. Finally, the usage of high discount rate taxes, encourages the making of roads with lowest possible initial costs.

Keywords: life-cycle cost analysis (LCCA), asphalt pavement, concrete pavement, short slabs, pavement preservation, HDM-4.

GLOSARIO

- AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AA93 : Método de diseño de pavimentos desarrollado por AASHTO, el año 1993.
- AA98 : Método de diseño de pavimentos desarrollado por AASHTO, el año 1998.
- ACCV : Análisis del Costo del Ciclo de Vida.
- ACPA : American Concrete Pavement Association.
- a_i : Coeficiente Estructural de la capa “i”, en los pavimentos asfálticos.
- CBR : Razón de soporte de California. Ensayo que mide la resistencia al corte de un suelo, y permite evaluar la calidad de la subrasante, subbase y base en los pavimentos.
- C_d : Coeficiente de drenaje, pavimentos rígidos.
- d : Tasa de Descuento Real [%].
- E : Módulo de Elasticidad del Hormigón.
- EE : Ejes Equivalentes.
- ESALF : Número de ejes equivalentes estándar (80 kN), por vehículo.
- FHWA : Federal Highway Administration.
- F_R : Factor de Confiabilidad.
- H : Espesor de la losa de hormigón.
- h_i : Espesor de la capa “i”, para los pavimentos asfálticos.
- HDM : Highway Development & Management.
- IRI : Índice de Regularidad Internacional.
- J : Coeficiente de Transferencia de carga.
- JPCP : Pavimentos de hormigón de losas simples con juntas (Jointed Plain Concrete Pavement).
- K : Módulo de reacción de la subrasante.
- K_c : Módulo de reacción combinado.
- MEPDG : Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide.
- MINVU : Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- MOP : Ministerio de Obras Públicas.

- m_i : Coeficiente de Drenaje de la capa “i”, en los pavimentos asfálticos.
- M_R : Módulo Resiliente del suelo.
- M\$: Miles de Pesos.
- NE : Número Estructural.
- OPTIPAVE : Software creado por la compañía TCPavements, que consiste en el diseño de losas de hormigón con geometría optimizada.
- p_i : Serviabilidad Inicial del pavimento.
- p_f : Serviabilidad Final del pavimento.
- PAVIVIAL : Software ideado por MOP, según los métodos de diseño AASHTO 93 y AASHTO 98.
- PU : Precio Unitario.
- R_m : Resistencia media del hormigón a la flexotracción a los 28 días.
- S_0 : Desviación Estándar del error combinado de las variables.
- SERVIU : Servicio de Vivienda y Urbanización.
- TMAPA : Temperatura Media Anual Ponderada del Aire.
- TMMA : Temperatura Media Mensual del Aire.
- TMDA : Tránsito Medio Diario Anual.
- U.F. : Unidad de Fomento.
- VPN : Valor Presente Neto.
- W_i : Factor de ponderación.
- Z_R : Nivel de Confianza de la Distribución Normal.
- \$F : Valor del Mantenimiento y/o Conservación realizada al pavimento.
- Φ : Diámetro de la Barra de acero [mm].
- μ : Razón de Poisson para el hormigón.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.3	ALCANCES DEL ESTUDIO	4
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
1.5	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	6
2	RESEÑA SOBRE LOS PAVIMENTOS	8
2.1	DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS	8
2.2	SUBRASANTE Y CAPAS GRANULARES	9
2.2.1	<i>Subrasante</i>	9
2.2.2	<i>Subbase Granular</i>	9
2.2.3	<i>Base Granular</i>	10
2.3	TIPOS DE RODADURA	10
2.3.1	<i>Revestimientos y pavimentos asfálticos</i>	10
2.3.1.1	Capas no estructurales	11
2.3.1.1.1	Lechada asfáltica y Micropavimento	11
2.3.1.1.2	Sello de agregados	11
2.3.1.1.3	Cape Seal.....	12
2.3.1.2	Capas estructurales	12
2.3.1.2.1	Mezcla asfáltica en caliente.....	12
2.3.1.2.2	Mezcla asfáltica en frío	12
2.3.1.2.3	Mezcla asfáltica drenante	12
2.3.1.2.4	Microaglomerado discontinuo en caliente.....	13
2.3.1.2.5	Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA)	13
2.3.2	<i>Pavimentos de hormigón</i>	13
2.3.2.1	Hormigón de Juntas Simples (JPCP)	14
2.3.2.2	Hormigón con Juntas Reforzadas (JRCP).....	14
2.3.2.3	Hormigón Continuamente Reforzado (CRCP).....	15
3	DETERIOROS DE LOS PAVIMENTOS Y SU MITIGACIÓN.....	16
3.1	DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	17
3.1.1	<i>Fisura y agrietamiento de la carpeta asfáltica</i>	17
3.1.1.1	Fisura y agrietamiento por fatiga	17

3.1.1.2	Agrietamiento en bloque	17
3.1.1.3	Grietas de borde	18
3.1.1.4	Agrietamiento longitudinal.....	18
3.1.1.5	Agrietamiento transversal.....	18
3.1.1.6	Grietas por reflexión	18
3.1.2	<i>Desintegración de la carpeta asfáltica.....</i>	<i>19</i>
3.1.3.1	Parches deteriorados	19
3.1.3.2	Baches en carpetas asfálticas.....	19
3.1.3.3	Desgaste superficial	20
3.1.3	<i>Deformaciones del pavimento.....</i>	<i>20</i>
3.1.3.1	Ahuellamiento.....	20
3.1.3.2	Deformación transversal.....	20
3.1.3.3	Ondulaciones.....	21
3.1.4	<i>Otros deterioros</i>	<i>21</i>
3.1.4.1	Exudación.....	21
3.1.4.2	Surgencia de finos y agua.....	22
3.1.4.3	Separación entre berma y pavimento	22
3.1.4.4	Descenso de la berma	22
3.2	DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN	22
3.2.1	<i>Agrietamiento.....</i>	<i>22</i>
3.2.1.1	Grietas de esquina.....	22
3.2.1.2	Grietas Longitudinales.....	23
3.2.1.3	Grietas transversales	23
3.2.2	<i>Juntas dañadas.....</i>	<i>23</i>
3.2.2.1	Deficiencias del sellado	23
3.2.2.2	Juntas y grietas saltadas.....	24
3.2.2.3	Separación de la junta longitudinal	24
3.2.3	<i>Deterioro superficial</i>	<i>24</i>
3.2.3.1	Fisuramiento por retracción.....	24
3.2.3.2	Desintegración	25
3.2.3.3	Baches	25
3.2.4	<i>Otros deterioros</i>	<i>25</i>
3.2.4.1	Levantamiento localizado.....	25
3.2.4.2	Escalonamiento de juntas y grietas	26
3.2.4.3	Surgencia de finos.....	26
3.2.4.4	Separación de la berma.....	26
3.2.4.5	Descenso de la berma	26
3.2.4.6	Parches deteriorados	26
3.2.4.7	Textura inadecuada.....	27

3.2.4.8	Fragmentación múltiple	27
3.3	CONSERVACIÓN DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	27
3.3.1	<i>Conservaciones rutinarias</i>	28
3.3.1.1	Limpieza de faja y Saneamiento	28
3.3.1.2	Sello de grietas	28
3.3.1.3	Bacheo.....	28
3.3.2	<i>Conservaciones periódicas</i>	28
3.3.2.1	Riego neblina	28
3.3.2.2	Sellos asfálticos.....	28
3.3.2.3	Fresado y reemplazo	29
3.3.2.4	Recapado delgado	29
3.3.3	<i>Conservaciones mayores</i>	29
3.3.3.1	Recapados estructurales.....	29
3.3.3.2	Reciclado.....	29
3.3.3.3	Reconstrucción.....	29
3.4	CONSERVACIÓN DE LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN	29
3.4.1	<i>Conservaciones rutinarias</i>	30
3.4.1.1	Limpieza de faja y Saneamiento	30
3.4.2	<i>Conservaciones periódicas</i>	30
3.4.2.1	Sello de juntas y grietas	30
3.4.2.2	Reparación de losas en parte o en todo su espesor	30
3.4.2.3	Cepillado de juntas y puntos altos	30
3.4.2.4	Reemplazo de losas.....	31
3.4.3	<i>Conservaciones mayores</i>	31
3.4.3.1	Recapados	31
3.4.3.2	Pulverizado	31
3.4.3.3	Reconstrucción.....	31
4	MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	32
4.1	DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS CONSIDERADOS EN LA MEMORIA.....	32
4.1.1	<i>Métodos para Pavimentos Flexibles</i>	32
4.1.1.1	AASHTO 93	32
4.1.1.2	Diseño MOP.....	33
4.1.2	<i>Métodos para Pavimentos Rígidos</i>	33
4.1.2.1	AASHTO 93	33
4.1.2.2	AASHTO 98	34
4.1.2.3	AASHTO 2008 o MEPDG	34
4.1.2.4	OPTIPAVE	34

4.2	DESCRIPCIÓN DE LA MATRIZ DE ESCENARIOS DE DISEÑO.....	35
4.3	DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS DEL DISEÑO	35
4.3.1	<i>Pavimentos Flexibles.....</i>	35
4.3.1.1	AASHTO 93 sin Verificación por Capas.....	36
4.3.1.1.1	Datos de entrada.....	36
4.3.1.1.2	Resultados del diseño	40
4.3.1.2	DISEÑO MOP	42
4.3.1.2.1	Datos de entrada.....	42
4.3.1.2.2	Resultados del diseño	43
4.3.2	<i>Pavimentos Rígidos</i>	43
4.3.2.1	AASHTO 93	44
4.3.2.1.1	Datos de entrada.....	44
4.3.2.1.2	Resultados del diseño	48
4.3.2.2	AASHTO 98	49
4.3.2.2.1	Datos de entrada.....	49
4.3.2.2.2	Resultados del diseño	51
4.3.2.3	AASHTO 2008 o MEPDG.....	53
4.3.2.3.1	Datos de entrada.....	53
4.3.2.3.2	Resultados del diseño	56
4.3.2.4	OPTIPAVE	62
4.3.2.4.1	Datos de entrada.....	62
4.3.2.4.2	Resultados del diseño	64
4.4	COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE DISEÑO	68
4.4.1	<i>Comparación entre Pavimentos Flexibles.....</i>	68
4.4.2	<i>Comparación entre Pavimentos Rígidos</i>	70
5	MODELACIÓN EN HDM-4.....	74
5.1	INTRODUCCIÓN	74
5.2	DESCRIPCIÓN DE HDM-4.....	74
5.3	MÓDULOS DEL HDM-4 Y DATOS DE ENTRADA.....	77
5.3.1	<i>Configuración del HDM-4.....</i>	78
5.3.2	<i>Flota Vehicular</i>	89
5.3.3	<i>Red de carreteras</i>	90
5.3.4	<i>Estándares de trabajo.....</i>	91
6	ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA	95
6.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DEL ACCV	95

6.2	DEFINICIÓN DE LOS VALORES ADOPTADOS PARA EL ACCV DE LOS	
	ESCENARIOS EVALUADOS.....	96
6.2.1	<i>Selección del Período de Análisis.....</i>	96
6.2.2	<i>Selección de la Tasa de Descuento.....</i>	96
6.2.3	<i>Estimación del Costo Inicial.....</i>	97
6.2.4	<i>Estimación de los Costos para el Usuario.....</i>	100
6.2.5	<i>Estimación de los Costos Futuros.....</i>	100
6.2.6	<i>Estimación del Valor Residual.....</i>	103
6.2.7	<i>Comparación de las Alternativas.....</i>	104
7	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ACCV PARA LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO	
	106
7.1	COMPARACIÓN DE LOS COSTOS INICIALES.....	107
7.2	COMPARACIÓN A LARGO PLAZO A TRAVÉS DEL VALOR PRESENTE NETO ..	114
7.2.1	<i>Valor Presente Neto con Tasa de Descuento Real del 6%.....</i>	115
7.2.2	<i>Valor Presente Neto con Tasa de Descuento Real variable.....</i>	119
8	CONCLUSIONES.....	127
9	REFERENCIAS.....	131
	ANEXOS.....	133
	ANEXO A: RESULTADOS DE LOS AJUSTES DE LAS CURVAS DE DETERIORO	
	EN HDM-4	134
	ANEXO B: LISTADO DE LOS PRECIOS UNITARIOS REFERENCIALES	146
	ANEXO C: PRECIOS INICIALES DE CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS.....	152
	ANEXO D: AJUSTE DE LAS CURVAS DEL VALOR PRESENTE NETO	156
	ANEXO E: COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE ACUERDO AL VPN Y	
	DISCRETIZANDO SEGÚN LA TASA DE DESCUENTO REAL UTILIZADA	176
	ANEXO F: TIPOS DE TRÁFICO SEGÚN OPTIPAVE	182
	ANEXO G: SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS EN EL DISEÑO DE OPTIPAVE	
	183
	ANEXO H: RANGOS TÍPICOS DE DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS Y SUS	
	CONSERVACIONES	185

**ANEXO I: AÑO DEL CEPILLADO DEL PAVIMENTO DE HORMIGÓN
TRADICIONAL.....186**

**ANEXO J: INTERPOLACIÓN ENTRE EL AÑO DEL CEPILLADO Y EL ESPESOR
DE LA LOSA188**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Distribución del Inventario de los Pavimentos en Chile	1
Figura 1-2 Esquema de metodología propuesta.....	6
Figura 2-1 Respuesta tipo de los Pavimentos al ser sometidos a carga	9
Figura 2-2 Tipos de Pavimentos de Hormigón.....	14
Figura 4-1 Ejemplo de ingreso de los datos de entrada para un suelo de CBR 10% y 10.000.000 EE.....	52
Figura 4-2 Ingreso de la Calibración de los deterioros.....	56
Figura 4-3 Selección del Inputs Climate.....	57
Figura 4-4 Importación de la base climática.....	57
Figura 4-5 Selección de la base climática de Santiago.....	58
Figura 4-6 Ingreso del TMDA Inicial	59
Figura 4-7 Ingreso del Módulo de Ruptura y el Módulo Elástico	60
Figura 4-8 Ingreso del Espesor de la losa Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG.....	60
Figura 4-9 Ingreso del Módulo Resiliente del suelo.....	61
Figura 4-10 Ingreso de los Datos Generales y Criterios de Deterioros en OPTIPAVE.....	65
Figura 4-11 Ingreso de los Parámetros del Tránsito en OPTIPAVE	65
Figura 4-12 Ingreso de los Parámetros del Hormigón en OPTIPAVE.....	66
Figura 4-13 Ingreso de los Parámetros del Suelo en OPTIPAVE	66
Figura 4-14 Ingreso de los Parámetros del Clima en OPTIPAVE.....	67
Figura 4-15 Cálculo del Espesor de la Losa en OPTIPAVE.....	67
Figura 5-1 Efecto del Estándar de Conservación en la Regularidad Superficial.....	75
Figura 5-2 Estado Superficial del Pavimento y el Costos de Conservación.....	76
Figura 5-3 Estructura General del HDM-4	77
Figura 5-4 Espacio de Trabajo de HDM-4	78
Figura 5-5 Clima Zona Centro para HDM-4	79
Figura 5-6 Distribución horaria Interurbana	79
Figura 5-7 Esquema de la Predicción de los Deterioros del Asfalto según HDM-4.....	80
Figura 5-8 Características Básicas del Camión Simple.....	89
Figura 5-9 Costos Económicos del Camión Simple.....	90
Figura 5-10 Red de Carreteras del estudio.....	91
Figura 6-1 Etapas del ACCV.....	95
Figura 6-2 Efecto de la Tasa de Descuento Real.....	97
Figura 6-3 Ejemplo de la Comparación entre Alternativas en base al VPN.....	105

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1 Espesores de las capas de los Pavimentos Asfálticos con CBR 4%	69
Gráfico 4-2 Espesores de las capas de los Pavimentos Asfálticos con CBR 10%	69

Gráfico 4-3 Espesores de las capas de los Pavimentos Asfálticos con CBR 20%	70
Gráfico 4-4 Espesores de las losas de los Pavimentos Rígidos con CBR 4%	71
Gráfico 4-5 Espesores de las losas de los Pavimentos Rígidos con CBR 10%	71
Gráfico 4-6 Espesores de las losas de los Pavimentos Rígidos con CBR 20%	72
Gráfico 7-1 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 4% de la Subrasante.....	107
Gráfico 7-2 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 10% de la Subrasante.....	108
Gráfico 7-3 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 20% de la Subrasante.....	108
Gráfico 7-4 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 4% de la Subrasante y considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG	110
Gráfico 7-5 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 10% de la Subrasante y considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG	111
Gráfico 7-6 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 20% de la Subrasante y considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG	111
Gráfico 7-7 Costo Inicial de los Pavimentos de Hormigón Tradicional para 100.000.000 EE	112
Gráfico 7-8 Comparación entre OPTIPAVE y ASFALTO para bajo tránsito	113
Gráfico 7-9 Comparación entre OPTIPAVE y HORMIGÓN TRADICIONAL para bajo tránsito	114
Gráfico 7-10 ACCV para 2.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%	115
Gráfico 7-11 ACCV para 10.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%	116
Gráfico 7-12 ACCV para 30.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%	116
Gráfico 7-13 ACCV para 10.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG	118
Gráfico 7-14 ACCV para 30.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG	118
Gráfico 7-15 ACCV para 100.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%	119
Gráfico 7-16 Efecto de la Tasa de Descuento Real sobre el Pavimento Asfáltico en bajo Tránsito	120
Gráfico 7-17 Efecto de la Tasa de Descuento Real sobre el Pavimento de Hormigón Tradicional en bajo Tránsito ..	120
Gráfico 7-18 Efecto de la Tasa de Descuento Real sobre el Pavimento de Losas Cortas en bajo Tránsito	121
Gráfico 7-19 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 2.000.000 EE	122
Gráfico 7-20 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 10.000.000 EE	122
Gráfico 7-21 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 30.000.000 EE	123
Gráfico 7-22 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 10.000.000 EE, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG.....	124
Gráfico 7-23 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 30.000.000 EE, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG.....	125
Gráfico 7-24 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 100.000.000 EE	125
Gráfico J-3 Interpolación Año del Cepillado y Espesor de Losa para 100.000.000 E.E.	189

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Trabajos de Conservación en Pavimentos Asfálticos	27
Tabla 3-2 Trabajos de Conservación en Pavimentos de Hormigón	30
Tabla 4-1 Matriz de Diseño de Pavimento	35
Tabla 4-2 Nivel de Confianza y Valor del S_0 en Pavimentos Flexibles	38
Tabla 4-3 Valores de Z_R utilizados en el Diseño de los Pavimentos Asfálticos	38
Tabla 4-4 Coeficientes Estructurales para las Capas de Pavimento	39
Tabla 4-5 Coeficientes de Drenaje (m_i)	40
Tabla 4-6 Espesor mínimo [in] de la Carpeta Asfáltica en función de los EE.	40
Tabla 4-7 Espesores mínimos de las Carpetas Asfálticas utilizadas en el Diseño de los Pavimentos Flexibles	41
Tabla 4-8 Valores de los Módulos Resilientes de la Subrasante	41
Tabla 4-9 Relación del F_R y los Ejes Equivalentes en los Pavimentos Flexibles	41
Tabla 4-10 Resultados del Diseño AASHTO 93 en Pavimentos Flexibles	42
Tabla 4-11 Resultados del Diseño MOP en Pavimentos Flexibles	43
Tabla 4-12 Resistencia a la Flexotracción	45
Tabla 4-13 Nivel de Confianza y Valor del S_0 en Pavimentos Rígidos	46
Tabla 4-14 Confiabilidades utilizadas en los Pavimentos Rígidos	47
Tabla 4-15 Valores de Z_R utilizados en el Diseño de los Pavimentos	47
Tabla 4-16 Coeficiente de Drenaje Pavimentos Rígidos	47
Tabla 4-17 Valores de los Módulos de Reacción de la Subrasante y Subbase	48
Tabla 4-18 Relación del F_R y los Ejes Equivalentes en los Pavimentos Rígidos	48
Tabla 4-19 Resultados del Diseño AASHTO 93 en Pavimentos Rígidos	48
Tabla 4-20 Factor de Ajuste por Tipo de Berma	50
Tabla 4-21 Factor de Fricción Subbase/Losa	51
Tabla 4-22 Resultados del Diseño AASHTO 98 en Pavimentos Rígidos	52
Tabla 4-23 Criterios de desempeño utilizados en los diseños	54
Tabla 4-24 Diámetro de las Barras de Transferencia de carga según los EE.	54
Tabla 4-25 Relación TMDA Inicial y EE	58
Tabla 4-26 Resultados del Diseño MEPDG en Pavimentos Rígidos sin barras de traspaso de carga	62
Tabla 4-27 Resultados del Diseño MEPDG en Pavimentos Rígidos con barras de traspaso de carga	62
Tabla 4-28 Diámetro de las Barras de Transferencia de carga según los EE en OPTIPAVE.	63
Tabla 4-29 Clasificación del Tránsito utilizada en OPTIPAVE	64
Tabla 4-30 Resultados de OPTIPAVE sin barras de traspaso de carga	68
Tabla 4-31 Resultados de OPTIPAVE con barras de traspaso de carga	68
Tabla 5-1 Factores de Calibración Utilizadas en los Modelos de Deterioro de los Pavimento Asfálticos.	83
Tabla 5-2 Set de Calibración HDM-4 en Pavimentos Asfálticos	84
Tabla 5-3 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón Tradicional para Bajo Tránsito	86
Tabla 5-4 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón Tradicional desde Medio hasta Muy Alto Tránsito	87
Tabla 5-5 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón con Barras desde Bajo hasta Alto Tránsito	87

Tabla 5-6 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón con Barras para Muy Alto Tránsito.....	88
Tabla 5-7 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos de losas cortas	88
Tabla 5-8 Medidas de conservación Aplicadas a los Pavimentos Rígidos.....	92
Tabla 5-9 Medidas de conservación Aplicadas a los Pavimentos Flexibles	93
Tabla 6-1 Precios Unitarios del Pavimento Asfáltico a precios del año 2008.....	98
Tabla 6-2 Precios Unitarios del Pavimento Asfáltico a precios del año 2015.....	99
Tabla 6-3 Precios Unitarios del Pavimento de Hormigón Tradicional.....	99
Tabla 6-4 Precios Unitarios del Pavimento de Hormigón de Losas Cortas	99
Tabla 6-5 Precios Unitarios de las Conservaciones de los Pavimentos Asfálticos	101
Tabla 6-6 Precios Unitarios de las Conservaciones de los Pavimentos de Hormigón	101
Tabla 6-7 Costos Futuros Tipo de un Pavimento Asfáltico sometido a 10.000.000 EE con precios del año 2015	102
Tabla 6-8 Costos Futuros Tipo de un Pavimento de Hormigón Tradicional sometido a 10.000.000 EE	103
Tabla 6-9 VPN de un Pavimento Asfáltico sometido a 10.000.000 EE con precios del año 2015 y $d=6\%$	104
Tabla 7-1 Diseño de MEPDG considerando Conservaciones.....	110

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El crecimiento económico de Chile en los últimos 30 años ha sido sostenido, de manera tal que al día de hoy está a un paso de convertirse en un país desarrollado. Este crecimiento sostenido ha devenido en un aumento del parque automotriz y un crecimiento de la industria, en especial la minera y el rubro exportador. Es por ello que para poder lograr el desarrollo, el país se ve en la obligación de hacer fuertes inversiones en infraestructura, con un gran enfoque en lo que es infraestructura vial. Dado esto, es que se tienen planes de construir nuevas carreteras y mejorar las ya existentes. Dentro de estos planes se pueden nombrar 2 ejemplos que afectarán a la V Región: La realización de una autopista paralela a la Ruta CH-68, pasando por lo que hoy es el camino de cuesta La Dormida; así como también se contempla el mejoramiento de la Ruta CH-66 (carretera de la fruta), para propiciar un mejor acceso sur al puerto de San Antonio.

Para construir una carretera, se utiliza principalmente asfalto u hormigón. Sin embargo, pareciera que el material predilecto para los pavimentos en Chile, es el asfalto. De hecho es posible asegurar que por cada kilómetro de pavimento de hormigón en Chile, existen 8,18 kilómetros de pavimento asfáltico. Esto se puede observar en la Figura 1.1, en la que se muestra la distribución de las vías en Chile, según el tipo de capa de rodadura.

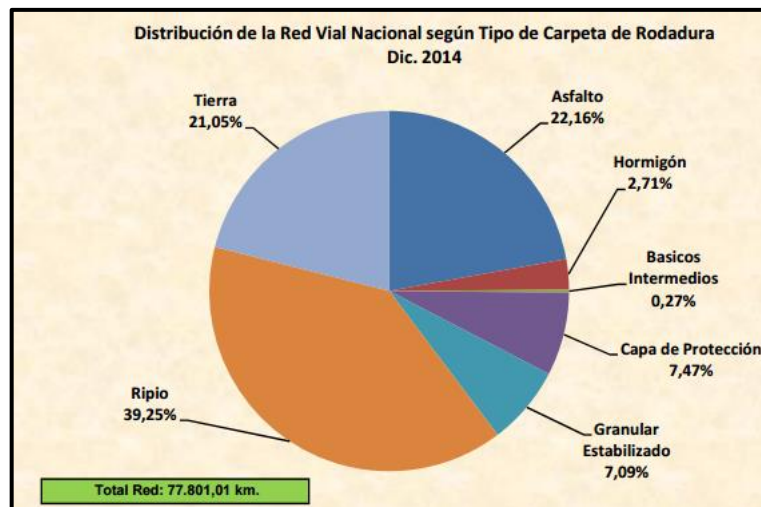


Figura 1-1 Distribución del Inventario de los Pavimentos en Chile
Fuente: Red Vial Nacional (Departamento de Gestión Vial, Diciembre 2014)

Al observar la Figura 1.1, surgen algunas inquietudes tales como: ¿A qué se debe que el pavimento predilecto en nuestro país, es el asfalto?, ¿Cuáles son las ventajas comparativas que presenta el asfalto por sobre el hormigón, para que se dé esta situación? Pareciera ser que el único criterio de selección del tipo de pavimento pasa por una cuestión de índole económico, ya que por motivos de diseño, el espesor de la carpeta asfáltica, es mucho menor al espesor de una losa de hormigón. Es por esto, que al parecer resulta menos costoso construir una carretera con material asfáltico, que con hormigón. Sin embargo, si se considera el costo que tienen las capas no ligadas del pavimento asfáltico (Base y Subbase), la diferencia de costo entre el pavimento flexible con el rígido, se aminora.

Sin embargo, el precio del asfalto entre los años 2009 al año 2015, se incrementó de tal manera que en promedio 1 [m³] de asfalto, pasó a costar cerca del doble de lo que cuesta 1 [m³] de hormigón. O sea, el argumento de que el asfalto es una alternativa más barata en su costo inicial, no siempre resulta ser cierto.

Cómo es incuestionable que durante la mayor parte del tiempo el asfalto ha tenido un menor costo inicial, en Chile la mayoría de las carreteras son de pavimentos flexibles. Pero si hablamos en lo que respecta a los mantenimientos de una vía, los pavimentos asfálticos, requieren mayores mantenciones. Es por ello, que las autopistas que fueron diseñadas a 20 años, en asfalto; y fueron entregadas alrededor del año 2005, a los 6-10 años ya presentaban diversas fallas. Así que para mantener un estándar mínimo de servicio, se han realizados diversos fresados y recapados.

En lo que respecta a lo anterior, es posible de asegurar que si el pavimento seleccionado hubiese sido de hormigón, en un comienzo este hubiese costado más caro. Pero por otro lado, la vía se encontraría sin problemas, y con leves mantenciones que encaren el costo inicial. Entonces a mediano y/o largo plazo la alternativa más barata en un comienzo, podría llegar a ser la más costosa.

Entonces, surge la siguiente interrogante: En vez de elegir el tipo de pavimento de la vía, por el costo inicial de este, ¿No es mejor elegir el tipo de pavimento realizando un análisis a largo plazo (30 – 50 años), en donde se considere cada una de las mantenciones y/o conservaciones, que ocurran en la vía? En otras palabras, exigir lo mismo que en países desarrollados (que es a lo que Chile desea llegar); que cuando se entrega un proyecto de infraestructura vial, se exige que

se presente un Análisis del Costo del Ciclo de Vida (ACCV) de la carretera por construir. Para luego de haber realizado el ACCV, se procede a seleccionar el pavimento con el mejor desempeño económico, pero a largo plazo.

Es así que como el Estado debe pensar en un país para el futuro. No con miradas cortoplacistas, porque: “Si se adopta una estrategia miope para aceptar el menor precio inicial a pesar del mayor [valor presente], los compradores más bien salen perdiendo” (Holahan, March 14, 2007). Al fin y al cabo, los que terminan perdiendo son los ciudadanos.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

- ***Objetivo General***

- ❖ Demostrar los beneficios de tomar las decisiones a largo plazo y la conveniencia de evaluar los proyectos de pavimentación con el Análisis del Costo del Ciclo de Vida, dentro del contexto de Chile.

- ***Objetivos Específicos***

- ❖ Identificar escenarios de comparación representativos para Chile, a los cuales se efectuará el Análisis del Costo del Ciclo de Vida de proyectos de pavimentación diseñados por distintos métodos de diseño y materiales.
- ❖ Analizar los resultados de comportamiento durante el ciclo de vida diseñados por diferentes métodos, tanto para hormigón como para asfalto, mediante el uso de la herramienta HDM-4.
- ❖ Analizar sensibilidad de los parámetros que permitan identificar los beneficios de tomar decisiones en el largo plazo bajo un análisis del costo del ciclo de vida, para diferentes escenarios de diseño, construcción y conservación.
- ❖ Análisis comparativo de costos y beneficios, según se opte por diseñar y construir pavimentos de hormigón o asfalto para diferentes escenarios y situaciones o casos de estudio, determinados principalmente por el volumen de tránsito y el tipo de suelo.

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

El presente estudio contempla el análisis económico a largo plazo, de los pavimentos característicos de la Zona Central del país. Para ello, se considera el desempeño empírico que han presentados los diversos tipos de pavimentos, ya sean de asfalto u hormigón. Cualquier otro tipo de material que no sea asfalto u hormigón, no es considerado en este estudio.

De manera de poder ingresar la información necesaria en HDM-4, se realizaron estructuras representativas de acuerdo a la calidad del suelo y el nivel de tránsito. Estas estructuras no representan una cartilla de diseño a utilizar como recetario, sino que representan escenarios homologables, que permiten ayudar en la toma de decisiones en lo que respecta a la estructura del pavimento a elegir y las medidas de conservación a tomar.

Por último, en el ACCV se considera solo los costos futuros que conllevan los mantenimientos y/o conservaciones, en la vía; o sea, solamente se analizan los costos directos. Es por ello, que en lo que respecta a costos exógenos, como podrían ser los costos al usuario (costos por desvíos en el tránsito, accidentalidad, operación del vehículo, etc), no son considerados. Aunque claramente una de las ventajas del HDM-4 es contar con la capacidad de involucrar este aspecto en el cálculo de los beneficios y la rentabilidad social de los proyectos.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El desarrollo del presente estudio, se puede dividir en 3 etapas: Diseño de los pavimentos característicos, modelación en HDM-4 (Obtención de las conservaciones) y ACCV.

En la primera etapa correspondiente al diseño estructural, se procede a realizar una matriz con 4 volúmenes de tránsito y 3 niveles de calidad del suelo. Teniéndose definida la matriz, se debe realizar los diseños de estructuras equivalentes. Estos diseños son resultado de los diversos métodos utilizados en el diseño de pavimentos en Chile. Para el asfalto, los métodos utilizados en Chile son: AASHTO 93 y diseño MOP (PAVIVIAL). Mientras que en el caso del hormigón, los métodos son: AASHTO 93, AASHTO 98, MEPDG y OPTIPAVE (diseño de losas cortas).

Al tener las diversas estructuras equivalentes, se pasa a la segunda etapa de estudio. Esta corresponde a la utilización del software HDM-4, versión 2.08. En este programa se ingresan cada una de las estructuras obtenidas en la etapa 1, con cada una de las componentes que afectan

el desempeño de los pavimentos. Estos son: datos climáticos (Zona Central), calidad de la subrasante, volumen del tránsito, tasa de crecimiento del tránsito, etc. Habiendo ingresado todos los datos anteriores, se procede a modelar el desempeño que tienen los diversos pavimentos. Para la modelación del comportamiento de los pavimentos de hormigón tradicional, en HDM-4, los datos de deterioros (IRI, escalonamiento y agrietamiento), año a año; se debió de utilizar la estimación de los deterioros arrojados por los diseños desarrollados por la metodología MEPDG. Los deterioros de estos diseños, fueron confrontados a los valores arrojados por HDM-4, hasta poder ajustarlos a alguna curva en que el error fuese el menor posible. De la misma manera se desarrolló la estimación de los deterioros, en HDM-4, para un diseño de hormigón de losas cortas (diseño a través de OPTIPAVE).

Al no poseer datos de estimación de deterioros en los pavimentos asfálticos, la estimación del comportamiento de los deterioros (ahuellamiento, agrietamiento, IRI), se debió realizar a través de estimaciones empíricas y estudios anteriores de calibración en HDM-4, que describen el comportamiento típico que tiene el agrietamiento e IRI en los pavimentos asfálticos en Chile. Por último, para determinar el momento en que se deba realizar un mantenimiento/conservación se modela el programa de tal manera que cuando cierto nivel de deterioro (IRI, agrietamiento, escalonamiento, etc) sea superado, inmediatamente se active un disparador que obligue a realizar una conservación.

La tercera y última etapa comprendida corresponde al ACCV. En el que primeramente se debe elegir un período de análisis, que en este caso será el mismo que la vida de diseño, es decir: 20 años. Luego se procede a estimar los costos iniciales de construcción de la carretera, y para ello se utilizan los datos arrojados por los diversos métodos de diseño, ya que estos entregan los espesores que tienen las diversas capas presentes en la estructura. Para cuantificar los costos, tanto iniciales como futuros, se utilizan los valores referenciales entregados por los siguientes documentos: *Listado de Valores Referenciales de Costos de Construcción para los Programas Pavimentación y Espacios Públicos* (SERVIU Valparaíso, 2015) y *Valores Referenciales para Obras Nuevas* (SERVIU Valparaíso, 2008). Finalmente, no se considera valor residual de las estructuras, así que solamente se analiza el impacto que tiene la Tasa de Descuento Real, sobre el ACCV, para ello se utilizan 4 tipos de tasas: 0%, 3%, 6% y 9%.

Luego de haber realizado cada uno de estos procesos, por último, se compara cada una de las alternativas de acuerdo al método de diseño; y se procede a elegir la alternativa tecno-económica más conveniente.

En la Figura 1-2, se puede observar un mapa conceptual que resume por completo la metodología propuesta para la presente memoria.

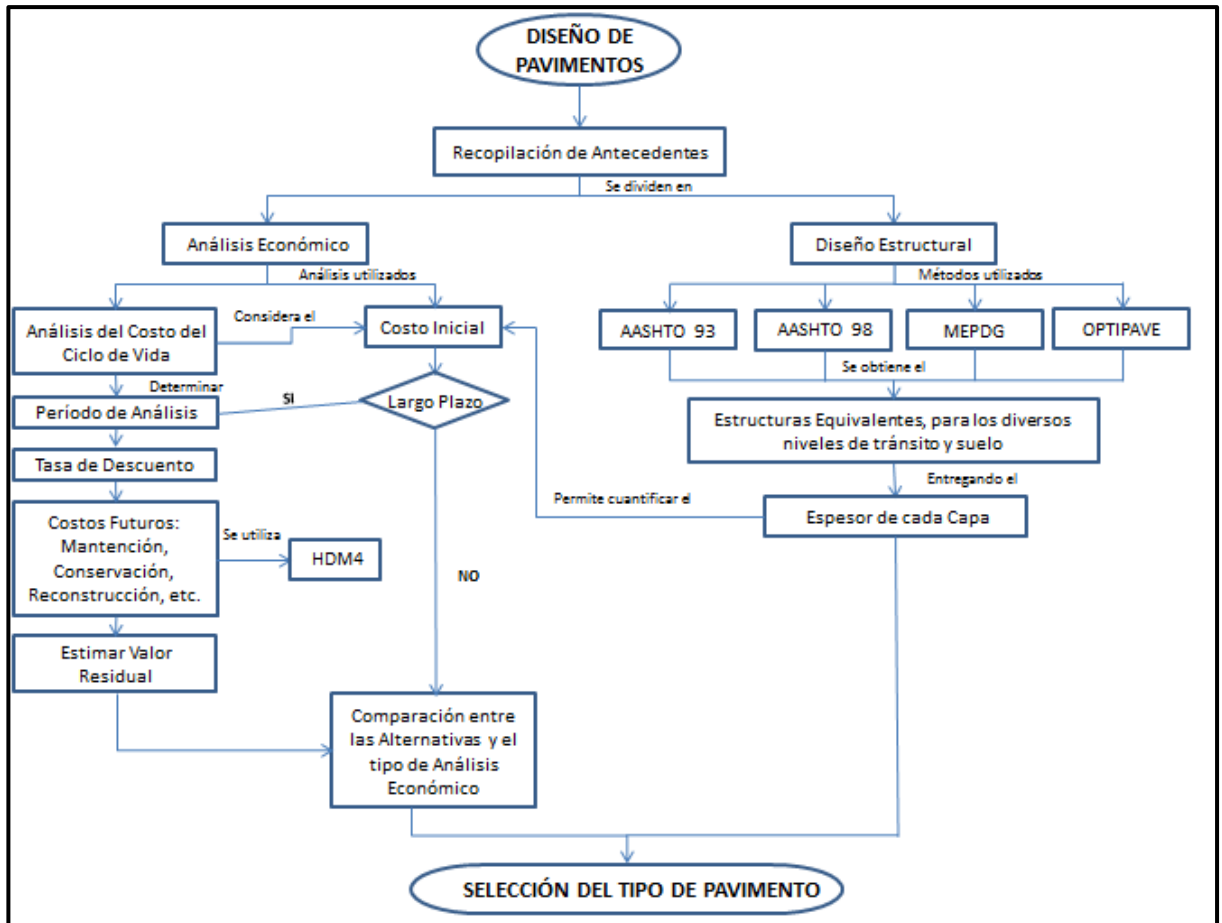


Figura 1-2 Esquema de metodología propuesta
Fuente: Elaboración Propia

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

A continuación, se presentan los capítulos de la presente memoria, con una breve explicación de cada uno de ellos.

- Capítulo 1: “Introducción”. Se explican los antecedentes previos a tener en consideración, se definen los objetivos, alcance y metodología utilizada para llevar a cabo el estudio.
- Capítulo 2: “Reseña sobre los pavimentos”. Se describe el comportamiento que tiene tanto el pavimento asfáltico como el de hormigón. Por otro lado, se explican las diversas capas presentes en los pavimentos, y la variedad de capas de rodadura presentes tanto en los pavimentos flexibles como en los rígidos.
- Capítulo 3: “Deterioros de los pavimentos y su mitigación”. En este capítulo se presentan la mayor cantidad de deterioros a los que se ven afectados los pavimentos, se describen sus causas y efectos sobre la vía. Por otra parte, se entregan las medidas de conservación para enfrentar cada uno de los deterioros descritos.
- Capítulo 4: “Métodos de diseño de pavimentos”. Se explican cada uno de los métodos de diseño, explicando su funcionamiento y parámetros utilizados en diseño. Para cada método de diseño, se presentan los resultados arrojados para el volumen de tránsito y calidad de suelo utilizado.
- Capítulo 5: “Modelación en HDM-4”. Se presenta el funcionamiento de HDM-4, versión 2.08, a nivel usuario. Para ello se señalan los datos de entrada utilizados, set de calibración utilizado para el deterioro y las conservaciones utilizadas en el modelo.
- Capítulo 6: “Análisis del Costo del Ciclo de Vida”. Explicación del tipo informe técnico de lo que significa un ACCV y las partes que lo componen. Se presentan las consideraciones hechas o criterios utilizados para el desarrollo de la presente memoria.
- Capítulo 7: “Resultados del ACCV”. Se entregan los costos iniciales de los distintos tipos de pavimentos, y las gráficas de los análisis del costo del ciclo de vida referidos a los respectivos volúmenes de tránsito con el respectivo efecto que tiene la tasa descuento real sobre el ACCV.
- Capítulo 8: “Conclusiones”. Se exponen las conclusiones y recomendaciones en respuesta a los objetivos planteados con anterioridad.

2 RESEÑA SOBRE LOS PAVIMENTOS

2.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Se define como pavimento a la capa superior del firme de la totalidad de elementos que componen el suelo de una infraestructura vial. El pavimento tiene como fin entregar una capa de rodamiento que permita un tráfico seguro, con condiciones de suavidad agradables para el usuario, y sin verse afectada la velocidad operacional. Para cumplir con estas condiciones existen principalmente dos tipos de pavimentos: el pavimento asfáltico y el pavimento de hormigón.

Estos dos pavimentos se comportan de manera distinta cuando se ven enfrentados a las cargas a las que son sometidos. Siendo su principal diferencia el cómo cada uno de ellos transmite los esfuerzos a la subrasante.

Es por ello que un pavimento rígido o de hormigón, debido a su gran rigidez, la losa de hormigón funciona como un elemento placa. Este hecho, permite distribuir los esfuerzos a sus capas inferiores, con presiones muy bajas. En síntesis, la losa rígida, es la que entrega la mayor cantidad de capacidad portante de la estructura.

Por otro lado, el pavimento flexible o asfáltico, se constituye de materiales menos resistentes y rígidos que el hormigón. Dado esto, al tener la capa de rodadura menor rigidez, este se deforma más y con ello se producen mayores esfuerzos en la subrasante. En base a lo anterior, es que los pavimentos asfálticos necesitan de mayor cantidad de capas resistentes, y a la vez mayores espesores de estos.

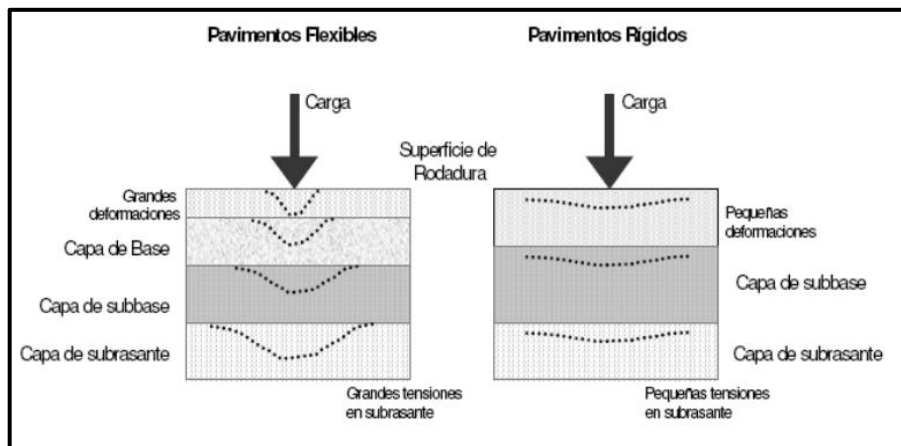


Figura 2-1 Respuesta tipo de los Pavimentos al ser sometidos a carga
Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (Coronado Iturbide, 2002)

2.2 SUBRASANTE Y CAPAS GRANULARES

2.2.1 Subrasante

Se define como subrasante a la superficie del terreno, donde se apoya el pavimento. Normalmente la subrasante está conformada por el suelo natural disponible en el terreno sobre el cual se emplaza el proyecto vial. Sin embargo, cuando el suelo natural contiene un CBR muy bajo, es necesario mejorar la calidad de la subrasante. Esto se logra con material de reemplazo, estabilización del suelo (agentes cementados, agentes asfálticos y productos químicos) o geotextiles, y todo se debe a que se necesita mejorar sus propiedades de soporte estructural.

Para que la subrasante pueda ser utilizada en la obra vial, es necesaria que esta sea preparada, ejecutando labores de movimientos de tierra y compactación del suelo.

2.2.2 Subbase Granular

Corresponde a la capa de subbase, a una capa de agregados granulares, que se encuentran compactados y graduados. Esta capa se ubica sobre la subrasante previamente preparada, y por debajo de la base, en el caso del pavimento asfáltico. En el caso del pavimento de hormigón, esta capa se ubica inmediatamente por debajo de la losa de hormigón.

El material utilizado principalmente está constituido por grava arenosa, libre de material vegetal y terrenos de arcilla.

Para cumplir su función, esta capa debe tener un CBR igual o superior al 40% en el caso de los pavimentos asfálticos. En el caso de los pavimentos rígidos, el CBR debe ser igual o superior al 60%.

2.2.3 Base Granular

La base corresponde a la capa de agregados pétreos bien compactado y graduado. Estos agregados, provienen de procesos de producción mecánica, tanto en su trituración como en su selección. Esta capa se encuentra ubicada por encima de la subbase y sobre ella se construyen las capas asfálticas u hormigón. Para mejorar su resistencia, la capa pueda pasar por un proceso de estabilización.

Debido a que esta capa se encuentra muy próxima a la superficie de contacto con las ruedas de los vehículos, es que esta capa debe tener una alta resistencia a ser deformada.

La razón de soporte que esta capa debe tener, es de CBR igual o superior al 80%. Esto es solamente para los pavimentos asfálticos.

2.3 TIPOS DE RODADURA

2.3.1 Revestimientos y pavimentos asfálticos

El asfalto es un material viscoso de color negro, que se obtiene de manera natural o por destilación del petróleo. Cuando este material es mezclado con áridos, se utiliza en la pavimentación. Las superficies de rodadura en pavimentos flexibles, se pueden dividir en 2 grandes grupos:

1. Capas no estructurales, entre las que se encuentran:
 - a. Lechadas asfálticas.
 - b. Microaglomerados en frío.
 - c. Sello de agregados.
 - d. Cape Seal.
2. Capas estructurales, entre las que se encuentran:

- a. Mezclas asfálticas en caliente.
- b. Mezclas asfálticas en frío.
- c. Mezclas asfálticas drenantes.
- d. Microaglomerados discontinuos en caliente.
- e. Mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA).

2.3.1.1 *Capas no estructurales*

2.3.1.1.1 Lechada asfáltica y Micropavimento

Corresponde a una Lechada asfáltica a lo que refiere a una mezcla compuesta por emulsión asfáltica de quiebre lento, agua, árido bien graduado y polvo mineral. Si es que fuese necesario, se le incorporan aditivos.

Por otra parte, el Micropavimento utiliza la misma mezcla utilizada en la Lechada, sin embargo la emulsión utilizada en el Micropavimento es modificada con polímeros y a la vez los áridos utilizados son de mayor calidad mecánica. Es por ello que el Micropavimento es utilizado en vías más importantes.

Cuando se trata de medidas de conservación, estas mezclas se usan para rellenar las grietas superficiales y defectos menores (Impermeabilización, resistencia al deslizamiento y apariencia del asfalto). La lechada ayuda a disminuir la oxidación del asfalto y la rigidización del pavimento.

2.3.1.1.2 Sello de agregados

El sello es un tipo de recubrimiento sobre superficies pavimentadas. Este consiste en la aplicación de un riego de emulsión, para luego utilizar una cobertura de agregados de la misma granulometría.

Cuando se refiere a la utilización del sello en medidas de conservación, este se utiliza con objeto de impermeabilizar, sellar fisuras, mejorar el IRI y brindar protección al pavimento asfáltico (radiación solar y presencia de agua).

2.3.1.1.3 Cape Seal

Cape Seal, es la combinación de las dos medidas descritas anteriormente; es por ello que Cape Seal consiste en la aplicación de una primera capa de Sello de Agregado, para luego realizar una segunda capa de Lechada o Micropavimento asfáltico. La aplicación de la Lechada o del Micropavimento se efectúa luego de haberse terminado y curado la capa de Sello de Agregado.

2.3.1.2 *Capas estructurales*

2.3.1.2.1 Mezcla asfáltica en caliente

Una mezcla asfáltica en caliente, es la combinación de cemento asfáltico (CA), áridos (incluyendo polvo mineral) y si fuese el caso, aditivos. Se denomina mezcla en caliente, debido a que en su fabricación el cemento asfáltico y los áridos deben ser previamente calentados, y su proceso de puesta en obra se realiza a temperaturas superiores a las del terreno.

La mezcla asfáltica en caliente de alto módulo, es aquella que presenta un módulo dinámico a 15°C, superior a 13.000 [MPa].

La densidad de compactación debe ser igual o superior al 97% de la densidad Marshall.

2.3.1.2.2 Mezcla asfáltica en frío

Se denomina una mezcla en frío, a una mezcla de agregado que puede tener o no polvo mineral, con una emulsión asfáltica. Se diferencia de la mezcla asfáltica en caliente, en que todo el proceso de mezcla, se efectúa a temperatura ambiente.

La utilización de este tipo de mezcla tiene sus ventajas, entre las que se pueden contar su bajo costo energético, reducen los niveles de contaminación y en la actualidad se está empezando a utilizar como capa de rodado, pero sólo para tránsito liviano. Es por ello que esta mezcla principalmente se utiliza en los bacheos.

2.3.1.2.3 Mezcla asfáltica drenante

La mezcla asfáltica drenante o porosa, corresponde a una mezcla caliente fabricada con cemento asfáltico, pero modificado con polímeros de AMP. Este tipo de mezcla se construye sobre una carpeta asfáltica ya existente, donde esta debe cumplir con los siguientes requisitos: superficie

impermeable libre de fisuras y configuración geométrica que permita la evacuación del agua hacia los costados.

2.3.1.2.4 Microaglomerado discontinuo en caliente

Es aquella mezcla, cuyo tamaño máximo del árido es de 12,5 [mm] y por ende, el espesor de la capa en promedio debe ser menor o igual a 2,5 veces el tamaño máximo antes señalado. Su empleo como capa de rodadura, se relaciona a sus beneficios en la alta resistencia al deslizamiento, seguridad y baja sonoridad.

La granulometría de esta mezcla es discontinua, y se utiliza cemento asfáltico modificado con polímeros AMP.

2.3.1.2.5 Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA)

Consiste en una mezcla que contiene un fuerte esqueleto mineral. El esqueleto está constituido por gravilla triturada, bajo contenido de arena y una dosis elevada de ligante asfáltico que en combinación al Filler y fibras de celulosa conforman el mastic, cohesionando la estructura mineral. La mezcla da origen a un pavimento asfáltico de gran resistencia al impacto y al desgaste superficial. En base a lo anterior es que la mezcla es utilizada en rutas de tránsito pesado y alto, y zonas de altas pendientes.

2.3.2 Pavimentos de hormigón

El hormigón es una mezcla de cemento hidráulico, agua, áridos gruesos y finos, y aditivos. Existen principalmente 3 tipos de pavimentos de hormigón:

- a. Pavimentos de Hormigón de Juntas Simples:
 - Sin elementos de traspaso de cargas.
 - Con elementos de traspaso de cargas.
- b. Pavimentos de Hormigón con Juntas Reforzadas.
- c. Pavimentos de Hormigón Continuamente Reforzados.

En la Figura 2-2, se muestra la vista en plana de cada uno de los pavimentos de hormigón recientemente descritos.

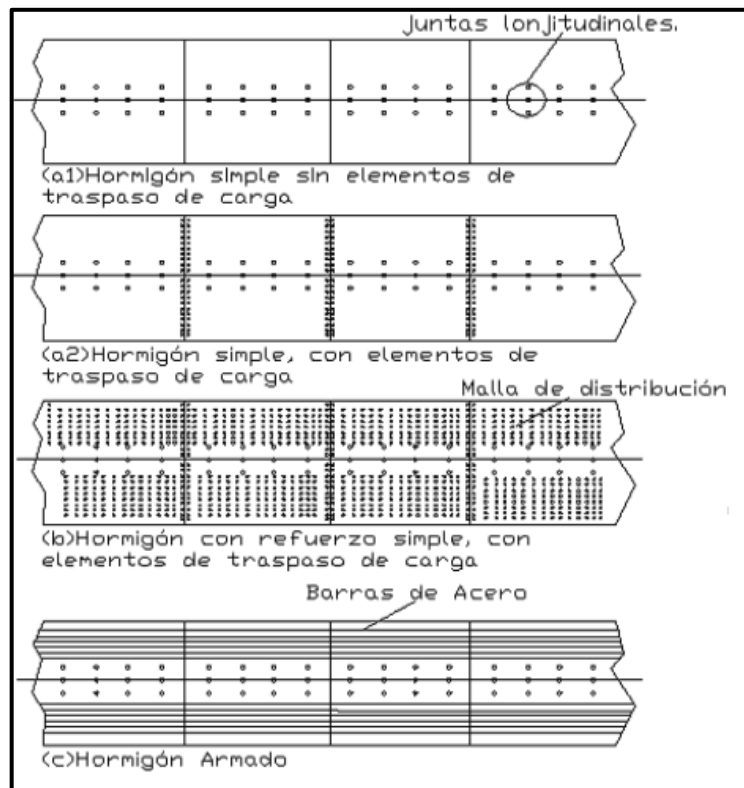


Figura 2-2 Tipos de Pavimentos de Hormigón

Fuente: Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU, 2008)

2.3.2.1 Hormigón de Juntas Simples (JPCP)

Consiste en pequeñas losas, las cuales su separación entre juntas transversales varían desde los 3.5 a 6.0 [m]. Estas losas no presentan refuerzo de acero. La transferencia de carga se realiza por efecto de trabazón de los agregados, sin embargo se pueden usar barras de transferencia de cargas llamadas dovelas. Este tipo de pavimento es el más empleado en nuestro país.

2.3.2.2 Hormigón con Juntas Reforzadas (JRCP)

Este tipo de pavimento presenta losas de tamaño mayor a la anterior, la separación entre juntas varía desde 8 a 15 [m]. Aunque estas losas presentan refuerzo de acero, estos no mejoran el desempeño, sino que se espera que el refuerzo controle el daño dentro de la losa. La transferencia de carga se efectúa con el empleo de barras de transferencia de carga.

2.3.2.3 *Hormigón Continuamente Reforzado (CRCP)*

Este pavimento no contiene juntas debido a que el refuerzo de acero controla el espaciamiento y la apertura de grieta por retracción. Sin embargo, se espera la aparición de fisuras a lo largo de todo el pavimento, cuyo distanciamiento va desde los 0,6 a 2,0 [m].

La guía de diseño MEPDG ya no considera su empleo, esto se debe a que su desempeño no ha sido el óptimo.

3 DETERIOROS DE LOS PAVIMENTOS Y SU MITIGACIÓN

Por diseño, se espera que los pavimentos se puedan desempeñar de manera óptima durante su “vida útil”, pero este período de tiempo es simplemente un valor teórico que no se condice con el comportamiento que presenta el pavimento cuando este se encuentra en funcionamiento. Por tanto, muchas veces antes de alcanzar a llegar al período de diseño, este se encuentra deteriorado antes de lo esperado.

Que el pavimento se haya deteriorado antes de lo predicho, puede deberse a diversos factores, tales como: medioambientales (precipitaciones, temperatura, radiación solar, etc), cargas de tránsito (mayor crecimiento vehicular de lo pronosticado, mala estimación de los Ejes Equivalentes, etc) y errores constructivos. Como estos factores no son controlables por el diseñador, es que se hace necesario aplicar medidas de conservación sobre el pavimento, para disminuir el impacto sobre la tasa de deterioro ya generada.

Es necesario plantear buenas medidas de conservación en el pavimento, ya que existen 3 factores que se ven afectados:

- La seguridad de conducción y su comodidad.
- El tiempo de viaje aumenta considerablemente junto a los costos de operación
- Si no se realizan medidas de mantenimiento oportunas, el costo de inversión en la vía aumenta.

Por otra parte, los deterioros se pueden clasificar en funcionales y estructurales.

- Deterioro funcional: Este tipo de deterioro se encuentra relacionado al nivel de serviciabilidad de la vía y seguridad de esta. Un ejemplo de este deterioro es el IRI.
- Deterioro estructural: Este deterioro se relaciona a la pérdida de capacidad portante del suelo o de alguna capa que compone el pavimento. Se manifiesta en forma de deformaciones (por ejemplo: ahuellamiento) o agrietamientos.

En lo que respecta a las medidas de conservación, ellas se agrupan de la siguiente manera:

- a. Conservación rutinaria: Corresponde a todas aquellas acciones, realizadas a la vía, durante el año. Estas operaciones se realizan independiente del nivel de tránsito y el clima. Ejemplo de este tipo de conservación son limpieza de faja, saneamiento, etc.

- b. Conservación periódica: Son todas aquellas operaciones de carácter preventivo y que se realizan en espacios de tiempo superiores al año. Su fin es brindar un cierto estándar de servicio del pavimento.
- c. Conservación mayor: Este tipo de conservación involucra un mejoramiento de la capacidad estructural y funcional del pavimento. Es por ello que aquí encuentran obras tales como recapados, repavimentaciones o reconstrucciones.

3.1 DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

3.1.1 Fisura y agrietamiento de la carpeta asfáltica

3.1.1.1 Fisura y agrietamiento por fatiga

Este tipo de agrietamiento es un deterioro del tipo estructural que presenta un desarrollo progresivo. En su fase inicial se presenta en grietas longitudinales, que en la etapa intermedia se interconectan con otras grietas, formando lo que se conoce como “piel de cocodrilo”. El agrietamiento se presenta principalmente en las zonas del pavimento donde se reciben las mayores cargas.

Dentro de sus causas se pueden distinguir los siguientes factores que favorecen su desarrollo:

- Espesor inadecuado del pavimento o falta de capacidad de soporte del suelo.
- Mezcla asfáltica muy rígida.
- Drenaje inadecuado.
- Vehículos que exceden el nivel de carga.

3.1.1.2 Agrietamiento en bloque

El agrietamiento en bloque es una falla que parte el pavimento en bloques rectangulares de diversas dimensiones.

Su principal causa es la acción de los ciclos de variación de la temperatura, generando ciclos de dilatación y contracción sobre la carpeta asfáltica. Cuando los ciclos de temperatura sobrepasan la capacidad de deformación de la mezcla asfáltica, esta se agrieta y da origen al agrietamiento en bloque. En consecuencia, la rigidez de la carpeta asfáltica se ve afectada, por ello que dentro de los factores se pueden nombrar también:

- Envejecimiento de la mezcla.
- Mal diseño de la mezcla.
- Las cargas de tráfico incrementan el agrietamiento en bloque.

3.1.1.3 Grietas de borde

Grietas en forma de medialuna que se desarrollan hasta interceptar el borde del pavimento. Normalmente se observan entre el borde del pavimento y 0,6 [m] hacia el interior de la vía.

Su principal causa es la falta de confinamiento lateral.

3.1.1.4 Agrietamiento longitudinal

Es aquella grieta que se encuentra paralela al eje de la vía. Se presenta tanto en la huella de la rueda o en la junta longitudinal de construcción.

Entre sus causas se pueden enumerar las siguientes:

- Si las grietas coinciden con el eje de la calzada, su porqué es una mala construcción, generando una zona de debilidad en la junta de construcción.
- Contracción térmica de la carpeta asfáltica. Si la contracción supera la resistencia a la tensión del asfalto, falla el asfalto originando una grieta longitudinal.
- Debido a una mala compactación, se originan asentamientos en la base o la subrasante.

3.1.1.5 Agrietamiento transversal

Grieta de longitud variable, que se encuentra perpendicular al eje de la vía. Se presenta a distancias regularmente espaciadas.

Sus causas principales son:

- Gradientes térmicos, en especial en mezcla rigidizadas.
- Deficiencia en la junta de construcción.

3.1.1.6 Grietas por reflexión

Este tipo de falla es común en las zonas donde existía previamente un pavimento de hormigón deteriorado y ha sido cubierto con una capa de asfalto. Es por eso, que la distribución y longitud

de las grietas dependen de la existencia de las grietas y juntas de la carpeta de hormigón preexistente; propagando hacia arriba, en la carpeta asfáltica, las juntas y grietas del hormigón.

La causa de este tipo de agrietamiento es:

- Juntas y grietas reflejadas hacia la carpeta de rodado asfáltico debido a los movimientos que presentan las losas o grietas del pavimento rígido.

3.1.2 Desintegración de la carpeta asfáltica

3.1.3.1 Parches deteriorados

Sección de pavimento removida y luego reemplazada o se le ha añadido una carpeta de refuerzo, sin embargo, se encuentra deteriorada.

Sus causas posibles son:

- Recubrimiento superficial de la zona deteriorada, sin solucionar las causas reales de la falla.
- Parche insuficiente para el nivel de tránsito y/o características de la subrasante.
- Deficiencias en la construcción del parche.

3.1.3.2 Baches en carpetas asfálticas

Cavidad formada por desprendimiento de la mezcla asfáltica. Pudiendo extenderse a las capas inferiores del pavimento. Para ser llamada como bache, la cavidad debe al menos en una de sus dimensiones ser superior a los 15 [cm].

La principal causa es la infiltración de agua a las capas inferiores del pavimento. Pero existen otros tipos de causas, entre las que podemos nombrar:

- Estructura insuficiente para las solicitaciones.
- Defectos constructivos.
- Derrame de solventes o quema del pavimento.

3.1.3.3 *Desgaste superficial*

Es el desprendimiento del mortero asfáltico, cuya consecuencia es la exposición del agregado grueso que compone la mezcla asfáltica. En este punto, se puede visualizar dos situaciones:

- a. Pulimiento del agregado: Pérdida de fricción en la superficie, producto del desgaste.
- b. Pérdida de agregado: Por problema en la afinidad del mortero con el árido grueso.

Entre sus causas se encuentran:

- Envejecimiento del asfalto.
- Bajo contenido de cemento asfáltico.
- Utilización de agregados desmenuzables.
- Falta de afinidad del asfalto con el agregado.
- Presencia de agua en la mezcla.

3.1.3 **Deformaciones del pavimento**

3.1.3.1 *Ahuellamiento*

Deterioro que se puede presentar en cualquiera de las capas del pavimento flexible, que se manifiesta en un hundimiento longitudinal que coincide con la huella de los vehículos.

Las causas probables son:

- Compactación inadecuada de la mezcla asfáltica o la base.
- Capacidad de soporte insuficiente.
- Diseño erróneo de la mezcla asfáltica.

3.1.3.2 *Deformación transversal*

Desplazamiento de una parte de la carpeta asfáltica, cuya característica es un hundimiento en la huella y elevación en las zonas vecinas. Es común encontrarlas a un costado del pavimento.

Pueden darse inicio por:

- Capacidad estructural insuficiente o baja capacidad de soporte.
- Diseño erróneo de la mezcla asfáltica.

- Insuficiencia de la liga entre las capas asfálticas y la base.

3.1.3.3 Ondulaciones

Corresponde a una deformación del perfil longitudinal con crestas y valles espaciados regularmente. Puede presentarse como una única onda en la zona de cambio del tipo de pavimento, de uno flexible a uno rígido.

Sus causas son:

- En el caso de una ondulación individual: Mezcla asfáltica poco estable, espesor de la capa inadecuado y ligante muy blando.

En el caso de ondulaciones extensivas las causas pueden ser:

- Diseño erróneo de la mezcla.
- Estructura inadecuada para zona de frenado.
- Estructura inadecuada para tramos con grandes pendientes longitudinales.

3.1.4 Otros deterioros

3.1.4.1 Exudación

La exudación es un tipo de falla que ocasiona el ascenso del ligante asfáltico hacia la superficie, que se manifiesta en una película oscura, brillante y pegajosa. Esta falla ocasiona la pérdida de resistencia al deslizamiento, generando un riesgo a los conductores.

Sus causas son:

- Exceso de cemento asfáltico.
- Riego de liga o imprimación demasiado gruesa.
- Ligante muy blando.
- Volumen de vacíos insuficiente.
- Altas temperaturas y exceso de carga sobre el pavimento.

3.1.4.2 *Surgencia de finos y agua*

Expulsión de agua mezclada con finos, que se manifiesta a través de las grietas y borde externo del pavimento.

Causas posibles:

- Ante la existencia de agua entre la base y la capa asfáltica, el tránsito produce un efecto de succión y bombeo, erosionando el material fino de la base.

3.1.4.3 *Separación entre berma y pavimento*

Separación del plano de contacto entre el borde externo del pavimento y la berma, o el elemento de drenaje.

Sus causas son:

- Asentamiento con desplazamiento de la berma, por mala compactación de la berma.
- Escurrimiento de agua sobre la berma.

3.1.4.4 *Descenso de la berma*

Desnivel entre la altura del pavimento y la berma.

Causas conocidas:

- Asentamiento de la berma, por compactación deficiente.
- Berma no revestida y erosión de la capa superficial por efecto del agua.
- En zonas que presentan ciclos de hielo y deshielo, la penetración de la helada produce descompactación.

3.2 DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

3.2.1 Agrietamiento

3.2.1.1 Grietas de esquina

Corresponde a una grieta que da origen en un trozo de losa triangular. La longitud de los lados del triángulo puede ir desde los 30 [cm] hasta la mitad del ancho de la losa.

Sus causas pueden ser:

- Falta de apoyo en la losa, por efectos de bombeo o alabeo térmico
- Sobrecarga en las esquinas.
- Deficiencia en la transmisión de cargas entre las juntas.

3.2.1.2 *Grietas Longitudinales*

Grietas paralelas al eje de la vía.

Dentro de sus causas se encuentran:

- Asentamiento de la base y/o subrasante.
- Losa de ancho excesivo.
- Carencia de la junta longitudinal.
- Mala ubicación de la barras de traspaso de carga.
- Aserrado a destiempo de la junta.

3.2.1.3 *Grietas transversales*

Grietas que forman un ángulo recto al eje de la vía.

Sus causas son:

- Losas de largo excesivo.
- Formación tardía de la junta de contracción o al aserrado de esta.
- Espesor insuficiente para soportar las cargas.
- Efectos de la retracción térmica que da origen a alabeos.

3.2.2 **Juntas dañadas**

3.2.2.1 *Deficiencias del sellado*

Deterioro del sello de juntas que ocasiona el ingreso de cantidad considerable de agua y/o materiales incompresibles, tales como: piedras, arenas, etc.

Entre sus causas se encuentran:

- Endurecimiento (oxidación) de la mezcla.
- Incrustaciones de materiales incompresibles.
- Exceso de sello.
- Productos de mala calidad.
- Sello mal colocado.
- Caja mal diseñada.

3.2.2.2 *Juntas y grietas saltadas*

Desintegración de la junta, ya sea longitudinal o transversal, que ocasiona pérdida de hormigón. Puede afectar hasta 50 [cm] dentro de la losa.

Causas comunes:

- Debilitamiento de los bordes debido a un acabado excesivo o defectos constructivos.
- Penetración de partículas incompresibles.

3.2.2.3 *Separación de la junta longitudinal*

Abertura de la longitudinal del pavimento.

Sus causas son:

- Ausencia de barras de amarre entre losas adyacentes.
- Carencia de bermas.
- Desplazamiento lateral de las losas, provocado por un asentamiento diferencial de la subrasante.

3.2.3 **Deterioro superficial**

3.2.3.1 *Fisuramiento por retracción*

Fisuras limitadas solamente a la superficie del pavimento. Es común observar que las grietas de mayores dimensiones se orientan en sentido longitudinal y forman una malla con las grietas más finas.

Las causas son:

- Curado inapropiado del hormigón.
- Acción del clima (zonas frías) o de productos químicos.
- Exceso de amasado superficial y/o adición de agua durante el alisado de la superficie.

3.2.3.2 *Desintegración*

Corresponde a una falla de desintegración progresiva de la superficie, ocasionando la pérdida de textura y con ello el mortero, dejando el árido grueso expuesto.

Sus causas son:

- Hormigón con exceso de mortero.
- Curado inapropiado.
- Mala dosificación del hormigón.
- En los climas fríos se ve afectada por la acción del tránsito y los ciclos de hielo-deshielo.

3.2.3.3 *Baches*

Cavidad formada por el desprendimiento del hormigón en la superficie. El diámetro de la cavidad varía entre los 2,5 a 10 [cm] y la profundidad supera los 1,5 [cm].

Los orígenes de este tipo de falla, pueden ser:

- Materiales disgregables al interior del hormigón.
- Baja homogeneidad del mortero.

3.2.4 **Otros deterioros**

3.2.4.1 *Levantamiento localizado*

Es el levantamiento de una parte de la losa, que se encuentra localizado a ambos lados de una grieta o junta transversal. Generalmente la losa se quiebra en varios trozos.

Entre las posibles causas se encuentran:

- Variaciones térmicas motivadas por losas grandes y que no cuentan con juntas de expansión.

- Mala colocación de las barras de traspaso de carga.
- Suelos expansivos a baja profundidad.

3.2.4.2 *Escalonamiento de juntas y grietas*

Desnivel entre dos superficies de hormigón adyacentes, que se encuentran separadas por una junta transversal o grieta.

Las causas más habituales son:

- Erosión de la base, en zonas cercanas de la junta o grieta.
- Deficiencia en el traspaso de cargas.
- Asentamiento diferencial en la subrasante.
- Mal drenaje.

3.2.4.3 *Surgencia de finos*

El presente deterioro se encuentra descrito en el apartado 3.1.4.2 de la presente memoria.

3.2.4.4 *Separación de la berma*

El presente deterioro se encuentra descrito en el apartado 3.1.4.3 de la presente memoria.

3.2.4.5 *Descenso de la berma*

El presente deterioro se encuentra descrito en el apartado 3.1.4.4 de la presente memoria.

3.2.4.6 *Parches deteriorados*

Comprende a un área superior a 0,1 [m²] o a la losa en su totalidad, que ha sido removida. En su reemplazo se coloca un parche de hormigón o asfalto y al paso del tiempo se deteriora.

Dentro de sus causas, se pueden encontrar:

- En el caso de parches asfálticos, capacidad estructural insuficiente o errores constructivos.
- En el caso de reemplazo de losas de hormigón con espesor similar al existente, traspaso de carga insuficiente o error constructivo.

- Retracción del fraguado.

3.2.4.7 Textura inadecuada

Pérdida de la textura superficial.

Sus causas pueden ser:

- Mala dosificación del hormigón o calidad de la arena.
- Exceso de mortero en la superficie.
- Acción combinada del tránsito con los ciclos de hielo-deshielo.
- Mala terminación de la textura.

3.2.4.8 Fragmentación múltiple

Comprende a un área superior a 0,1 [m²] o a la losa en su totalidad, y presentan múltiples grietas dando origen a trozos independientes.

La causa más habitual es:

- Es una etapa muy avanzada de deterioros de los diferentes tipos de agrietamiento, en el que se penetra el agua, provocando surgencia de finos.

3.3 CONSERVACIÓN DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Las medidas de conservación descritas en la presente memoria, son las utilizadas por MOP para la mantención de los pavimentos asfálticos, y se detallan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Trabajos de Conservación en Pavimentos Asfálticos
Fuente: Proposiciones de Acciones de Mantenimiento y Estado de la Calzada (Dirección de Vialidad, 2014)

Tipo de Conservación	Acciones de conservación
Rutinaria	Limpieza de Faja y Saneamiento
	Sello de grietas
	Bacheo
Periódica	Riego Neblina
	Sellos asfálticos: Lechadas Asfálticas, Sellos de agregados
	Fresado y reemplazo
	Recapado delgado (Funcional)
Mayor	Recapado estructural
	Reciclado
	Reconstrucción

3.3.1 Conservaciones rutinarias

3.3.1.1 Limpieza de faja y Saneamiento

Estos trabajos corresponden a la eliminación de vegetación, escombros o basura; ya sea en forma manual o mecánica, de fosos, contrafosos, cunetas y alcantarillas. Este tipo de trabajo permite mantener en un buen estado el sistema de drenaje.

3.3.1.2 Sello de grietas

Esta medida de conservación se refiere al sello con asfalto de algunos tipos de grietas que se producen en los pavimentos flexibles. El objetivo de esta conservación es minimizar la infiltración de agua y oxidación del asfalto.

3.3.1.3 Bacheo

Corresponde a la reparación de los baches y el reemplazo de las zonas del pavimento que se encuentran deterioradas, siempre que el deterioro afecte solamente a la rodadura asfáltica; en el caso del bacheo superficial. Por otro lado, si el daño es severo y afectan a las otras capas del pavimento, se debe realizar un bacheo profundo.

3.3.2 Conservaciones periódicas

3.3.2.1 Riego neblina

El riego neblina es una emulsión asfáltica de quiebre lento, que se diluye con agua sobre el pavimento existente. Se emplea para renovar superficies envejecidas y para sellar grietas pequeñas y superficies porosas.

3.3.2.2 Sellos asfálticos

Las medidas de conservación, sellos asfálticos, se encuentran descritos en los apartados 2.3.1.1.1 “Lechada asfáltica y Micropavimento”, y 2.3.1.1.2 “Sello asfáltico; de la presente memoria.

3.3.2.3 *Fresado y reemplazo*

Consiste en el recorte en frío, de un determinado espesor del pavimento, para luego reemplazar el espesor faltante con una capa equivalente de asfalto.

3.3.2.4 *Recapado delgado*

Consiste en la colocación de una nueva capa de rodadura sobre el pavimento existente. El espesor de la nueva capa no debe sobrepasar los 50 [mm]

3.3.3 **Conservaciones mayores**

3.3.3.1 *Recapados estructurales*

Aplicación de una o varias capas de asfalto, con el objeto de aumentar la capacidad de soporte del pavimento.

3.3.3.2 *Reciclado*

Consiste en procesar, una parte de la mezcla asfáltica antigua del pavimento con una mezcla de nuevos materiales, de manera tal de producir una mezcla nueva que cumpla con los requisitos que se le exigen al pavimento.

El reciclado puede ser en caliente o en frío, como también la mezcla puede colocarse en el mismo camino o en otro lugar.

3.3.3.3 *Reconstrucción*

La reconstrucción es el retiro del antiguo pavimento, con una parte o la totalidad de las capas granulares, para luego ser reemplazado por otro nuevo.

3.4 **CONSERVACIÓN DE LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN**

Las medidas de conservación de pavimentos rígidos descritas en la presente memoria, son las utilizadas por MOP, y se detallan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Trabajos de Conservación en Pavimentos de Hormigón
Fuente: Proposiciones de Acciones de Mantenimiento y Estado de la Calzada (Dirección de Vialidad, 2014)

Tipo de Conservación	Acciones de conservación
Rutinaria	Limpieza de Faja y Saneamiento
Periódica	Sello de juntas y grietas
	Reparación de losas en parte o en todo su espesor
	Cepillado de juntas y puntos altos
	Reemplazo de losas
Mayor	Recapados
	Pulverizado
	Reconstrucción

3.4.1 Conservaciones rutinarias

3.4.1.1 Limpieza de faja y Saneamiento

La presente medida de conservación se encuentra descrito en el apartado 3.3.1.1 de la presente memoria.

3.4.2 Conservaciones periódicas

3.4.2.1 Sello de juntas y grietas

Aplicación de un material sellante (asfalto o silicona) en las juntas y grietas del pavimento, con el objeto de evitar la entrada de materiales incompresible o agua.

3.4.2.2 Reparación de losas en parte o en todo su espesor

Cuando se habla de reparación en parte de la losa, se refiere a la conservación de las juntas del pavimento que presentan saltaduras en sus aristas, pero solo afectan la parte superior del hormigón (menor a un tercio del espesor de la losa). Por su parte, la reparación en todo su espesor corresponde al reemplazo de la parte deteriorada, entendiéndose que la parte deteriorada debe abarcar como mínimo, el ancho de la losa y 0,5 [m] en la dirección de la vía.

3.4.2.3 Cepillado de juntas y puntos altos

Medida utilizada con objeto de reducir las irregularidades, mejorando la serviciabilidad y prolongando la vida útil. El cepillado, trabaja con una máquina que contiene una rueda

cortadora, el cual elimina las irregularidades generadas por el escalonamiento de las juntas y aumenta la fricción entre el neumático y el pavimento.

3.4.2.4 Reemplazo de losas

Retiro y reemplazo de las losas que se encuentran muy deterioradas.

3.4.3 Conservaciones mayores

3.4.3.1 Recapados

Aplicación de una carpeta de rodadura, ya sea de hormigón o asfalto, con el objetivo de aportar en el desempeño estructural del pavimento.

3.4.3.2 Pulverizado

Conservación que utiliza una máquina capaz de pulverizar el hormigón, pudiendo utilizarse este material, como una capa base para el nuevo pavimento.

3.4.3.3 Reconstrucción

La presente medida de conservación se encuentra descrito en el apartado 3.3.3.3 de la presente memoria.

4 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS CONSIDERADOS EN LA MEMORIA

4.1.1 Métodos para Pavimentos Flexibles

En Chile el diseño de pavimentos flexibles es realizado solamente por métodos empíricos.

Los métodos empíricos se cimientan en la observación del comportamiento de la estructura cuando es sometida a cargas de tráfico, en un cierto ambiente.

Uno de los primeros métodos, corresponde a los desarrollados por el Departamento de Carreteras del Estado de California en 1929. Estos métodos proponen la existencia de una relación entre el espesor del pavimento y el CBR de las capas del suelo. De manera especial, se destaca el método AASHTO desarrollado en los años 50 y cuya última versión para el diseño de pavimentos asfálticos es del año 1993.

4.1.1.1 AASHTO 93

El método AASHTO 93 encuentra su origen en las pruebas de caminos AASHO, realizadas durante los años 1958-1960 en Illinois, EE.UU. En aquellas pruebas se utilizaron dos capas de rodadura (hormigón y asfalto), cuatro tipos de bases granulares y un tipo de subbase y subrasante. Durante los ensayos se tomaron datos del pavimento, dando origen a la AASHO Interim Guide (1961). Posteriormente se realizaron diversas revisiones y modificaciones en los años 1972, 1981, 1986 y finalmente el año 1993, en el que se fueron incorporando los conceptos de confiabilidad, variabilidad y rehabilitación.

El método realizado por AASHTO proporciona gran importancia al concepto de serviciabilidad. Este es un parámetro que cuantifica el grado de deterioro del pavimento y para ello, se introduce el concepto de PSI.

AASHTO 93 se utiliza en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos que se encuentran sometidos a niveles de tráfico bajo, medio y alto. Sin embargo, como las ecuaciones fueron calibradas de mediciones efectuadas en Illinois, que presenta condiciones parecidas a las del sur

de nuestro país; no se garantiza que la aplicación de este método de diseño en las otras regiones de Chile, proporcione desempeños apropiados del pavimento.

4.1.1.2 Diseño MOP

El método de diseño ideado por MOP, está basado principalmente en el método AASHTO 93. Sin embargo, el método MOP incorpora algunas precisiones y complementos, de tal manera de ajustar el método AASHTO a la realidad chilena. En base a lo anterior, es que el procedimiento desarrollado por MOP, no se debe utilizar en el diseño de pavimentos en la Zona Norte del país.

El procedimiento ideado por MOP introduce una serie de modelaciones matemáticas capaces de ajustar de mejor manera los parámetros de diseño, a la situación real de donde se proyecta la vía. Es ahí que MOP introduce el concepto de Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (TMAPA), cuyo valor permite determinar el número estructural mínimo que deben tener las capas asfálticas. El cálculo del número estructural mínimo de las capas asfálticas, se realiza a través de tablas y gráficos, diseñados por MOP. Luego el número estructural de las capas no ligadas (subbases y bases) se determina como la diferencia entre el número estructural total y el número estructural de las capas asfálticas.

4.1.2 Métodos para Pavimentos Rígidos

A diferencia de lo que sucede en el diseño de pavimentos flexibles, existen diversos métodos de diseño para los pavimentos rígidos. El primero de ellos es el método AASHTO 93, cuyo enfoque es netamente empírico y del cual ya se habló de sus orígenes en el apartado 4.1.1. Cinco años después de haber salido el diseño AASHTO 93, apareció AASHTO 98 solo para pavimentos rígidos, el que tiene un enfoque empírico-mecánico. Finalmente, el año 2008 apareció AASHTO 2008 o MEPDG, que junto al método OPTIVE tienen un enfoque mecánico-empírico.

4.1.2.1 AASHTO 93

La descripción del método AASHTO 93 para pavimentos rígidos, corresponde a la señalada en el apartado 4.1.1.1 de la presente memoria.

4.1.2.2 AASHTO 98

Como AASHTO 98 es un método de diseño empírico-mecánica, este mantiene las concepciones básicas del método AASHTO 93, pero añadiendo modificaciones a la ecuación de diseño; ya que integra los conceptos de tensiones críticas producto de las cargas de borde, efectos de temperatura y diversas condiciones de borde. Por otra parte, se incluye la verificación por escalonamiento (losas con o sin barras de traspaso) y el agrietamiento de esquina (únicamente para losas sin barras de traspaso).

4.1.2.3 AASHTO 2008 o MEPDG

En el año 2008, AASHTO, publicó un nuevo método de diseño que implica un cambio completo en lo que respecta a las antiguas metodologías de diseño. Con la llegada de la nueva guía, se pasó de métodos de diseño empíricos, a un método mecánico-empírico. En otras palabras, el diseño no se enfoca solamente en la serviciabilidad, sino en la predicción de los deterioros del pavimento (agrietamiento transversal, escalonamiento y la regularidad superficial) y se ingresa una gran cantidad de datos tanto del tránsito, clima y materiales, provocando que los diseños resulten ser mucho más precisos.

La Universidad Técnica Federico Santa María, a través del proyecto INNOVA 11BPC-10220, logró determinar los factores de calibración de los deterioros del pavimento de hormigón, en conjunto a una base de datos de clima, tráfico y materiales chilenos, que permite utilizar MEPDG a la realidad de Chile.

4.1.2.4 OPTIPAVE

En el año 2009, apareció el software OptiPave, un sistema creado por la compañía chilena TCPavements y calibrado de acuerdo a los estudios de la Universidad de Illinois, EE.UU.

Optipave consiste en el diseño de losas con geometría optimizada, donde la reducción de las tensiones en el pavimento se logra a través de losas más pequeñas que las tradicionales, dado que se espera tener cargada en la losa solamente una rueda del camión. Y al igual que MEPDG, OptiPave es un programa mecanicista-empírico que trae consigo modelos de predicción de deterioros.

Para el desarrollo de la presente memoria se utilizará la versión la versión 2.1.1, del software. Este es gratuito para actividades académicas, organismos gubernamentales, diseñadores y empresas constructoras de EE.UU, México, Centroamérica y Sudamérica excepto para Bolivia. Sin embargo, en el caso de que el software sea utilizado para el diseño real de pavimentos de hormigón con geometría optimizada, es importante aclarar que los pavimentos diseñados con OptiPave se encuentran sujetos a protección industrial.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA MATRIZ DE ESCENARIOS DE DISEÑO

Para el cálculo del presente estudio, se determinó tomar tres valores representativos para la calidad del suelo y el tránsito. Es por ello, que se desarrolla una matriz de diseño donde se refleja el resultado obtenido para cierto volumen de tránsito y cierta calidad del suelo. En la Tabla 4-1, se visualiza la matriz utilizada con sus valores característicos.

Tabla 4-1 Matriz de Diseño de Pavimento
Fuente: Elaboración Propia

		EE		
		30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4			
	10			
	20			

En el caso del diseño de los pavimentos de hormigón se utiliza un cuarto valor de volumen de tránsito, correspondiente a los 100.000.000 EE.

El período de diseño a utilizar en la matriz es de 20 años, y este valor fue seleccionado por ser un lapso de tiempo típico usado en Chile.

Cabe mencionar que el uso de una capa de mejoramiento del suelo, es una recomendación dada y no involucra obligatoriedad para el diseñador.

4.3 DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS DEL DISEÑO

4.3.1 Pavimentos Flexibles

En la presente memoria los diseños de pavimentos asfálticos realizados, no consideran una capa de mejoramiento del suelo o geotextil. El Manual de Carreteras, Vol.3, recomienda o aconseja el

uso de una capa de mejoramiento del suelo de mínimo 30 cm, sin embargo el uso de ésta no es obligatorio y se deja a criterio de cada diseñador. Cabe señalar que las pruebas de AASHTO para el desarrollo del método de diseño AASHTO 93, solamente consideraban bases y subbases, instaladas sin una capa que mediara entre ellas y la subrasante. Esta subrasante, tenía un valor de CBR saturado que va entre los 2 – 4 %. Por lo que el desarrollo del método de diseño AASHTO, se asemeja al escenario de diseño de la presente memoria con CBR 4%.

Para los diseños de suelo con CBR 4%, al no hacer uso de capas de mejoramiento, el mismo método compensa la debilidad del suelo con mayores espesores en la capas granulares. A fin de cuentas, en términos de costos, no existen grandes diferencias.

4.3.1.1 AASHTO 93 sin Verificación por Capas

En el desarrollo de los diseños de los pavimentos asfálticos de la presente memoria, a través del método AASHTO 93, se hace necesario mencionar que éstos no fueron realizados haciendo uso de la verificación por capas. Por ende, para hacer efectivo el método en diseños reales de pavimentos asfálticos, es obligatorio realizar la respectiva verificación.

Sin embargo, se aclara que la utilización de la verificación por capas arroja valores mayores del espesor de la capa asfáltica, lo que ocasiona un costo inicial mayor a los obtenidos en el presente estudio.

En lo que respecta a las correlaciones de CBR/Módulo Resiliente, Confiabilidad y coeficiente de drenaje, no son los utilizados por el método AASHTO 93, sino que son valores o correlaciones recomendadas por MOP.

4.3.1.1.1 Datos de entrada

Las ecuaciones características para el diseño de pavimentos flexibles, son las siguientes:

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} 10^{-(16,4 - Z_R * S_0)} M_R^{2,32} \left(\frac{p_i - p_f}{4,2 - 1,5} \right)^{1/B} \quad \text{(Ecuación 4-1)}$$

$$B = 0,40 + \left[\frac{97,811}{NE + 25,4} \right]^{5,19} \quad \text{(Ecuación 4-2)}$$

Donde:

EE: Ejes equivalentes de 80 kN (8,16 ton) de rueda doble.

- NE : Número estructural [mm].
- pf : Índice de serviciabilidad final del pavimento.
- pi : Índice de serviciabilidad inicial del pavimento.
- Z_R : Coeficiente estadístico asociado a la confiabilidad.
- S_0 : Desviación estándar combinada la estimación de los parámetros.
- M_R : Módulo Resiliente de la subrasante [MPa].

a. Módulo Resiliente de la subrasante:

Para el cálculo del Módulo Resiliente, es necesario utilizar correlaciones entre el CBR de cada suelo, con el Módulo Resiliente. En consideración a ello, es que se utilizan las ecuaciones del Volumen 3 del Manual de Carreteras, inciso 3.604.105.

$$M_R \text{ (MPa)} = 17,6 \text{ (CBR)}^{0,64} \text{ para CBR} < 12\% \quad \text{(Ecuación 4-3)}$$

$$M_R \text{ (MPa)} = 22,1 \text{ (CBR)}^{0,55} \text{ } 12 \leq \text{CBR} < 80\% \quad \text{(Ecuación 4-4)}$$

La diferencia de hacer uso de la Ecuación 4-3, en desmedro de la Ecuación 4-4, para un CBR 20%, es de solamente un 4,9 % de error. Es más, la Ecuación 4-4, entrega un valor más conservador (114,8 MPa) que el arrojado por la Ecuación 4-3 (119,7 MPa).

Sin embargo, los resultados obtenidos por el proyecto Innova Chile – Corfo 11BPC-10220 (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014), arrojaron que la utilización de correlaciones entre los valores de CBR y Módulo Resiliente no son necesariamente válidas. Por ende, para un diseño real de pavimento se hace obligatorio obtener el Módulo Resiliente de las diversas capas, a través del respectivo ensayo de laboratorio.

b. Serviciabilidad:

Los valores de serviciabilidad recomendados para pavimentos asfálticos son: $p_i=4,2$ y $p_f=2$. Estos estados se miden con el índice de serviciabilidad presente (PSI).

c. Confiabilidad:

El nivel de confianza se controla con el factor de confiabilidad (F_R), que es función del valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Z_R) y la desviación normal del error combinado (S_0). En la Tabla 4-2 se encuentran los valores recomendados por el Manual de Carretera V.3.

Tabla 4-2 Nivel de Confianza y Valor del S_0 en Pavimentos Flexibles
Fuente: Manual de Carreteras, Vol.3 (MOP, 2014)

EE Solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	S_0 en función del coeficiente variación de los suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 5	60	- 0,253	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
5 – 15	60 – 70	- 0,253 – 0,524	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
15 – 30	60 – 75	- 0,253 – 0,674	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
30 – 50	70 – 80	- 0,524 – 0,841	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49
50 – 70	70 – 85	- 0,524 – 1,037	0,42	0,43	0,44	0,47	0,48
70 – 90	70 – 90	- 0,524 – 1,282	0,40	0,41	0,42	0,45	0,46

El factor de confiabilidad (F_R), se determina a través de la siguiente ecuación:

$$F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0} \quad \text{(Ecuación 4-5)}$$

Debido a la existencia de múltiples valores S_0 , se adopta un valor de 0,45. Este valor es el recomendado por la guía de diseño AASHTO 93.

Las confiabilidades utilizadas son:

- Para 2.000.000 EE: 60%
- Para 10.000.000 EE: 65%
- Para 30.000.000 EE: 75%

Mientras que los valores de Z_R utilizados, se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Valores de Z_R utilizados en el Diseño de los Pavimentos Asfálticos
Fuente: Elaboración Propia

EE	Z_R
2.000.000	-0,253
10.000.000	-0,385
30.000.000	-0,674

d. Número estructural:

El Número estructural se obtiene al resolver la Ecuación 4-6.

$$NE = \sum h_i * a_i * m_i \quad \text{(Ecuación 4-6)}$$

Donde:

h_i : Espesor de la capa “i” [mm].

a_i : Coeficiente estructural de la capa “i”.

m_i : Coeficiente de drenaje de la capa “i”. Para las capas asfálticas, $m_i=1$.

El Coeficiente estructural está dado por la Tabla 4-4. En ella los valores utilizados se encuentran encerrados por un rectángulo rojo.

Tabla 4-4 Coeficientes Estructurales para las Capas de Pavimento
Fuente: Manual de Carreteras, Vol.3 (MOP, 2014)

CAPA	CARACTERÍSTICAS	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Subbase granular	CBR = 40%	0,12
Base granular	CBR = 80%	0,13
Base asfáltica graduación gruesa	6.000 N	0,33
Base Asfáltica graduación abierta		0,28
Grava-emulsión		0,30
Concreto asfáltico, capa intermedia	8.000 N	0,41
Concreto asfáltico de superficie	9.000 N	0,43
Mezclas drenantes		0,32
Microaglomerado discontinuo en caliente		0,40
Mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt)		0,43

Por otro lado, los coeficientes de drenaje se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Coeficientes de Drenaje (m_i)
Fuente: Manual de Carreteras, Vol.3 (MOP, 2014)

REGION	PRECIP.	BASE PERMEABLE	BASE : FINOS HASTA 10%		BASE: MAS 10% FINOS	
			SUBRAS. GRAN.	SUBRAS. FINOS	SUBRAS. GRAN.	SUBRAS. FINOS
IV	<= 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,05
	> 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,05 - 0,80
V a VI	<= 150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,00
	> 150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
VII a IX	<= 350 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,00	0,80
	> 350 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,25 - 1,15	1,00-0,80	0,80
X	<= 1.500 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,15	1,00-0,80	0,80 - 0,60
	> 1.500 mm	1,35 - 1,30	1,15 - 1,00	1,15 - 1,00	0,80	0,60
XI y XII	<= 500 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
	> 500 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,15	0,80	0,80

Base permeable: menos de 3% de finos y/o coeficiente de permeabilidad > 0,01 cm/s
Subras Gran.: subrasante granular, máximo 35% pasa tamiz de 0,08 mm
Subras Finos: subrasante de suelo fino.

El valor de m_i , representativo para la Zona Central, tiene un valor de 1,15.

4.3.1.1.2 Resultados del diseño

El diseño por AASHTO 93, fue realizado según los valores mínimos de espesor de las carpetas asfálticas que debe tener el pavimento, según sea el volumen del tránsito. La utilización de este criterio de diseño, se debe al alto costo que tienen las carpetas asfálticas al compararlas a las capas granulares, por ende en términos de costos es más conveniente disminuir las capas asfálticas y aumentar los espesores de las capas granulares. Los espesores mínimos son entregados en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Espesor mínimo [in] de la Carpeta Asfáltica en función de los EE.
Fuente: AASHTO 93

TRÁNSITO (ESAL's) EN EJES EQUIVALENTES	CARPETAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	BASES GRANULARES
Menor de 50.000	1.0 ó T.S.	4.0
50.001 - 150.000	2.0	4.0
150.001 - 500.000	2.5	4.0
500.001 - 2'000.000	3.0	6.0
2'000.001 - 7'000.000	3.5	6.0
Mayor de 7'000.000	4.0	6.0

T.S. = Tratamiento superficial con sellos.

En la Tabla 4-7, se muestran los valores mínimos utilizados en el diseño de los espesores de las carpetas asfálticas.

Tabla 4-7 Espesores mínimos de las Carpetas Asfálticas utilizadas en el Diseño de los Pavimentos Flexibles
Fuente: Elaboración Propia

EE	Espesor Carpetas Asfálticas [mm]
2.000.000	80
10.000.000	100
30.000.000	110

En lo que respecta a los módulos resilientes de las subrasantes en la Tabla 4-8 se entregan sus resultados.

Tabla 4-8 Valores de los Módulos Resilientes de la Subrasante
Fuente: Elaboración Propia

CBR [%]	4	10	20
M_R [MPa]	42,74	76,83	114,8

El efecto del factor de confiabilidad (F_R) en los Ejes Equivalentes, se expresa en la Tabla 4 -9.

Tabla 4-9 Relación del F_R y los Ejes Equivalentes en los Pavimentos Flexibles
Fuente: Elaboración Propia

EE	F_R	$EE_{\text{diseño}} = EE * F_R$
2.000.000	1,3	2.600.000
10.000.000	1,49	14.900.000
30.000.000	2,01	60.300.000

Al ingresar los datos de entradas y los valores de los módulos resilientes, se obtienen los resultados para el diseño en AASHTO 93, los cuales son entregados en la Tabla 4-10. Los resultados muestran el espesor que tiene cada capa que compone el pavimento flexible.

Tabla 4-10 Resultados del Diseño AASHTO 93 en Pavimentos Flexibles
Fuente: Elaboración Propia

			EE		
			30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Capa Rodadura [cm]	5	5	4
		Carpeta Binder [cm]	6	5	4
		Base [cm]	34	25	19
		Subbase [cm]	36	27	20
	10	Capa Rodadura [cm]	5	5	4
		Carpeta Binder [cm]	6	5	4
		Base [cm]	25	19	13
		Subbase [cm]	28	19	14
	20	Capa Rodadura [cm]	5	5	4
		Carpeta Binder [cm]	6	5	4
		Base [cm]	21	14	10
		Subbase [cm]	22	15	11

4.3.1.2 DISEÑO MOP

4.3.1.2.1 Datos de entrada

Dado que el diseño MOP está basado principalmente por el método AASHTO 93, es que los datos de entradas se encuentran en el apartado 4.1.3.2. Mientras que el cálculo de la TMAPA, se realiza con la siguiente relación:

$$TMMA (^{\circ}C) = 20,348 + 17,5683 \log W_i \quad (\text{Ecuación 4-7})$$

Donde:

$TMMA(^{\circ}C)$: Temperatura media mensual del aire.

W_i : Factor de ponderación.

La TMMA es la temperatura representativa de cada mes y al usar la Ecuación 4-7, se determina el factor W_i para cada mes. Por último, la TMAPA se determina calculando el factor de ponderación promedio del año (W_{ip}), que se introduce en la Ecuación 4-7 ahora de manera inversa, dando como resultado el TMAPA.

4.3.1.2.2 Resultados del diseño

Los valores de los módulos resilientes corresponden a los de la Tabla 4-8, mientras que el efecto de factor F_R se encuentra en la Tabla 4-9.

Para la obtención de los diseños según el método MOP, se utiliza el software PAVIVIAL. Donde el TMAPA seleccionado es igual a 15,7 °C, correspondiente a la estación meteorológica de Quinta Normal, según la Lámina 3.604.108A del Manual de Carreteras. En la Tabla 4-11 se entregan los resultados obtenidos.

Tabla 4-11 Resultados del Diseño MOP en Pavimentos Flexibles
Fuente: Elaboración Propia

			EE		
			30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Capa Rodadura [cm]	10	8	6
		Carpeta Binder [cm]	11	9	7
		Base [cm]	15	14	11
		Subbase [cm]	17	14	11
	10	Capa Rodadura [cm]	9	7	5
		Carpeta Binder [cm]	10	8	6
		Base [cm]	11	10	8
		Subbase [cm]	11	10	9
	20	Capa Rodadura [cm]	8	6	4
		Carpeta Binder [cm]	9	7	4
		Base [cm]	8	8	9
		Subbase [cm]	10	9	10

4.3.2 Pavimentos Rígidos

Para el cálculo de los pavimentos rígidos de la presente memoria, se debe tener en consideración que cuando se está en presencia de un suelo con “x” valor y un tránsito de “y” valor, el espesor de la subbase será el mismo para los 4 métodos de diseño. Con ello se busca poder comparar solamente los espesores de las losas que arrojan los distintos métodos de diseño, porque la capacidad de carga de este tipo de pavimentos viene dada por la losa misma. Es por ello que tampoco se considerará la utilización de geotextiles y capas de mejoramiento del suelo, y a la vez, el CBR de la subbase tendrá el mismo valor de 60% para todos los métodos; aunque las especificaciones técnicas del método OPTIPAVE aconsejen la utilización de algunas de las

consideraciones nombradas anteriormente, ya que la utilización de estas consideraciones no disminuye considerablemente el espesor obtenido. Es más la instalación de la losa sobre un pavimento asfáltico, no mejora de manera sustancial el resultado, obteniendo valores similares a los de una losa instalada sobre una subbase granular.

4.3.2.1 AASHTO 93

4.3.2.1.1 Datos de entrada

Las ecuaciones características para el diseño de pavimentos rígidos mediante el método AASHTO 93, son las siguientes:

$$EE = \left[\frac{H+25,4}{25,882} \right]^{7,35} * 10^\alpha * B^{(4,22-0,32*pf)} \quad \text{(Ecuación 4-8)}$$

$$\alpha = \frac{\log \left[\frac{pi-pf}{4,5-1,5} \right]}{1 + \left[\frac{180,779}{H+25,4} \right]^{8,46}} + Z_R * S_0 \quad \text{(Ecuación 4-9)}$$

$$B = \frac{R_m * C_d * J}{1,487 * J} * \left[\frac{H^{0,75} - 12,808}{H^{0,75} - 83,200 * \left(\frac{K}{E} \right)^{0,25}} \right] \quad \text{(Ecuación 4-10)}$$

Donde:

EE: Ejes equivalentes de 80 kN (8,16 ton) de rueda doble.

H: Espesor de la Losa [mm].

E: Módulo de Elasticidad del Hormigón [MPa].

K: Módulo de reacción del suelo [MPa/m].

pf: Índice de serviciabilidad final del pavimento.

pi: Índice de serviciabilidad inicial del pavimento.

Z_R: Coeficiente estadístico asociado a la confiabilidad.

S₀: Desviación estándar combinada la estimación de los parámetros.

R_m: Resistencia media del hormigón a la flexotracción a los 28 días [MPa].

C_d: Coeficiente de Drenaje.

J: Coeficiente de Transferencia de carga.

a. Espesor de la Losa:

En el diseño se determina que el espesor de la losa es la variable a determinar en los cálculos.

b. Módulo de Elasticidad del hormigón:

El Manual de Carreteras en su Volumen 3, recomienda utilizar un Módulo de Elasticidad del hormigón de 29.000 [MPa].

c. Resistencia a la Flexotracción:

En la Tabla 4-12 se presentan los valores recomendados por el Manual de Carreteras, Vol. 3.

Tabla 4-12 Resistencia a la Flexotracción
Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3 (MOP, 2014)

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

El valor a utilizar de R_m es de 5 [MPa], que representa al promedio de las vías colectoras y autopistas.

d. Módulo de reacción :

El módulo de reacción, es el parámetro que permite caracterizar la capacidad de soporte del suelo. Este se modela como si fuese un resorte de constante k. Para ellos se utilizan dos correlaciones de CBR.

$$K(\text{MPa}/\text{m}) = 2,55 + 52,5 * \log CBR \quad CBR \leq 10\% \quad (\text{Ecuación 4-11})$$

$$K(\text{MPa}/\text{m}) = 46 + 9,08 * (\log CBR)^{4,34} \quad 10\% < CBR \quad (\text{Ecuación 4-12})$$

Debido a que en los pavimentos de hormigón es habitual la utilización de una capa de subbase, es que se debe considerar el aporte de este en el módulo de reacción. Para ello se utiliza el Módulo de reacción combinado (K_c).

$$K_c = k_0 * \left[1 + \left(\frac{h}{38} \right)^2 * \left(\frac{k_1}{k_0} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 4-13)}$$

Donde:

K_c : Módulo de reacción combinado [Kg/cm³].

k_1 : Módulo de reacción de la base [Kg/cm³].

k_0 : Módulo de reacción de la subrasante [Kg/cm³].

h : Espesor de la base [cm].

e. Serviciabilidad:

Los valores de serviciabilidad recomendados para pavimentos rígidos son: $p_i=4,5$ y $p_f=2,5$.

f. Confiabilidad:

Al igual que en los pavimentos flexibles, el nivel de confianza se controla con el factor de confiabilidad (F_R), que es función del valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Z_R) y la desviación normal del error combinado (S_0). En la Tabla 4-13 se encuentran los valores recomendados por el Manual de Carretera V.3

Tabla 4-13 Nivel de Confianza y Valor del S_0 en Pavimentos Rígidos
Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3 (MOP, 2014)

EE Solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	S_0 en función del coeficiente variación de los suelos				
			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

El factor de confiabilidad (F_R), se determina de la misma manera que en los pavimentos asfálticos.

Debido a la existencia de múltiples valores S_0 , se adopta un valor de 0,35.

Las confiabilidades utilizadas, se muestran en la Tabla 4-14:

Tabla 4-14 Confiabilidades utilizadas en los Pavimentos Rígidos
Fuente: Elaboración Propia

EE	Confiabilidad
2.000.000	60%
10.000.000	60%
30.000.000	70%
100.000.000	90%

Mientras que los valores de Z_R utilizados, se muestran en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15 Valores de Z_R utilizados en el Diseño de los Pavimentos Rígidos
Fuente: Elaboración Propia

EE	Z_R
2.000.000	-0,253
10.000.000	-0,253
30.000.000	-0,524
100.000.000	-1,282

g. Coeficiente de drenaje:

En la Tabla 4-16, se entregan los valores recomendados por el Manual de Carreteras.

Tabla 4-16 Coeficiente de Drenaje Pavimentos Rígidos
Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3 (MOP, 2014)

Drenaje Longitudinal	Clima	Subrasante Suelos finos		Subrasante Suelos Granulares	
		Base		Base	
		No-Permeable	Permeable	No-Permeable	Permeable
No	Húmedo	0,70 – 0,90	0,85 – 0,95	0,75 – 0,95	0,90 – 1,00
No	Seco	0,90 – 1,10	0,95 – 1,05	0,90 – 1,15	1,00 – 1,10
Si	Húmedo	0,75 – 0,95	1,00 – 1,10	0,90 – 1,10	1,05 – 1,15
Si	Seco	0,95 – 1,15	1,10 – 1,20	1,10 – 1,20	1,15 – 1,20

Como el clima de la Zona Central es más seco que húmedo e independiente del drenaje longitudinal, un $C_d = 1$ es el valor más representativo para la Zona Central.

h. Coeficiente de transferencia de carga

La recomendación del SERVIU Metropolitano para el valor del coeficiente de transferencia de carga (J) es que este varía entre 3,6 y 3,8. Para efecto de cálculo, se determina en la presente memoria un valor de $J=3,7$.

4.3.2.1.2 Resultados del diseño

En la Tabla 4-17, se entregan los valores de “k” obtenidos al utilizar la correlación del CBR.

Tabla 4-17 Valores de los Módulos de Reacción de la Subrasante y Subbase
Fuente: Elaboración Propia

CBR [%]	4	10	20	60 (Subbase)
K [MPa/m]	34,16	55,05	74,45	156,4

El efecto del factor de confiabilidad (F_R) en los Ejes Equivalentes se refleja en la Tabla 4 -18.

Tabla 4-18 Relación del F_R y los Ejes Equivalentes en los Pavimentos Rígidos
Fuente: Elaboración Propia

EE	F_R	$EE_{\text{diseño}} = EE * F_R$
2.000.000	1,23	2.460.000
10.000.000	1,23	12.300.000
30.000.000	1,53	45.900.000
100.000.000	2,81	281.000.000

Al ingresar los datos de entradas y los valores de los módulos de reacción combinado, el cual no son presentados, se obtienen los resultados para el diseño en AASHTO 93, los que son entregados en la Tabla 4-19. Los resultados muestran el espesor que tiene tanto la losa de hormigón como la subbase del pavimento rígido.

Tabla 4-19 Resultados del Diseño AASHTO 93 en Pavimentos Rígidos
Fuente: Elaboración Propia

			EE			
			100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]	36	25	20	16
		Espesor Subbase [cm]	23	20	20	17
	10	Espesor Losa [cm]	36	25	20	16
		Espesor Subbase [cm]	22	20	20	17
	20	Espesor [cm]	36	24	19	15
		Espesor Subbase [cm]	20	20	19	15

4.3.2.2 AASHTO 98

4.3.2.2.1 Datos de entrada

A continuación, se presentan las ecuaciones características para el diseño de pavimentos rígidos mediante el método AASHTO 98.

$$\log EE = \log R + \frac{G}{F} + (5,065 - 0,03295 * pf^{2,4}) * \left(\log \left(\frac{R_m}{\sigma_t'} \right) - \log \left(\frac{4,754}{\sigma_t} \right) \right) + Z_R * S_0 \quad (\text{Ecuación 4-14})$$

$$\log R = 5,85 + 7,35 * \log \left(\left(\frac{H}{25,4} \right) + 1 \right) - 4,62 * \log \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right) + 3,28 * \log(L_2) \quad (\text{Ecuación 4-15})$$

$$F = 1,00 + \frac{3,63 * \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right)^{5,2}}{\left(\left(\frac{H}{25,4} \right) + 1 \right)^{8,46} * L_2^{3,52}} \quad (\text{Ecuación 4-16})$$

$$G = \log \left(\frac{pi - pf}{pi - 1,5} \right) \quad (\text{Ecuación 4-17})$$

Donde:

EE : Ejes equivalentes de 80 kN (8,16 ton) de rueda doble.

H : Espesor de la Losa [mm].

L_1 : Carga de eje simple 80 kN.

L_2 : Código de eje simple =1.

pf : Índice de serviciabilidad final del pavimento.

pi : Índice de serviciabilidad inicial del pavimento.

Z_R : Coeficiente estadístico asociado a la confiabilidad.

S_0 : Desviación estándar combinada la estimación de los parámetros.

R_m : Resistencia media del hormigón a la flexotracción a los 28 días [MPa].

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

σ_t : Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde [MPa], considerando efecto de temperatura, en las condiciones de la Prueba AASHTO.

Como el objetivo de la presente memoria no es hacer un análisis de los modelos de deterioros ni de las ecuaciones de diseño, se considera irrelevante presentar las ecuaciones que dan origen a las tensiones de tracción máxima y a las verificaciones. Si se estima necesario conocerlos, debe recurrir al capítulo 3.604.2 del Volumen 3 del Manual de Carreteras.

Dado que el método AASHTO 98 utiliza como base el método AASHTO 93, casi la totalidad de los datos de entrada se encuentran descritos en el apartado 4.3.2.1.1, y solamente los datos del coeficiente de drenaje y coeficiente de transferencia de carga, no son utilizados.

Sin embargo, se deben agregar una serie de otros datos de entradas.

a. Largo de la Losa:

Para tener un desempeño óptimo se determina un largo de losa de 3,5 [m].

b. Factor de ajuste por tipo de berma:

En la Tabla 4-20, se muestran los valores recomendados por el Manual de Carreteras.

Tabla 4-20 Factor de Ajuste por Tipo de Berma
Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3 (MOP, 2014)

Tipo de Berma	Factor TB
Borde libre	1,00
Berma de hormigón amarrada	0,94
Berma de pista ensanchada	0,92

Para la presente memoria se selecciona el caso más desfavorable, o sea borde libre con Factor TB=1.

c. Factor de ajuste por tipo de berma:

En la Tabla 4-21, se muestran los valores recomendados por el Manual de Carreteras.

Tabla 4-21 Factor de Fricción Subbase/Losa
Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3 (MOP, 2014)

Tipo de Material de Base	Módulo Elasticidad (MPa)	Coeficiente de Fricción		
		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	$(3,45+f_c') \cdot 1000$	8,0	34	63
Base Tratada con Asfalto	2067 – 4134	3,7	5,8	10
Hormigón Pobre sin Compuesto Curado	$(3,45+f_c') \cdot 1000$	> 36		
Hormigón Pobre con Simple o Doble Compuesto Curado.	$(3,45+f_c') \cdot 1000$	3,5	-	4,5

Para la presente memoria se selecciona una subbase granular con coeficiente de fricción medio, por ello el valor es de 1,4.

d. Razón de Poisson del Hormigón μ :

Para los hormigones de características normales el valor de μ recomendado es de 0,15.

e. Módulo elástico de la subbase:

Como el CBR de la subbase tiene un valor del 60%, se debe utilizar la Ecuación 4-4 para obtener el módulo elástico de la respectiva subbase.

f. Datos climáticos:

Los datos climáticos utilizados, corresponden a los de la estación climatológica de Quinta Normal y se encuentran en el apartado 3.604.210 del Manual de Carreteras.

g. Otros datos:

No se considera la presencia de drenes laterales y de barras de traspaso de carga.

4.3.2.2.2 Resultados del diseño

Al utilizar la correlación entre CBR y Módulo Resiliente de la Ecuación 4-4, para el valor de CBR de la subbase, se obtiene un $M_R=210$ [MPa].

Los valores de los módulos de reacción de la subrasante corresponden a los de la Tabla 4-17, por otra parte, el efecto de factor F_R se encuentra en la Tabla 4-18.

Se utiliza el software PAVIVIAL para el diseño de los pavimentos. En la Figura 4-1 se muestra como ejemplo el ingreso de los datos de entrada, correspondiente al diseño para un suelo con CBR 10% y 10.000.000 EE.

Índice de Serviciabilidad Inicial, P1:	4,5	--	Longitud de la Losa	3,5	m			
Índice de Serviciabilidad Final, P2:	2,5	--	TIPO DE BERMA					
Resistencia a la Flexotracción a 28 días, S'_c :	5,0	MPa				<input checked="" type="radio"/> Berma Granular ó Asfáltica		
Módulo Elástico del Hormigón, E_c :	29.000	MPa				<input type="radio"/> Berma de Hormigón Amarrada		
Razón de Poisson del Hormigón, μ :	0,15	--				<input type="radio"/> Sobreebancho 0,6 m + Berma Granular ó Asfáltica		
Módulo Elástico de la Sub-base, E_b :	210	MPa	Factor de Ajuste para Tipo de Berma: 1,00					
Espesor de Diseño de Sub-base, H_b :	200	mm						
Factor de Fricción Sub-base/Losa, f :	1,4	--	Ejes Equivalentes de Diseño					
Nivel de Confiabilidad (R):	60,0	%				10.000		
Desviación Estándar Total, S_0 :	0,35	--	miles					
Velocidad Media Anual del Viento	2,8	Nudos				Tipo de Base		
Temperatura Media Anual del Aire	14,5	°C	GRANULAR					
Precipitación Media Anual	320,4	mm						
Valor k de la subrasante	55	MPa/m						
Nº de Días con Precipitación > a 5 mm, N5	18	Días						
Presencia de DREN Lateral de Calzada	NO	▼	Presencia de Barras de Traspaso de Carga					
Presencia de Barras de Traspaso de Carga	NO	▼						

Figura 4-1 Ejemplo de ingreso de los datos de entrada para un suelo de CBR 10% y 10.000.000 EE
Fuente: Elaboración Propia

Por último, en la Tabla 4-22 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4-22 Resultados del Diseño AASHTO 98 en Pavimentos Rígidos
Fuente: Elaboración Propia

		EE				
		100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000	
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]	33	25	20	15
		Espesor Subbase [cm]	23	20	20	17
	10	Espesor Losa [cm]	33	25	20	15
		Espesor Subbase [cm]	22	20	20	17
	20	Espesor [cm]	34	25	19	15
		Espesor Subbase [cm]	20	20	19	15

4.3.2.3 AASHTO 2008 o MEPDG

4.3.2.3.1 Datos de entrada

Los datos de entrada utilizados son los recomendados y calibrados por “*Guía para la utilización del método AASHTO 2008 para el diseño de pavimentos rígidos en Chile*” (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014). Se utilizan los coeficientes de calibración chilena, los datos del clima corresponden a los de la ciudad de Santiago, mientras que el espectro de carga y los parámetros del tránsito son las del pesaje de Curacaví.

a. Confiabilidad:

A pesar que en el método de diseño AASHTO 98, la confiabilidad se encuentra relacionada con el tránsito, mientras que en MEPDG la confiabilidad está relacionada con los modelos de deterioros; se utilizan para la presente memoria las confiabilidades definidas en el Manual de Carreteras, las que se muestran en la Tabla 4-14.

b. Criterios de desempeño:

Los criterios para todos los niveles de tránsito y calidad del suelo, resultan ser los mismos. El criterio fue determinado para uniformar los diseños. Sin embargo, en los párrafos siguientes se informa de la relevancia de haber dictaminado aquel criterio.

Para volúmenes de tránsito bajos, la relevancia de los valores máximos permitidos la adquiere el agrietamiento transversal, que para bajo tránsito los 30% de agrietamiento es un criterio aceptados por la mayoría de la literatura especializada y lo recomendado por OPTIPAVE. Es necesario aclarar que para bajo tránsito el IRI final resulta ser siempre inferior a los 4 m/Km y el escalonamiento no supera los 5 mm.

Para tránsito medio y alto, la relevancia de los valores máximos permitidos la adquiere el IRI por influencia del escalonamiento, siendo que éste último nunca supera los 5 mm. El agrietamiento para los volúmenes de tránsitos medio y alto, es prácticamente cero, por lo cual no adquiere relevancia en el diseño final.

En síntesis independiente de los criterios utilizados en la presente memoria, solamente hubiese sido necesario establecer que para pavimentos de bajo tránsito haya un agrietamiento del 30% y que para tránsitos medios y altos haya un IRI máximo de 2 mm/Km.

En la Tabla 4-23 se muestran los criterios de desempeño del pavimento.

Tabla 4-23 Criterios de desempeño utilizados en los diseños
Fuente: Elaboración Propia

Tipo de Pavimento	Deterioro	Valor Máximo al final de la Vida Útil de Diseño
Pavimento de Hormigón Simple (JPCP)	Escalonamiento	8 [mm]
	Agrietamiento Transversal de la losa	30%
	IRI (Regularidad Superficial)	4 [m/Km]

Para todos los pavimentos, el IRI inicial es de 2 [m/Km]

c. Parámetros generales de diseño:

- Dimensiones de la losa: Largo y ancho de 3,5 [m].
- Se diseña con barras de transferencia y con la ausencia de esta, de manera de observar el impacto al usar dovelas. En el diseño con barras, el largo es de 40 [cm] y su espaciamiento de 30 [cm], mientras que los diámetros de las barras son los siguientes:

Tabla 4-24 Diámetro de las Barras de Transferencia de carga según los EE.
Fuente: Elaboración Propia

EE	ϕ [mm]
2.000.000	25
10.000.000	25
30.000.000	32
100.000.000	38

- Berma del tipo granular.
- Uso de sello de juntas.
- Pérdida de adherencia: 245 meses (20 años y 5 meses)
- La diferencia de temperatura efectiva a utilizar, corresponde a la que viene por defecto en el programa o sea -10 °F.
- Índice de erosionabilidad: Clase 3.
- Absorción superficial de onda corta: 0,85.

d. Parámetros del hormigón:

Las características del hormigón, tales como: Relación agua-cemento, contenido de cemento, tipo de cemento, tipo de agregado, etc; son parámetros a dejar por defecto al igual que las características térmicas del hormigón.

Sin embargo, el módulo de ruptura, módulo elástico y el módulo de Poisson, del hormigón, son parámetros con valores iguales a los utilizados en AASHTO 93 y AASHTO 98.

e. Parámetros del suelo:

De manera de imitar el comportamiento de los 3 tipos de subrasantes, se seleccionan 3 suelos chilenos de la guía que tengan un CBR similar a los utilizados en la presenta memoria, para ser reemplazado por los valores característicos utilizados en el presente estudio. Luego, se mantiene la respectiva granulometría, límite plástico y líquido, etc; que contiene el suelo de las calibraciones hechas por la guía de diseño.

El CBR de la subbase es de un 60%, correspondiente a un módulo resiliente de 210 MPa.

4.3.2.3.2 Resultados del diseño

En el desarrollo de la presente memoria, se utiliza el programa M-EPDG v.1.100. A continuación, se presenta una serie de figuras mostrando los pasos a seguir en la realización de los diseño.

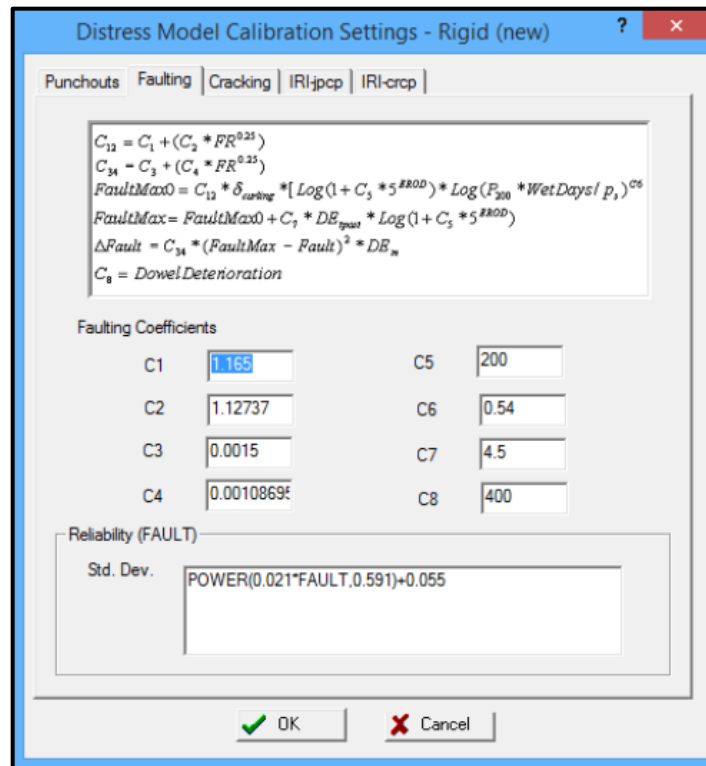


Figura 4-2 Ingreso de la Calibración de los deterioros

Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

Luego se procede a ingresar los datos climáticos.

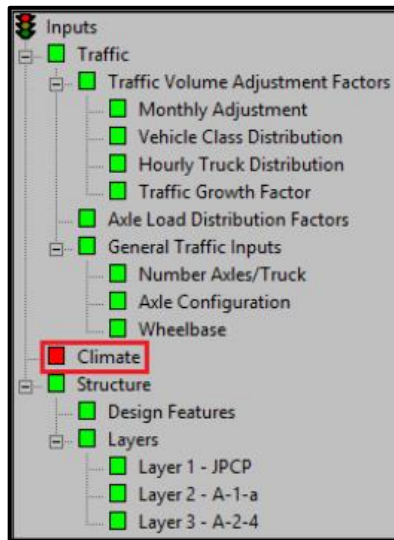


Figura 4-3 Selección del Inputs Climate

Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

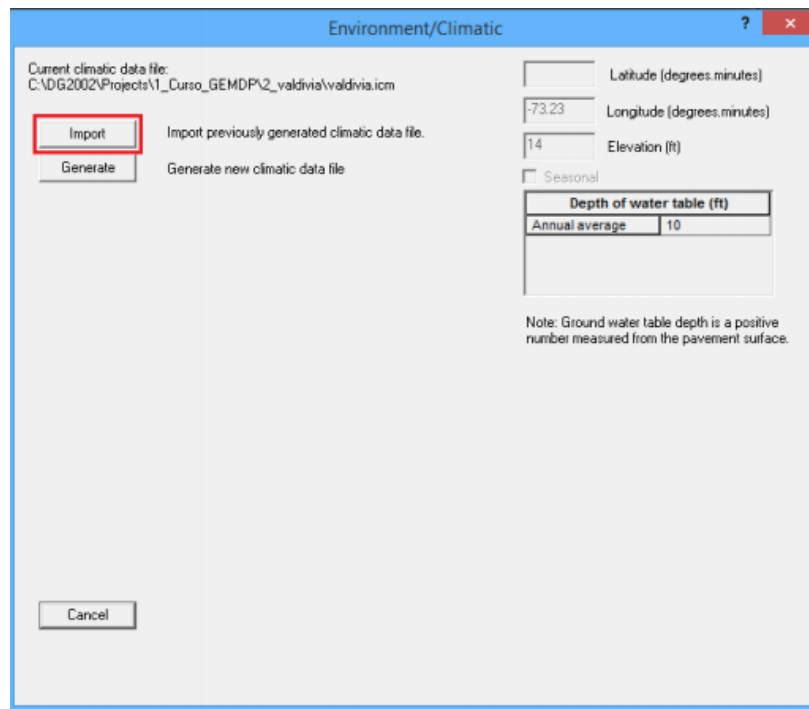


Figura 4-4 Importación de la base climática

Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

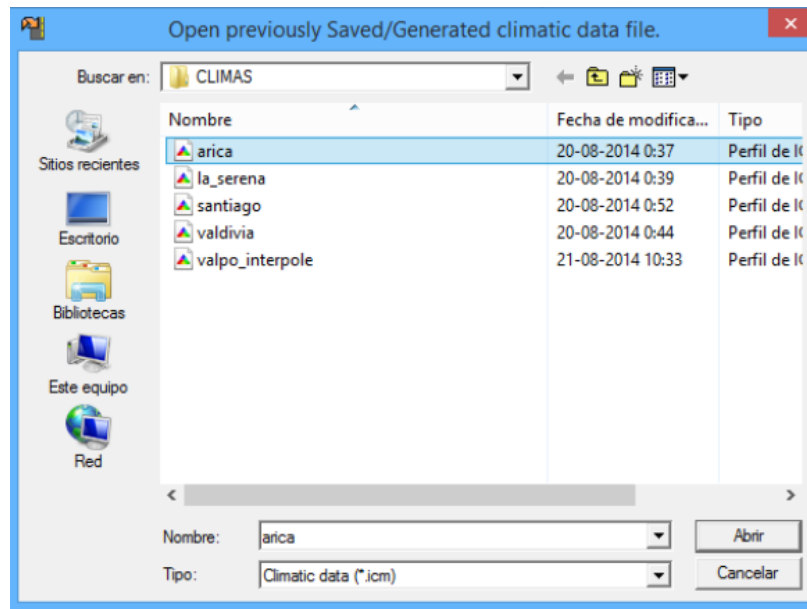


Figura 4-5 Selección de la base climática de Santiago
Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

Para ingresar los datos del tráfico, se selecciona el input *Traffic*. Este trae por defecto los datos del tráfico de Curacaví, por ende, basta ingresar los valores del TMDA inicial.

Tabla 4-25 Relación TMDA Inicial y EE
Fuente: Elaboración Propia

EE	TMDA Inicial
2.000.000	263
10.000.000	1316
30.000.000	3948
100.000.000	13160

The image shows a 'Traffic' dialog box with the following fields and values:

Design Life (years):	20
Opening Date:	October, 2015
Initial two-way AADTT:	1316
Number of lanes in design direction:	2
Percent of trucks in design direction (%):	48.0
Percent of trucks in design lane (%):	95.0
Operational speed (mph):	56

Buttons and options:

- Traffic Volume Adjustment: Edit
- Axle load distribution factor: Edit
- General Traffic Inputs: Edit
- Import/Export: Import/Export
- Traffic Growth: Linear, 4%
- OK (with green checkmark icon)
- Cancel (with red X icon)

Figura 4-6 Ingreso del TMDA Inicial

Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

En el ingreso de los datos del hormigón, se debe ir a la sección Inputs y hacer clic en “Layer 1 – JPCP”.

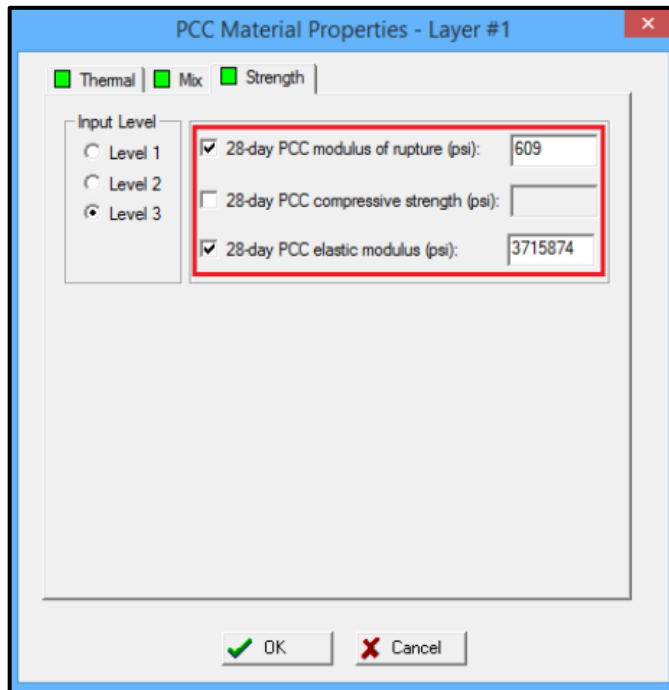


Figura 4-7 Ingreso del Módulo de Ruptura y el Módulo Elástico
 Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

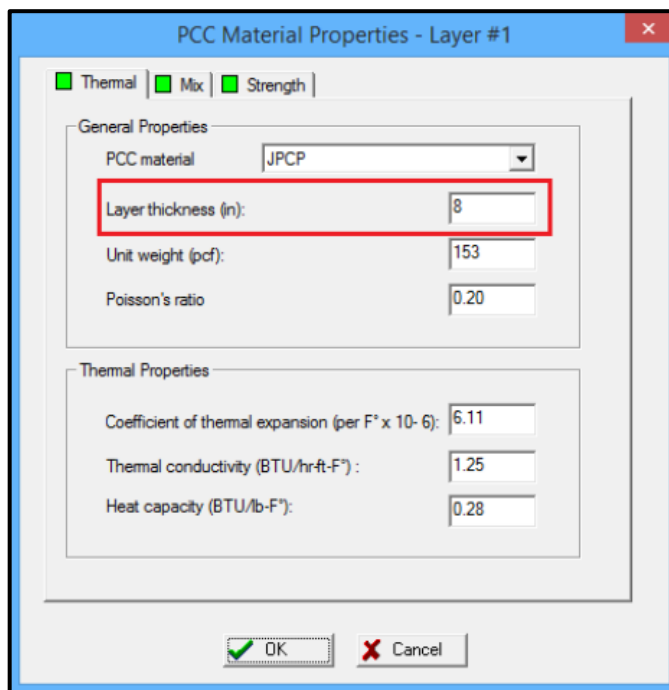


Figura 4-8 Ingreso del Espesor de la losa
 Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

Por otra parte, ingreso de los datos de la subrasante y base, y hacer clic en “Layer 2 o 3”, dependiendo el caso.

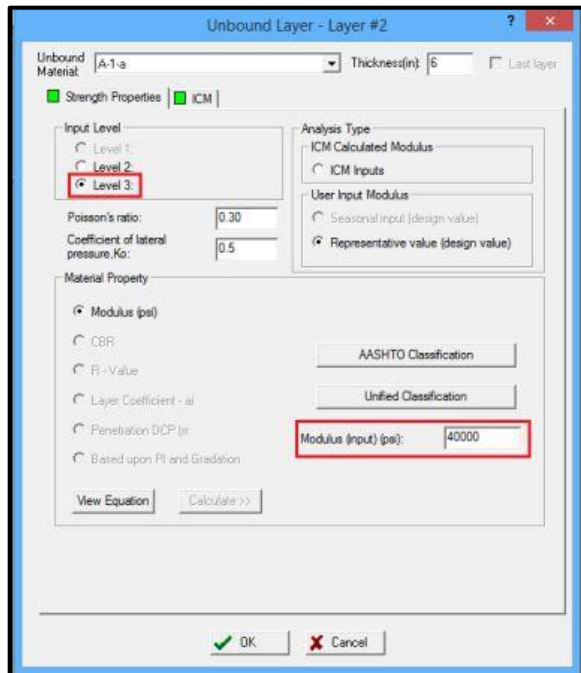


Figura 4-9 Ingreso del Módulo Resiliente del suelo

Fuente: Cuaderno de Ejercicios Curso MEPDG (Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M., 2014)

Al hacer clic en el botón ICM, se ingresa los valores de la granulometría del suelo, los límites plásticos y líquidos, densidad, etc.

Finalmente, en la ventana principal del programa se hace clic en Analysis Parameters, y se ingresan los criterios de desempeños especificados en la Tabla 4-23. Como todos los parámetros ya han sido ingresados, se hace clic en Run Analysis donde se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4-26 Resultados del Diseño MEPDG en Pavimentos Rígidos sin barras de traspaso de carga
Fuente: Elaboración Propia

			EE			
			100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]	47	34	24	16
		Espesor Subbase [cm]	23	20	20	17
	10	Espesor Losa [cm]	46	33	24	16
		Espesor Subbase [cm]	22	20	20	17
	20	Espesor [cm]	45	32	23	16
		Espesor Subbase [cm]	20	20	19	15

Tabla 4-27 Resultados del Diseño MEPDG en Pavimentos Rígidos con barras de traspaso de carga
Fuente: Elaboración Propia

			EE			
			100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]	33	20	18	16
		Espesor Subbase [cm]	23	20	20	17
	10	Espesor Losa [cm]	32	19	18	16
		Espesor Subbase [cm]	22	20	20	17
	20	Espesor [cm]	31	19	17	15
		Espesor Subbase [cm]	20	20	19	15

4.3.2.4 OPTIPAVE

4.3.2.4.1 Datos de entrada

Los datos de entradas utilizados por OPTIPAVE, son muy parecidos a los de MEPDG. Es ahí que los datos climáticos corresponden a las de la zona de Santiago – Chillán.

a. Confiabilidad:

Se utilizan las confiabilidades definidas en el Manual de Carreteras, las que se muestran en la Tabla 4-14.

b. Criterios de desempeño:

En la Tabla 4-23 se muestran los criterios de desempeño, ya mencionado para los diseños por MEPDG. Cabe recordar que el IRI inicial tiene un valor de 2 [m/Km].

c. Parámetros generales de diseño:

- Dimensiones de la losa: Largo y ancho de 1,75 [m].
- Tipo de borde: Libre sin sobreancho.
- OPTIPAVE considera irrelevante el uso del sello de juntas.
- Se diseña con barras de transferencia y con la ausencia de esta, de manera de observar el impacto al usar dovelas. En el diseño con barras, el largo es de 40 [cm] y su espaciamiento de 30 [cm], mientras que los diámetros de las barras son los siguientes:

Tabla 4-28 Diámetro de las Barras de Transferencia de carga según los EE en OPTIPAVE.
Fuente: Elaboración Propia

EE	ϕ [mm]
2.000.000	25
10.000.000	25
30.000.000	25
100.000.000	25

d. Parámetros del tránsito:

OPTIPAVE considera tanto el uso de espectros de carga como el uso de eje equivalentes. Para el desarrollo de la presente memoria se utiliza la opción de ejes equivalentes, creciendo a una tasa del 5% anual.

En la clasificación del tránsito, Federal Highway Administration (FHWA) clasifica el tránsito en unos 17 grupos. Esta clasificación es una descripción cualitativa de las características de los vehículos pesados y el porcentaje de estos vehículos, que transitan por el pavimento. Sin embargo, cuando no existen datos de las características del tránsito, la clasificación se puede realizar de acuerdo al uso que tendrá el pavimento. En la Tabla 4-29 se muestra la clasificación del tránsito utilizado, mientras que el Anexo F se entrega cada uno de los 17 grupos de clasificación, con la respectiva descripción y la recomendación según sea el uso de la vía.

Tabla 4-29 Clasificación del Tránsito utilizada en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

EE	Clasificación de Tránsito
2.000.000	FHWA TTC 9
10.000.000	FHWA TTC 9
30.000.000	FHWA TTC 1
100.000.000	FHWA TTC 1

La distancia a la huella de demarcación y la desviación estándar de ella, son valores que trae por defecto el programa y que a la vez son recomendados por la misma empresa.

e. Parámetros del hormigón:

En su mayoría se utilizan los datos que el programa trae por defecto. Salvo el Módulo de Ruptura (5 MPa) y el Módulo de Elasticidad (29000 MPa), son valores a modificar.

f. Parámetros del suelo:

OPTIPAVE requiere como dato de entrada, el Módulo Resiliente de la subrasante y de la subbase. En las Tabla 4-8, se entregan los módulos resilientes de la subrasante y la de la subbase que tiene un $M_R=210$ [MPa] (valor utilizado para AASHTO 98, MEPDG y OPTIPAVE).

4.3.2.4.2 Resultados del diseño

A continuación, se presenta una serie de figuras correspondiente a los pasos a seguir en el ingreso de los datos. El rango de espesores para los cuales el programa está calibrado, va desde los 60 – 240 mm.

Archivo Configuración Ayuda

Proyecto Diseño Tráfico Hormigón Suelo Clima Resultados

Vida de Diseño: 20 (años)

Largo de Losa: 1,75 (m)

Espesor Losa: 240 (mm)

Calcular Espesor

Tipo de Borde: Libre

Losa Exterior con Sobreancho: No

Barras de Transferencia de Carga: Sí

Interfaz Pavimento-Base: No Adherido

IRI: 2 (m/Km)

Umbral Máximo Admisibles de Diseño

		Confiability
Porcentaje de Losas Agrietadas	30 (%)	90 (%)
IRI	3,5 (m/Km)	90 (%)
Escalonamiento Promedio	8 (mm)	90 (%)

OptiPave 2
TCPavements

Figura 4-10 Ingreso de los Datos Generales y Criterios de Deterioros en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

Archivo Configuración Ayuda

Proyecto Diseño Tráfico Hormigón Suelo Clima Resultados

Método de Análisis de Tráfico: Ejes Equivalentes

Clasificación del Tipo de Tráfico: FHWA TTC 1

Tasa de Crecimiento Anual de Tráfico: 5 (%)

EE Totales en Pista de Diseño: 100,000,000

Distribución Lateral del Tránsito

Distancia de la Huella a Línea de Demarcación: 450 (mm)

Desv. Estándar de la Distribución Lateral del Tráfico: 250 (mm)

Espectro de Carga

TMDA Inicial (Ambos Sentidos) Solo Vehículos Relevantes: 1,000

Porcentaje de Tráfico en Dirección de Diseño: 50 (%)

Porcentaje de Tráfico en Pista de Diseño: 90 (%)

Porcentaje de Tráfico en Verano: 50 (%)

OptiPave 2
TCPavements

Figura 4-11 Ingreso de los Parámetros del Tránsito en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

Archivo Configuración Ayuda

Proyecto Diseño Tráfico Hormigón Suelo Clima Resultados

Tipo de Ensayo de Resistencia: Flexotracción

Edad de Ensayo: 28 Dias MOR a 90 días: 5,87 (MPa)

Flexotracción: 5 (MPa)

Confiabilidad Diseño de Hormigón: 80 (%)

Desviación Estándar Diseño de Hormigón: 0,4 (MPa)

Aumento de Resistencia 29 a 90 Dias: 1,1

Módulo de Elasticidad del Hormigón: 29.000 (MPa)

Peso Específico del Hormigón: 2.400 (Kg/m³)

Módulo de Poisson: 0,15

Coefficiente de Dilatación Térmico (10⁻⁶): 11 (1/°C)

Retracción del Hormigón a los 365 Dias: 700 (microstrain)

Contenido de Aire: 3 (%)

Relación Agua-Cemento: 0,5

Fibra Estructural: No

Método de Ensayo de la Fibra: ASTM 1609

Resistencia Residual: 1 (MPa)




Figura 4-12 Ingreso de los Parámetros del Hormigón en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

Archivo Configuración Ayuda

Proyecto Diseño Tráfico Hormigón Suelo Clima Resultados

N° de Capas: 1

Tipo de Ensayo: CBR

	Tipo de Suelo	Módulo Resiliente Invierno (MPa)	Módulo Resiliente Verano (MPa)	Módulo de Poisson	Espesor (mm)
Base	A-2-4	210	210	0,35	200
2° Capa	A-1-a				
3° Capa	A-1-a				
4° Capa	A-1-a				
5° Capa	A-1-a				
6° Capa	A-1-a				
Subrasante	A-6	114,8	137,76	0,4	

Resistencia a la erosión (Capa Bajo el Pavimento): 3

Coefficiente de Fricción Pavimento-Base: 0,65

Material Fino Bajo Malla N° 200 (Capa Bajo el Pavimento): 8 (%)

Ayuda




Figura 4-13 Ingreso de los Parámetros del Suelo en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

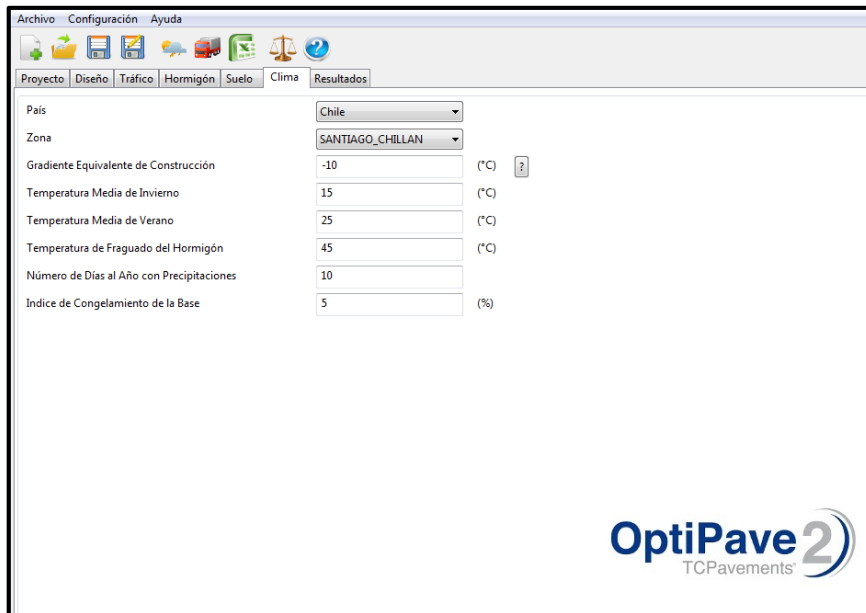


Figura 4-14 Ingreso de los Parámetros del Clima en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

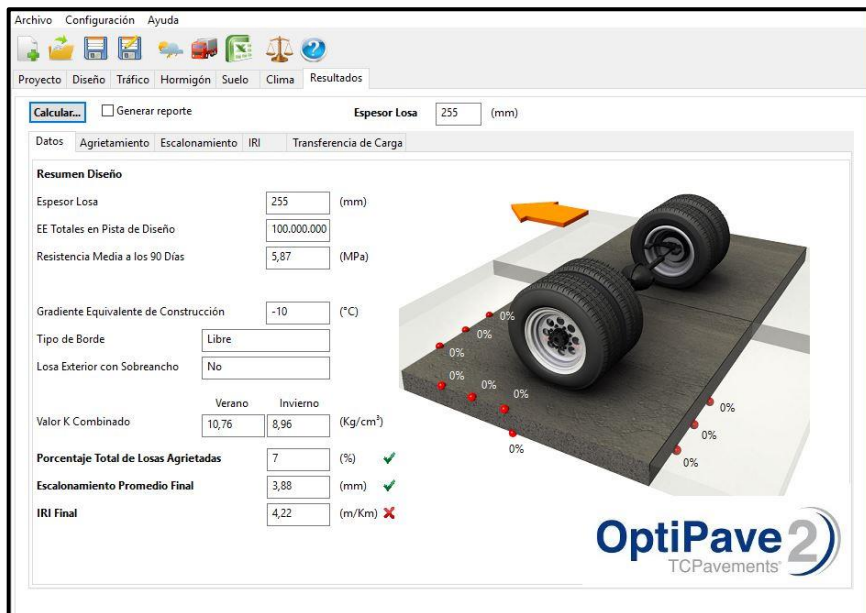


Figura 4-15 Cálculo del Espesor de la Losa en OPTIPAVE
Fuente: Elaboración Propia

Por último en la Tabla 4-30 y Tabla 4-31, se muestran los resultados obtenidos para losas con y sin barras de traspaso de carga.

Tabla 4-30 Resultados de OPTIPAVE sin barras de traspaso de carga
Fuente: Elaboración Propia

			EE			
			100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]			17	15
		Espesor Subbase [cm]			20	17
	10	Espesor Losa [cm]		23	15	13
		Espesor Subbase [cm]		20	20	17
	20	Espesor [cm]		21	14	12
		Espesor Subbase [cm]		20	19	15

Tabla 4-31 Resultados de OPTIPAVE con barras de traspaso de carga
Fuente: Elaboración Propia

			EE			
			100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]		17	15	13
		Espesor Subbase [cm]		20	20	17
	10	Espesor Losa [cm]		15	14	12
		Espesor Subbase [cm]		20	20	17
	20	Espesor [cm]		14	13	11
		Espesor Subbase [cm]		20	19	15

Al observar la Tabla 4-30 y la Tablas 4-31, se observar que para los 100.000.000 EE no existe un diseño que cumpla con las condiciones impuestas. Como hipótesis se plantea que para los 100.000.000 EE se debe realizar un diseño con sobrecancho de losa, barras de traspaso de carga y módulo de rotura del hormigón de 5,5 MPa. Para observar cómo afectan algunos de los parámetros de diseño indicados anteriormente y la validez de la hipótesis, vaya al Anexo G.

4.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE DISEÑO

4.4.1 Comparación entre Pavimentos Flexibles

A continuación se presentan 3 gráficos de barras, con el objeto de poder comparar los espesores obtenidos a través de los dos métodos de diseño de pavimentos flexibles.

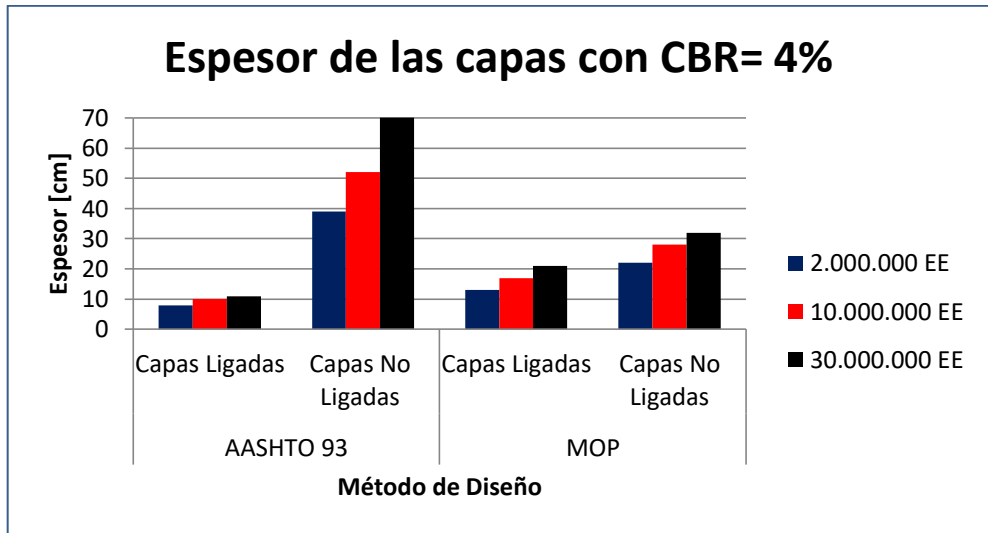


Gráfico 4-1 Espesores de las capas de los Pavimentos Asfálticos con CBR 4%

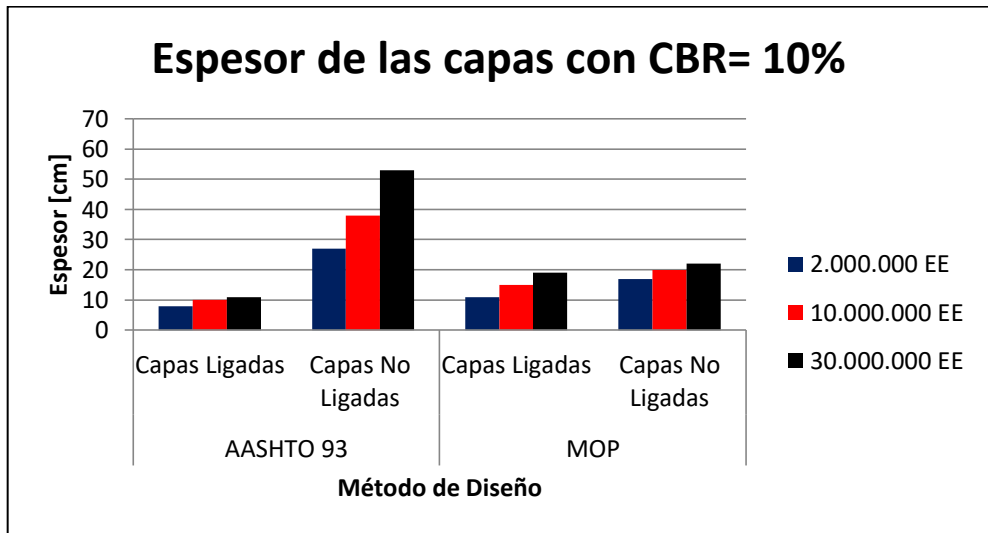


Gráfico 4-2 Espesores de las capas de los Pavimentos Asfálticos con CBR 10%

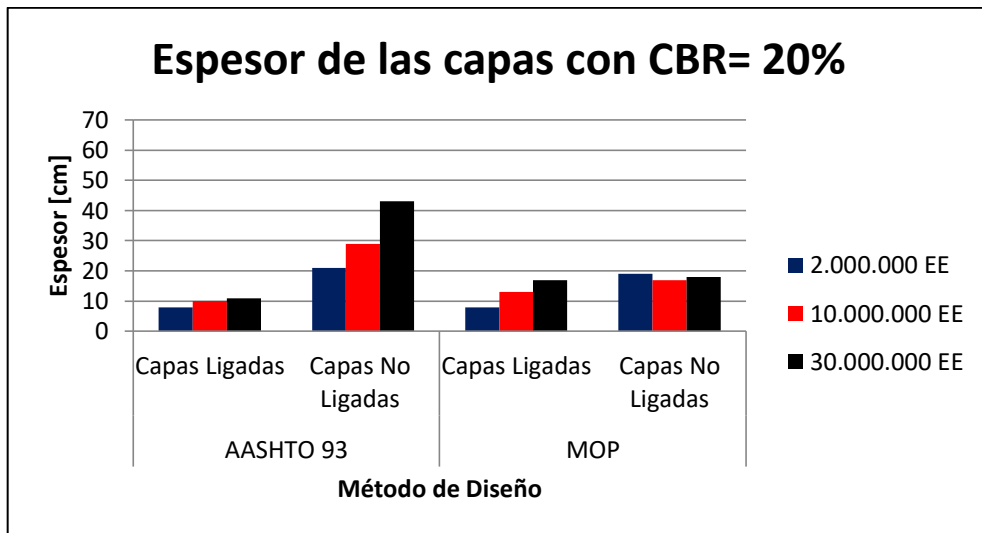


Gráfico 4-3 Espesores de las capas de los Pavimentos Asfálticos con CBR 20%

En los Gráficos 4-1 al 4-3, podemos ver observar lo siguiente:

Como el diseño por AASHTO 93 se realizó al mínimo espesor permitido para las capas asfálticas, se es necesario compensar el número estructural total agregando grandes espesores de base y subbase. Por otra parte, el diseño MOP al forzar un número estructural mínimo de las capas ligadas, permite que dentro del 30% al 40% del espesor total del pavimento sean capas asfálticas; y con ello los espesores de la base y subbase disminuyan considerablemente.

El diseño de AASHTO 93 con espesores mínimos, puede que genere un costo directo igual o menor que el del diseño MOP. Sin embargo, es necesario considerar el costo ambiental que tiene la utilización de grandes espesores en las capas no ligadas, ya que estamos en presencia de un recurso no renovable.

4.4.2 Comparación entre Pavimentos Rígidos

A continuación se presentan 3 gráficos de barras, con el objeto de poder comparar los espesores obtenidos a través de los distintos métodos de diseño de pavimentos rígidos.

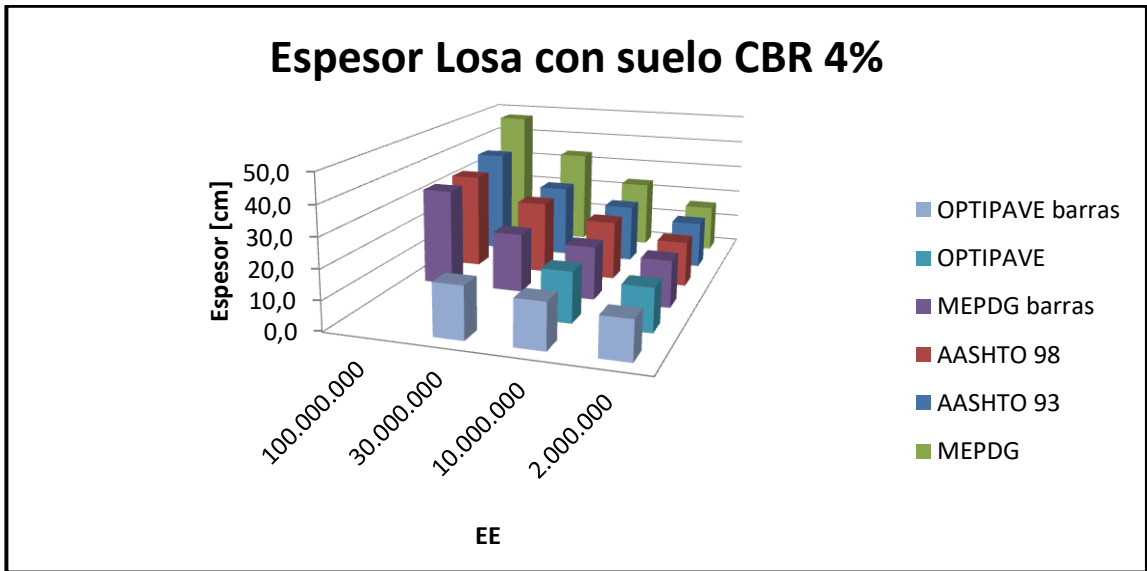


Gráfico 4-4 Espesores de las losas de los Pavimentos Rígidos con CBR 4%

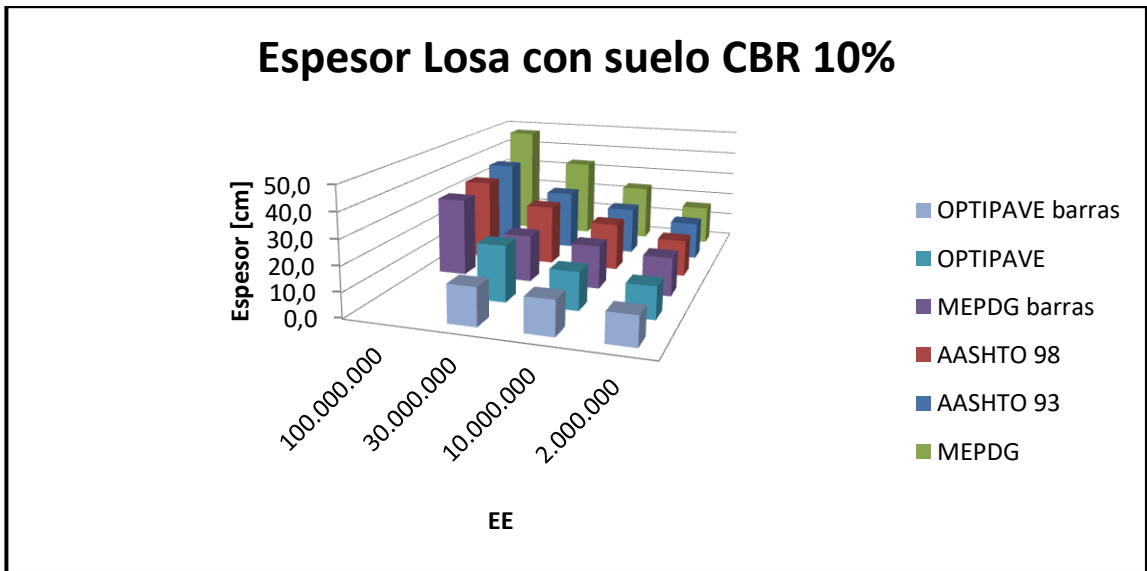


Gráfico 4-5 Espesores de las losas de los Pavimentos Rígidos con CBR 10%

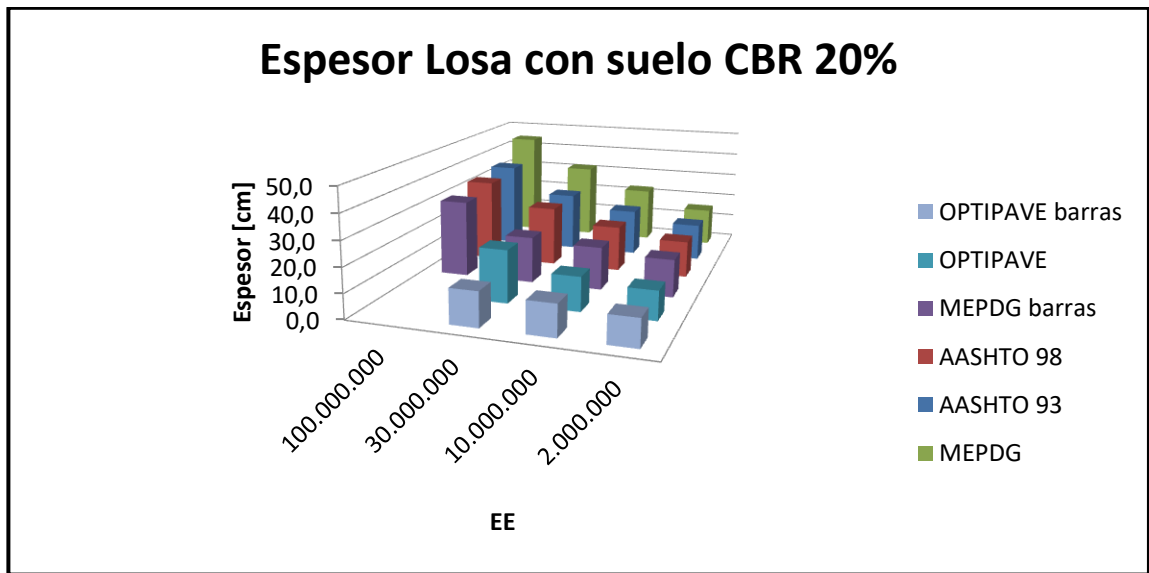


Gráfico 4-6 Espesores de las losas de los Pavimentos Rígidos con CBR 20%

Al analizar los Gráficos 4-4 hasta el 4-6, se puede decir lo siguiente:

El diseño por AASHTO 93 es prácticamente igual al diseño por AASHTO 98, y esto se afirma con cierta obviedad, ya que AASHTO 98 es un método de diseño que utiliza como base el diseño del año 1993.

Con el cambio de método de diseño en el año 2008, se puede verificar que las losas que soportan grandes tránsitos fallan por deterioros funcionales (IRI), por eso que con la utilización de barras de transferencia de carga el espesor de la losa disminuye considerablemente, llegando a obtenerse espesores menores a los del diseño tradicional en Chile.

La premisa de OPTIPAVE indica que el diseño permite desarrollar losas de hormigón con espesores menores a los tradicionales. Si se compara OPTIPAVE con su similar en los criterios de deterioro, MEPDG, en promedio el espesor disminuye desde 5 [cm] hacia arriba. Si se agrega la utilización de barras de transferencia de carga, para volúmenes de tránsitos alto, el espesor de la losa disminuye hasta 7 [cm] en promedio, comparado al diseño tradicional en AASHTO 98.

Sin embargo, en el párrafo anterior se compara el peor escenario de MEPDG enfrentado al mejor de OPTIPAVE. En consecuencia, los diseños por MEPDG se deben realizar considerando una falla por escalonamiento e IRI, y por consiguiente ejecutar un cepillado. Este escenario vuelve

altamente competitivo a MEPDG logrando espesores iguales o menores a los de OPTIPAVE, tal como se observará en el Capítulo 7, donde la falla por escalonamiento e IRI se considera al año 10.

Por último, la utilización de barras de transferencia, en losas cortas para bajo y mediano tránsito, no muestra grandes diferencias en la disminución del espesor con respecto a las losas cortas sin las dovelas. Es decir, la utilidad de las barras de transferencia en los diseños por OPTIPAVE, se haya solamente para volúmenes de tránsito alto, tal como la misma empresa lo indica.

5 MODELACIÓN EN HDM-4

5.1 INTRODUCCIÓN

El HDM-4 (Highway Development & Management) es un software desarrollado por el Banco Mundial, el Banco Asiático del Desarrollo, el Departamento de Desarrollo Internacional del Reino Unido, la Administración Nacional de Carreteras de Suecia y el TRRL (Transport and Road Research Laboratory), cuyo fin es ayudar a los países en vías de desarrollo a planificar y mejorar las condiciones de la infraestructura vial. La última versión del software, o sea HDM-4 v.2, es ideado por un consorcio internacional centrado en la Universidad de Birmingham.

Si se pudiera definir qué es HDM-4 en términos bien simples, se diría que HDM-4 es un programa capaz de modelar las diversas componentes que involucran la evaluación de un proyecto vial, donde se es necesario poder simular el comportamiento del ciclo de vida que presenta la carretera al verse relacionado con los factores que actúan sobre ella.

5.2 DESCRIPCIÓN DE HDM-4

A lo largo del ciclo de vida de una carretera, que lo normalmente dura entre 15 a 40 años, la vía se deteriora por diversos motivos que ya han sido descritos en su mayoría en el Capítulo 3. Por consiguiente, para contrarrestar los deterioros se deben realizar diversas conservaciones en la vía, y es ahí donde HDM-4 es una herramienta de mucha ayuda en la gestión de carreteras, ya que es capaz de predecir lo siguiente:

- Deterioro de la carretera.
- Efectos de las obras de reparación.
- Efectos para los usuarios de la carretera.
- Efectos socioeconómicos y medioambientales.

La tasa de crecimiento que presenta el deterioro del pavimento está directamente relacionada a los estándares de conservación aplicados para reparar los defectos del pavimento, por ende, que la carretera logre mantenerse dentro de los estándares a los cuales fue diseñada, depende de las medidas de conservación o mejoras aplicados al pavimento.

Para definir un estándar de conservación, se debe imponer un límite al nivel de deterioro permitido sobre el firme, tal como se muestra en la Figura 5-1.

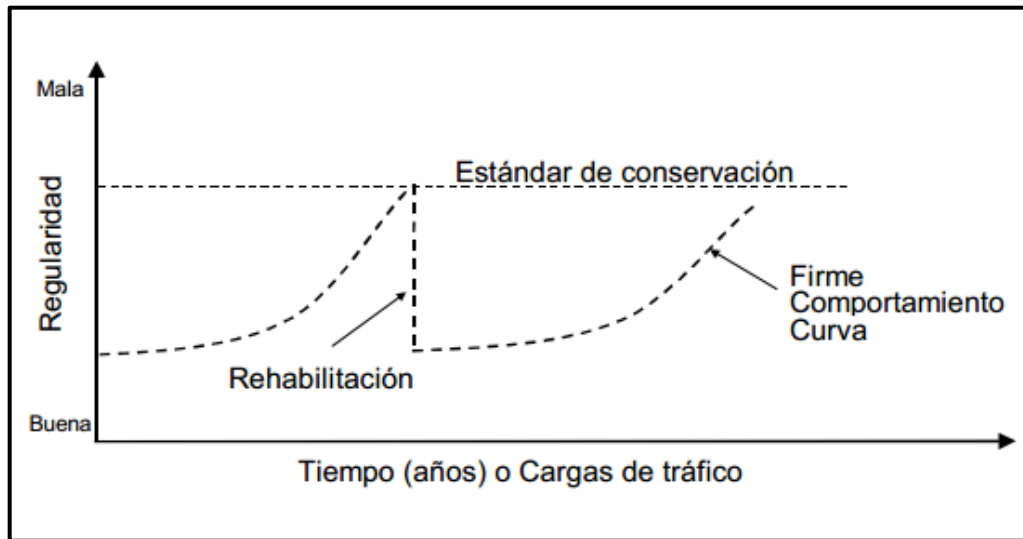


Figura 5-1 Efecto del Estándar de Conservación en la Regularidad Superficial
Fuente: Visión General de HDM-4 v.1 (Kerali, 2001)

La realización de estándares de conservación, da origen que los costos totales en los que incurren las diversas entidades, no se vean afectados solamente por el costo inicial de construcción de la carretera, sino que también dependerán de los estándares de conservación y mejora. Por otra parte, los efectos sobre los usuarios se miden en costos para el usuario (operación del vehículo, costo por tiempo de viaje y accidentalidad), efectos sociales y medioambientales (emisiones de los vehículos, consumo de energía, ruido y otros beneficios sociales).

Los beneficios económicos en las inversiones se determinan al comparar las diversas alternativas previstas de conservación, con una alternativa llamada “alternativa base”, la cual representa una alternativa con acciones nulas o mínimas. Aquí es importante comprender que el no realizar ninguna actividad de conservación involucra un incremento considerable de todos los costos involucrados, tal como se observa en la Figura 5-2.

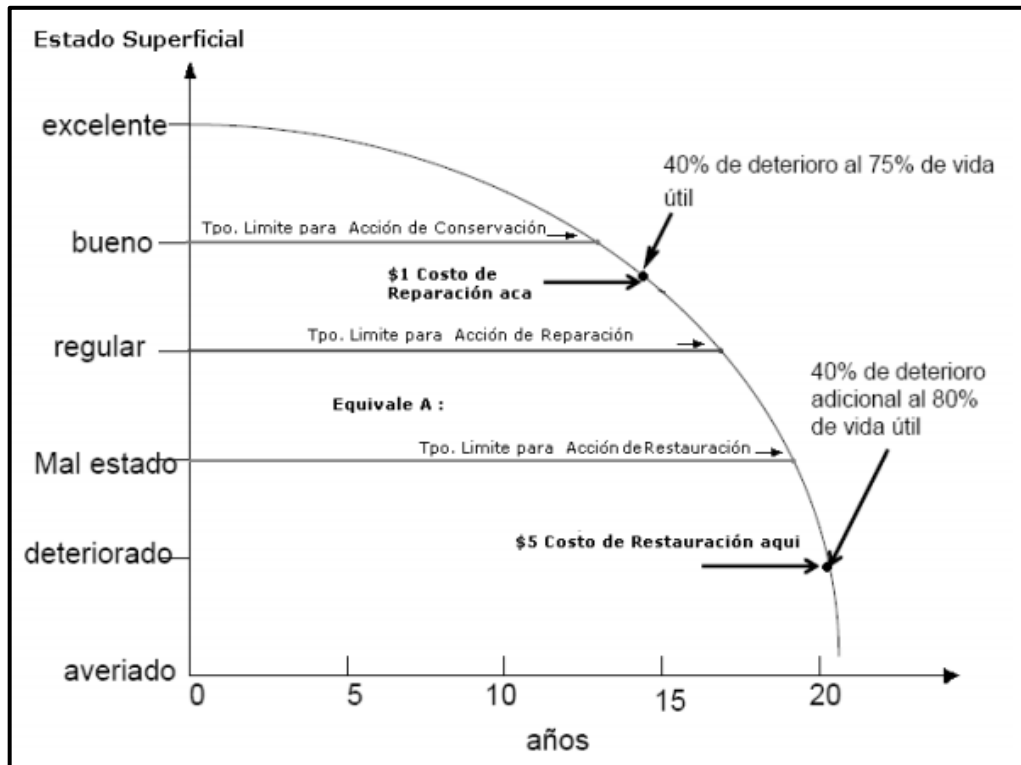


Figura 5-2 Estado Superficial del Pavimento y el Costos de Conservación
Fuente: Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU, 2008)

HDM-4 está ideado para hacer estimaciones de los costos comparativos y análisis económicos de diversas opciones de inversión. Estima los costos de una gran variedad de alternativas año a año, para un período previamente definido por el proyectista. Donde la realización de las diversas comparaciones, se es necesario obtener información detallada de los estándares de diseño, del programa de inversión, las alternativas de conservación, costos unitarios, volúmenes de tráfico y condiciones medioambientales.

5.3 MÓDULOS DEL HDM-4 Y DATOS DE ENTRADA

La estructura de HDM-4 está compuesta por 3 herramientas de análisis (Estrategia, Programa y Proyectos) y 4 gestores de datos: Configuración del HDM-4, Flota vehicular, Red de carreras y Estándares de trabajo. Todo lo anterior, se ilustra en la Figura 5-3, mientras que el espacio de trabajo tipo del programa se muestra en la Figura 5-4.

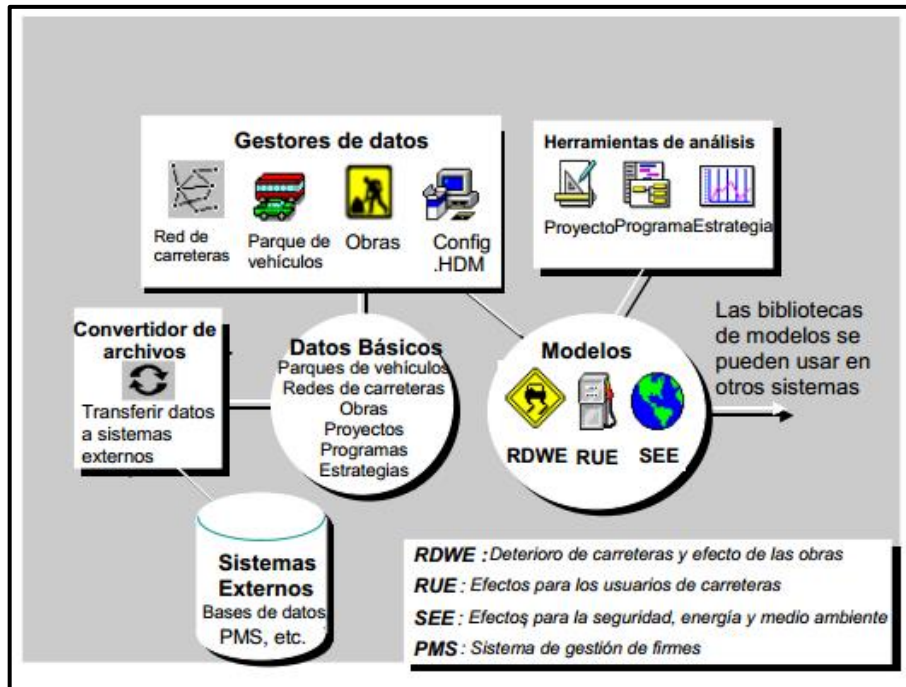


Figura 5-3 Estructura General del HDM-4
Fuente: Visión General de HDM-4 v.1 (Kerali, 2001)

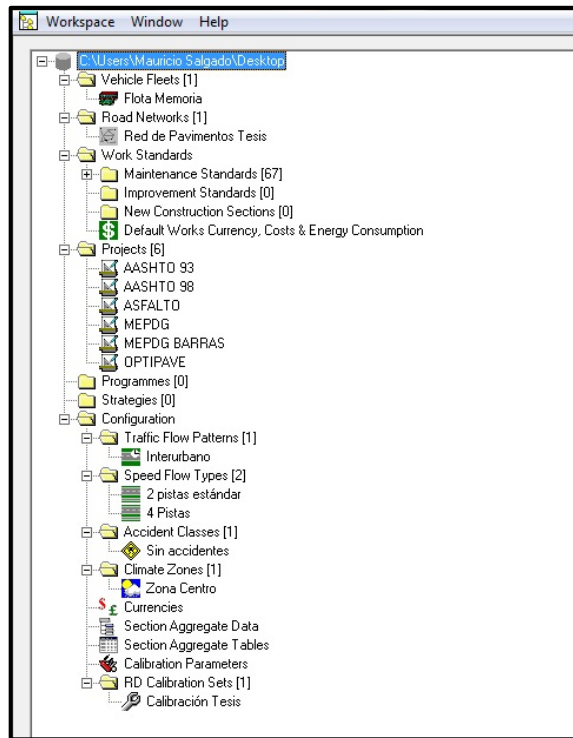


Figura 5-4 Espacio de Trabajo de HDM-4
Fuente: Elaboración Propia

5.3.1 Configuración del HDM-4

Define los datos que usan en las aplicaciones. Se ingresan las condiciones del clima, tipo y calidad de la carpeta, características geométricas de la vía, tasa de accidentalidad, unidad monetaria, calibración de los modelos de deterioro, etc. A continuación, se muestran los valores y criterios utilizados en la configuración del HDM-4 para el desarrollo de la presente memoria.

a. Unidad Monetaria:

Para el desarrollo de la presente memoria la unidad monetaria será de miles de pesos (M\$).

b. Costo por Accidentes:

Para el objeto de estudio propuesto no se consideran los costos por accidentes.

c. Velocidad/Capacidad:

Se consideran dos tipos de modelos: Dos pistas estándar y cuatro pistas.

d. Zona Climática:

Los datos de la zona climática son mostrados en la Figura 5-5.

Climate	
Name:	Zona Centro
Moisture Classification:	Semi-arid
Moisture Index:	-40
Duration of dry season:	7.2 months
Mean monthly precipitation:	40 mm
Temperature Classification:	Subtropical - cool
Mean temperature:	14,1 °C
Avg. Temperature Range:	35 °C
Days T>32°C:	45 days
Freeze Index:	55 C-days
Percentage Of Time Driven:	
on snow covered roads:	0 0<=PCTDS<=100
on water covered roads:	30 0<=PCTDW<=100

Figura 5-5 Clima Zona Centro para HDM-4

Fuente: Recomendaciones para la Utilización del HDM-4 en Chile (Departamento de Gestión Vial)

e. Modelo del Tránsito:

Se utiliza la distribución horaria tipo Interurbano, que trae por defecto el programa, la cual se visualiza en la Figura 5-6. La distribución horaria del flujo vehicular es posible de calibrar de acuerdo a las distintas necesidades o estudios, lo usual en los análisis de HDM-4 en Chile es utilizar los valores por defecto.

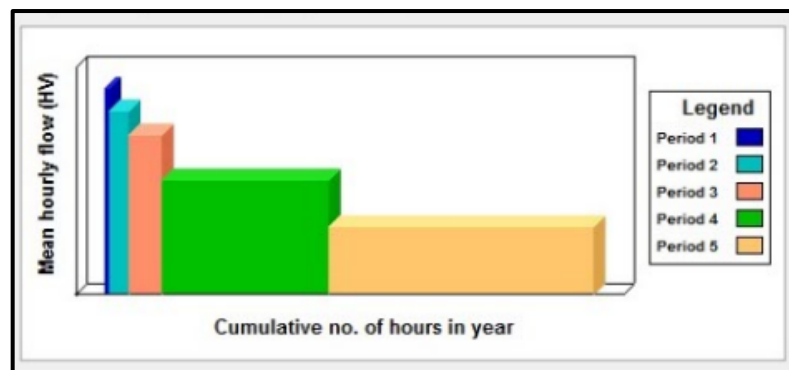


Figura 5-6 Distribución horaria Interurbana

Fuente: Manual HDM-4, Volumen 4

f. Calibración de los deterioros:

Modelos de Deterioros de los Pavimentos Asfálticos

Debido a la gran cantidad de deterioros que presentan los pavimentos asfálticos, en la Figura 5-7, se presenta un esquema del funcionamiento que tiene HDM-4 para predecir los respectivos deterioros. Si desea mayor información de las ecuaciones que estiman los deterioros, deberá ir al libro “*Modelling Road Deterioration and Works Effects, Vol.6*” (Morosiuk, Riley, & Odoki, 2004).

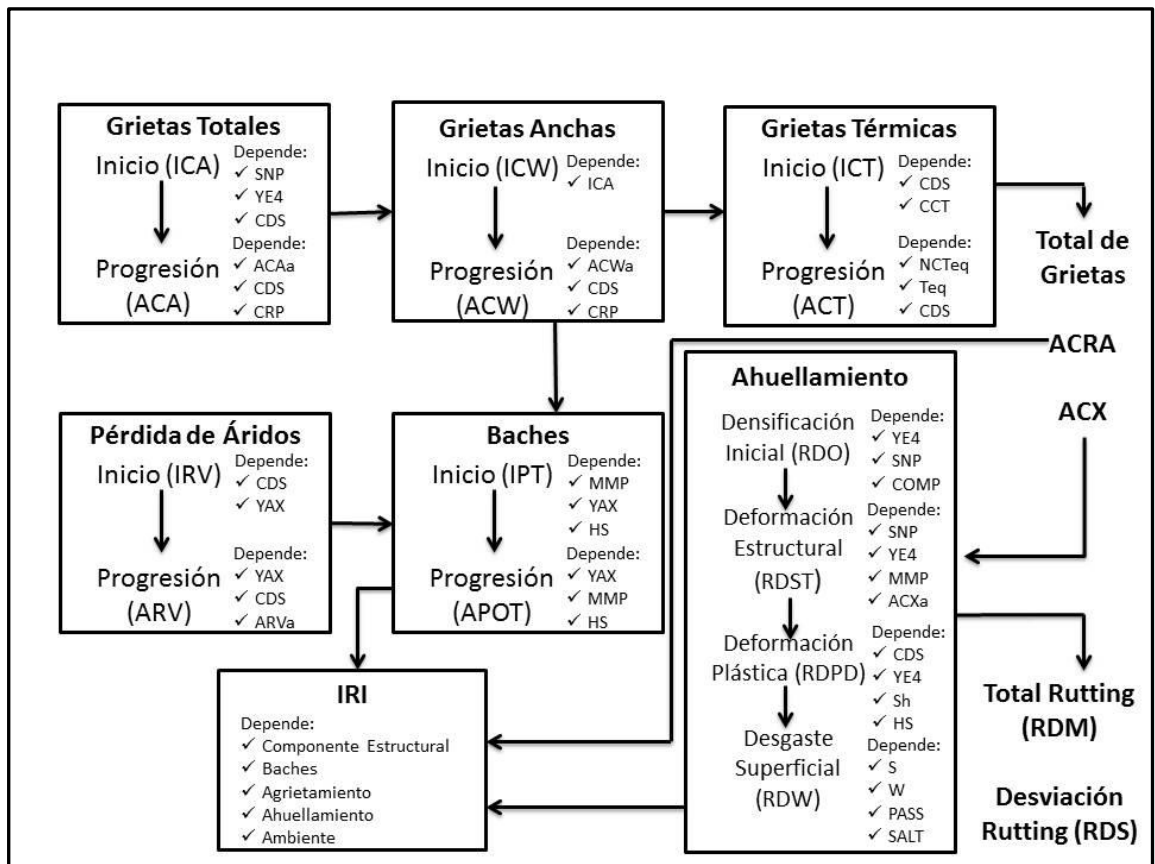


Figura 5-7 Esquema de la Predicción de los Deterioros del Asfalto según HDM-4
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se describirá cada una de las siglas presentadas en la Figura 5-7.

ICA: Tiempo para el inicio de todas las grietas estructurales [años].

ICW: Tiempo para el inicio de las grietas estructurales anchas [años].

ACA: Área de todas las grietas estructurales [%].

ACW: Área de las grietas estructurales anchas [%].

ACAa: Área de todas las grietas estructurales al inicio del respectivo año de análisis [%].

ACWa: Área de las grietas estructurales anchas al inicio del respectivo año de análisis [%].

ICT: Tiempo para el inicio del agrietamiento térmico transversal [años].

ACT: Área del agrietamiento térmico transversal [%].

ACRA: Área total agrietada ($ACRA=ACA+ACT$) [%].

ACX: Área de agrietamiento indexado ($ACX=0,62*ACA+0,39*ACW$) [%].

ACXa: Área de agrietamiento indexado al inicio del respectivo año de análisis [%].

IRV: Tiempo para el inicio del desprendimiento de áridos [años].

ARV: Área del pavimento que presenta desprendimiento de áridos [%].

ARVa: Área del pavimento que presenta desprendimiento de áridos al inicio del respectivo año de análisis [%].

IPT: Tiempo que transcurre entre el inicio de las grietas anchas o del desprendimiento de áridos y el inicio de baches [años].

APOT: Área del pavimento que presentan baches [%].

RDO: Ahuellamiento debido a la densificación inicial [mm].

RDST: Ahuellamiento debido a la deformación estructural [mm].

RDPD: Ahuellamiento debido a la deformación plástica que afecta a las capas asfálticas [mm].

RDW: Ahuellamiento debido al uso de neumáticos con aditamentos [mm].

RDM: Ahuellamiento total promedio [mm].

RDS: Desviación estándar del ahuellamiento [mm].

SNP: Número estructural ajustado por la componente de la subrasante [in].

YE4: Ejes Equivalentes por año [millones de E.E./pista].

YAX: Número de ejes de todos los camiones que pasan en un año [millones de ejes/pista]

CDS: Indicador de los defectos de construcción de la superficie bituminosa.

CRP: Coeficiente de retardación de la progresión de las grietas por efecto de los tratamientos preventivos.

CCT: Coeficiente del agrietamiento térmico.

NCTeq: Máximo número de grietas térmicas [N°/Km].

Teq: Tiempo que transcurre desde el inicio de las grietas térmicas hasta que se alcanza el máximo número de las grietas térmicas [años].

MMP: Precipitación media mensual [mm/mes].

HS: Espesor total de las capas asfálticas [mm].

COMP: Compactación relativa [%].

Sh: Velocidad de circulación de los camiones [Km/h].

PASS: Porcentaje de vehículos que utilizan neumáticos con aditamentos [%].

S: Velocidad promedio del tráfico [Km/h].

W: Ancho de la calzada, considerando el ancho de las bermas [m].

SALT: Utilización de sal en la vía [2 si se usa sal o 1 si no se usa].

En la Tabla 5-1, se presentan los símbolos de los factores de calibración y el modelo de deterioro al cual afectan en HDM-4.

Tabla 5-1 Factores de Calibración Utilizadas en los Modelos de Deterioro de los Pavimento Asfálticos
Fuente: “*Modelling Road Deterioration and Works Effects, Vol.6*” (Morosiuk, Riley, & Odoki, 2004).

Deterioration model	Calibration factor
Wet/dry season SNP ratio	K_f
Drainage deterioration factor	K_{drf}
Drain life factor	K_{drain}
All structural cracking - initiation	K_{cia}
Wide structural cracking - initiation	K_{ciw}
All structural cracking - progression	K_{cpa}
Wide structural cracking - progression	K_{cpw}
Transverse thermal cracking - initiation	K_{cti}
Transverse thermal cracking - progression	K_{cpt}
Rutting - initial densification	K_{rid}
Rutting - structural deterioration	K_{rst}
Rutting - plastic deformation	K_{rpd}
Rutting - surface wear	K_{rsw}
Rutting - calibration factor for rut depth standard deviation	K_{rds}
Ravelling - initiation	K_{vi}
Ravelling - progression	K_{vp}
Pothole – initiation due to cracking	K_{pic}
Pothole – initiation due to ravelling	K_{pir}
Pothole - progression	K_{pp}
Edge-break	K_{eb}
Roughness - environmental coefficient	K_{gm}
Roughness - SNPK	K_{snpk}
Roughness - structural	K_{gs}
Roughness – cracking	K_{gc}
Roughness – rutting	K_{gr}
Roughness – potholing	K_{gp}
Texture depth - progression	K_{td}
Skid resistance	K_{stc}
Skid resistance - speed effects	K_{stex}

- En la Tabla 5-2 se presenta el set de calibración utilizado en la memoria, para la modelación de los deterioros del pavimento asfáltico. Los resultados de la calibración se muestran en el Anexo A.

Tabla 5-2 Set de Calibración HDM-4 en Pavimentos Asfálticos
Fuente: Elaboración Propia

Juego de calibración RD	Tipo de Pavimento	Material superficial	CDS	CDB	CRT
Asfalto Centro	Mezcla asfáltica sobre base granular	Concreto asfáltico	1.00	0.00	0.00

RRF	Kcia	Kcpa	Kciw	Kcpw	Kcit	Kcpt	Kvi	Kvp	Kpic	Kpir	Kpp	Keb	Ktd
1.00	0.62	0.90	1.23	0.53	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00

Ksfc	Ksfcs	Krid	Krst	Krpd	Kdrain	Ksnpk	Krsw	Krds	Kf	Kgm
1.00	1.00	0.98	0.87	1.45	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30

Kgs	Kgc	Kgr	Kgp
0.60	1.66	1.08	0.57

Los datos faltantes se deben completar con los recomendados por el Departamento de Gestión Vial o según sea las características del proyecto, estos datos faltantes son: vehículos que utilizan llantas con aditamentos, utilización de sal en la carretera, Número de acotamientos, factor Kddf, ESTEP y tipo de carril de la berma.

Modelos de Deterioros de los Pavimentos de Hormigón

Los modelos de deterioros de HDM-4 descritos en la presente memoria, corresponden a los de agrietamiento, escalonamiento e IRI. Si se desea conocer a plenitud la totalidad de las ecuaciones que modelan los deterioros de los pavimentos rígidos, debe ir al libro “*Modelling Road Deterioration and Works Effects, Vol.6*” (Morosiuk, Riley, & Odoki, 2004).

Para comprender los pasos que se siguieron para realizar los ajustes de las curvas de deterioros de los pavimentos de hormigón debe ir al Anexo A.2.

Modelo de Agrietamiento

HDM-4 considera como modelo de agrietamiento en los pavimentos de hormigón, al agrietamiento transversal. En la Ecuación 5-1, se presenta la ecuación que estima la cantidad de losas agrietadas.

$$\text{PCRACK} = \text{Kjpc} * \frac{100}{1+1,41*FD^{-1,66}} \quad (\text{Ecuación 5-1})$$

Donde:

PCRACK: Cantidad de agrietamiento de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo [%].

FD: Daño por Fatiga, según la Ley de Miner

Kjpc: Factor de Calibración del agrietamiento transversal.

Modelo de Escalonamiento

El modelo de escalonamiento utilizado por HDM-4, data del año 1995. El modelo corresponde a un modelo empírico de estimación del escalonamiento. La Ecuación 5-2, entrega el modelo utilizado por HDM-4, para calcular el escalonamiento de las losas que no contengan barras de transferencia de carga.

$$\text{FAULT} = \text{Kjpm}_f * 25,4 * \text{NE4}^{0,25} * \left[0,2347 - 0,1516 * \text{Cd} - 2,88 * 10^{-7} \frac{\text{H}^2}{\text{L}^{0,25}} - 0,0115 * \text{BASE} + 6,45 * 10^{-8} * \text{FI}^{1,5} * \text{MMP}^{0,25} - 0,002478 * \text{DAYS90}^{0,5} - 0,0415 * \text{WIDENED} \right] \quad (\text{Ecuación 5-2})$$

Donde:

FAULT: Escalonamiento Promedio [mm].

Kjpm_f: Factor de Calibración del Escalonamiento.

NE4: Ejes Equivalentes Acumulados, en millones de Ejes Equivalentes.

Cd: Coeficiente de drenaje según AASHTO.

H: Espesor de Losa [mm].

L: Largo de la losa [m].

Base: Tipo de Base (1 si es estabilizada o 0 si no lo es)

FI: Índice de Congelamiento (55 °C*días, para el presente estudio).

- MMP: Promedio mensual de precipitaciones [mm/mes].
- DAYS90: Número de días con temperatura > 32°C.
- WIDENED: Sobreancho de calzada (1 si presenta sobreancho o 0 si no presenta).

Modelo del IRI

El modelo de regularidad del pavimento, en HDM-4, también data del año 1995. Según se observa en la Ecuación 5-3, el IRI depende del agrietamiento, escalonamiento y del despostillamiento.

$$IRI = K_{jp_r} * (IRI_0 + 0,00265 * TFAULT + 0,0291 * SPALL + 0,15 * 10^{-6} * TCRACK^3) \text{ (Ecuación 5-3)}$$

Donde:

- IRI: Índice de Regularidad Internacional [mm/Km].
- IRI₀: IRI inicial de construcción [mm/Km].
- TFAULT: Escalonamiento de las juntas transversales [1000*FAULT/L], en [mm/Km].
- SPALL: Despostillamiento de las juntas [%].
- TCRACK: Agrietamiento Transversal [10*PCRACK/L], en [N°/Km].
- K_{jp_r}: Factor de Calibración del Índice de Regularidad Internacional.

- En la Tabla 5-3 y 5-4, se presentan las series de calibraciones utilizadas en la modelación de los deterioros de los pavimentos de hormigón tradicional. Los resultados de la calibración se muestran en el Anexo A.

Calibración para 2.000.000 EE

Tabla 5-3 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón Tradicional para Bajo Tránsito
Fuente: Elaboración Propia

Factor irregularidad	Factor escalonamiento	Factor despostillamiento	Factor agrietamiento
0.63	2.55	2.59	0.05

Factor grietas deterioradas	Factor de fallas	Factor de drenaje
1.00	1.00	1.00

Calibración para 10.000.000 a 100.000.000 EE

Tabla 5-4 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón Tradicional desde Medio hasta Muy Alto Tránsito
Fuente: Elaboración Propia

Factor irregularidad	Factor escalonamiento	Factor despostillamiento	Factor agrietamiento
0.60	2.10	2.59	0.05

Factor grietas deterioradas	Factor de fallas	Factor de drenaje
1.00	1.00	1.00

Los datos faltantes para ambas tablas, se deben complementar con los recomendados por el Departamento de Gestión Vial o por las condiciones impuestas por el diseñador, estos datos faltantes son: coeficiente de retracción, expansión térmica, módulo de ruptura, elasticidad del hormigón, diámetro de las barras si fuere el caso, módulo de reacción de la subrasante y tipo de ésta, tipo de sello de juntas, pasajuntas con protección anticorrosión, tipo de base y su permeabilidad, acero de refuerzo, colocación del refuerzo y tipo de berma.

- En la Tabla 5-5 y 5-6, se presentan las series de calibraciones utilizadas en la modelación de los deterioros de los pavimentos de hormigón con barras de transferencia de carga. Los resultados de la calibración se muestran en el Anexo A.

Calibración para 2.000.000 hasta 30.000.000 EE

Tabla 5-5 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón con Barras desde Bajo hasta Alto Tránsito
Fuente: Elaboración Tradicional

Factor irregularidad	Factor escalonamiento	Factor despostillamiento	Factor agrietamiento
1.00	0.40	2.59	0.04

Factor grietas deterioradas	Factor de fallas	Factor de drenaje
1.00	1.00	1.00

Tabla 5-6 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos Hormigón con Barras para Muy Alto Tránsito
Fuente: Elaboración Tradicional

Factor irregularidad	Factor escalonamiento	Factor despostillamiento	Factor agrietamiento
0.60	0.51	2.59	0.04

Factor grietas deterioradas	Factor de fallas	Factor de drenaje
1.00	1.00	1.00

Tal como en las series de calibración anteriores, los datos faltantes para ambas tablas, se deben completar con los recomendados por el Departamento de Gestión Vial o por las condiciones impuestas por el diseñador, estos datos faltantes son: coeficiente de retracción, expansión térmica, módulo de ruptura, elasticidad del hormigón, diámetro de las barras si fuere el caso, módulo de reacción de la subrasante y tipo de ésta, tipo de sello de juntas, pasajuntas con protección anticorrosión, tipo de base y su permeabilidad, acero de refuerzo, colocación del refuerzo y tipo de berma.

- En la Tabla 5-7, se presenta el set de calibraciones utilizada en la modelación de los deterioros de los pavimentos de hormigón de losas cortas. Los resultados y consideraciones utilizadas en la calibración se muestran en el Anexo A.

Tabla 5-7 Set de Calibración HDM-4 Pavimentos de losas cortas
Fuente: Elaboración Propia

Factor irregularidad	Factor escalonamiento	Factor despostillamiento	Factor agrietamiento
0.68	1.27	2.59	0.02

Factor grietas deterioradas	Factor de fallas	Factor de drenaje
1.00	1.00	1.00

En la calibración del diseño OPTIPAVE se considera solamente el diseño sin barras de transferencia, ya que el diseño con barras al tener espesores menores no permite encontrar una serie adecuada que ajuste el comportamiento estimado (factor de agrietamiento). Por ende, se utiliza para la modelación en HDM-4 del diseño con barras en OPTIPAVE, a su homólogo sin barras. Por otro lado, los datos faltantes se deben completar con los recomendados por el Departamento de Gestión Vial o por las condiciones impuestas por el diseñador, estos datos

faltantes son: coeficiente de retracción, expansión térmica, módulo de ruptura, elasticidad del hormigón, diámetro de las barras si fuere el caso, módulo de reacción de la subrasante y tipo de ésta, tipo de sello de juntas, pasajuntas con protección anticorrosión, tipo de base y su permeabilidad, acero de refuerzo, colocación del refuerzo y tipo de berma.

5.3.2 Flota Vehicular

En este gestor se define las características de la flota vehicular que opera en la red de carreteras a analizar.

Ya que no se encuentra dentro de los objetivos del estudio hacer un análisis de la composición del tráfico, sino solamente del comportamiento del pavimento, por ello en el desarrollo de la memoria se propone la utilización de solamente una flota vehicular. Esta flota vehicular corresponde a un camión mediano, con tasa de crecimiento de 5% anual, 1,199 ESALF y de 7,5[Ton], en la Figura 5-8 se muestra lo anteriormente escrito. Mientras que en la Figura 5-9 los costos económicos relacionados a un camión mediano y obtenidos de “*Precios Sociales Vigentes 2015*” (MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL, 2015)

Vehicle Attributes: Camión Simple

Definition | Basic Characteristics | Economic Unit Costs

Physical

Passenger Car Space Equiv: 1,4

No. of Wheels: 6

No. of Axles: 2

Tyres

Tyre type: Bias-ply

Base no. of recaps: 1,3

Retread cost: 15 %

Utilisation

Annual km: 48000 km

Working hours: 2200 hrs

Average life: 9 years

Private use: 0 %

Passengers: 2 persons

Work related passenger-trips: 100 %

Loading

ESALF: 1,199

Operating weight: 7,5 tonnes

Calibration...

Reset Defaults

Aceptar

Cancelar

Passenger Car Space Equivalents factor (PCSE)

Figura 5-8 Características Básicas del Camión Simple
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5-9 Costos Económicos del Camión Simple
Fuente: Elaboración Propia

5.3.3 Red de carreteras

En la red de carreteras se definen las características físicas de los tramos de carreteras a analizar. Con ello se debe seleccionar el tipo de capa de rodadura que tiene el pavimento, la zona climática, modelo de tráfico, etc.

Con el fin de desarrollar el estudio, se consideran carreteras de largo unitario de 1 [km], ancho de carreteras de 7 o 14 [m], bermas de 1[m] de ancho de material granular o asfáltico (es el mismo criterio utilizado en los diseños de los pavimentos tanto de asfalto como de hormigón) y geometría de la vía: recta y plana. La condición inicial del pavimento es excelente, por consiguiente tendrá: 0% de agrietamiento, 0[mm] de escalonamiento, 0[mm] de ahuellamiento y 2[m/Km] de IRI inicial.

En la Figura 5-10, se presenta la venta típica de la red de carreteras en HDM-4.

ID	Description	Date Last Modified	Surface Class	Pavement Type	RD Calibration Item	Length (km)	Carriageway Width (m)	Traffic Flow	Shoulder Width (m)	Speed Flow Type	Traffic Flow Pattern	Accident Class	Climate Zone		
ASF 31	AAASHTO 93 ASF CBR 4 EE2	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
ASF 33	AAASHTO 93 ASF CBR 10 EE2	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
ASF 33	AAASHTO 93 ASF CBR 20 EE2	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
ASF 93	AAASHTO 93 ASF CBR 4 EE10	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
ASF 93	AAASHTO 93 ASF CBR 10 EE10	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
ASF 93	AAASHTO 93 ASF CBR 20 EE10	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
ASF 93	AAASHTO 93 ASF CBR 4 EE30	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
ASF 93	AAASHTO 93 ASF CBR 10 EE30	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
ASF 93	AAASHTO 93 ASF CBR 20 EE30	06-01-2016	Bituminous	Asphalt Mix on Granular Base	Asfalto Tipo Centro	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR4 EE2	21-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Bajo Tránsito Suelo Me	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR4 EE100	14-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Malo	1.0	14.00	Two-way		1.00	4 Pistas	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR10 EE100	20-07-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Medio	1.0	14.00	Two-way		1.00	4 Pistas	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR20 EE100	20-07-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Bueno	1.0	14.00	Two-way		1.00	4 Pistas	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR10 EE2	21-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Bajo Tránsito Suelo Me	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR20 EE2	21-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Bajo Tránsito Suelo Bu	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR4 EE10	14-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Malo	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR10 EE10	14-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Medio	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR20 EE10	14-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Bueno	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR4 EE30	14-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Malo	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR10 EE30	14-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Medio	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
HOR 93	AAASHTO 93 HOR CBR20 EE30	20-07-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Tipo Suelo Bueno	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
MBAR (1)	MEPDG BAR CBR4 EE2	09-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph25.4 Suel	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
MBAR (1)	MEPDG BAR CBR10 EE100	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph38 Suelc	1.0	14.00	Two-way		1.00	4 Pistas	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
MBAR (1)	MEPDG BAR CBR20 EE100	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph38 Suelc	1.0	14.00	Two-way		1.00	4 Pistas	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
MBAR (2)	MEPDG BAR CBR10 EE2	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph25.4 Suel	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
MBAR (3)	MEPDG BAR CBR20 EE2	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph25.4 Suel	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
MBAR (4)	MEPDG BAR CBR4 EE10	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph25.4 Suel	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
MBAR (5)	MEPDG BAR CBR10 EE10	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph25.4 Suel	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
MBAR (5)	MEPDG BAR CBR20 EE10	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph25.4 Suel	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se
MBAR (7)	MEPDG BAR CBR4 EE30	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph32 Suelc	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
MBAR (8)	MEPDG BAR CBR10 EE30	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph32 Suelc	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
MBAR (9)	MEPDG BAR CBR20 EE30	20-07-2015	Concrete	JPCP with dowels	Homigón pasajuntas: ph32 Suelc	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Phi
MHOR (1)	MEPDG HOR CBR4 EE2	21-09-2015	Concrete	JPCP no dowels	Homigón Bajo Tránsito Suelo Me	1.0	7.00	Two-way		1.00	2 pistas está	Intenubano	Sin accident	Zona Centro	Se

Figura 5-10 Red de Carreteras del estudio
Fuente: Elaboración Propia

5.3.4 Estándares de trabajo

Los estándares de trabajo, son medidas de conservación y/o mejora, que junto a sus costos unitarios se deben aplicar a los distintos tramos de la red de carreteras.

Los estándares de trabajo corresponderán a los definidos en el Capítulo 3 y según el Departamento de Gestión Vial. Es importante señalar que es aquí donde se define la alternativa base, correspondiente a un mantenimiento del tipo rutinario.

a. Estándares de trabajos en pavimentos rígidos

En la Tabla 5-8, se muestran las medidas a utilizar en la conservación de los pavimentos rígidos. Estos estándares se modelan como conservaciones independientes, pero a la vez como una combinatoria entre los mismos. Cabe recordar que a los pavimentos de losas cortas no se le realiza un sello de juntas.

Tabla 5-8 Medidas de conservación Aplicadas a los Pavimentos Rígidos
Fuente: Elaboración Propia

Conservación	Límite del deterioro
Cepillado	4 [m/Km] < IRI
Sellado de Juntas	Cada 4 o 5 años
Reemplazo de drenes	Cada 5 o 10 años
Reparación Profundidad Parcial (Porcentaje de Juntas reparadas 6%)	4 [m/Km] < IRI
Reparación 30% Losas	25% < Área Agrietada
Reparación 50% Losas	40% < Área Agrietada

b. Estándares de trabajos en pavimentos flexibles

En la Tabla 5-9, se muestran las medidas a utilizar en la conservación de los pavimentos flexibles. Es importante consignar que en la modelación en HDM-4 se usó una mayor variedad de trabajos aislados, tales como sello de agregados, bacheo, sello de grietas y tratamiento superficial; sin embargo, de manera aislada no entregan una mejora considerable sobre el pavimento.

Tabla 5-9 Medidas de conservación Aplicadas a los Pavimentos Flexibles
Fuente: Elaboración Propia

Conservación	Límite del Deterioro
Recapado y Fresado 5 [cm]	4[m/Km] < IRI o 25% < Área dañada Total
Recapado 5 [cm]	4[m/Km] < IRI o 25% < Área dañada Total
Recapado 6 [cm]	4[m/Km] < IRI o 25% < Área dañada Total
Repavimentación 60 [mm] de Carpeta	4[m/Km] < IRI o 40% < Área dañada Total
Repavimentación 70 [mm] de Carpeta y 80 [mm] de Base Asfáltica	4[m/Km] < IRI o 40% < Área dañada Total
Repavimentación 50 [mm] de Carpeta, 60 [mm] de Binder y 80 [mm] de Base Asfáltica	4[m/Km] < IRI o 40% < Área dañada Total
Repavimentación 60 [mm] de Carpeta, 70 [mm] de Binder y 100 [mm] de Base Asfáltica	4[m/Km] < IRI o 40% < Área dañada Total
Repavimentación 60 [mm] de Carpeta, 150 [mm] de Base y 150 [mm] de Subbase	5.5[m/Km] < IRI o 70% < Área dañada Total
Repavimentación 50 [mm] de Carpeta, 90 [mm] de Base Asfáltica, 150 [mm] de Base y 150 [mm] de Subbase	5.5[m/Km] < IRI o 70% < Área dañada Total
Repavimentación 70[mm] de Carpeta, 120 [mm] de Base Asfáltica, 150 [mm] de Base y 150 [mm] de Subbase	5.5[m/Km] < IRI o 70% < Área dañada Total
Repavimentación 60 [mm] de Carpeta, 70 [mm] de Binder, 80 [mm] de Base Asfáltica, 150 [mm] de Base y 150 [mm] de Subbase	5.5[m/Km] < IRI o 70% < Área dañada Total
Tratamiento Superficial	4[m/Km] < IRI

Es necesario aclarar que un recapado de 6 [cm] y una repavimentación de 6 [cm], en términos de conservación vendrían siendo lo mismo, sin embargo, al tener un criterio distinto de deterioro como disparador, el efecto sobre la nueva capa de asfalto será distinto. El modelo de deterioro indica que ambos son afectados por el agrietamiento existente previo al respectivo recapado, el cual afecta el inicio de las grietas.

La modelación de los casos y situaciones a evaluar, se hizo a través de la herramienta de análisis de HDM-4, *Proyecto* en la modalidad por Secciones. Lo anterior implicó emplear los datos incluidos en la *Configuración, Flota Vehicular, Red de Carreteras y Estándares de Trabajos*

definidos para este estudio. Luego, se seleccionan todas las alternativas de conservación a realizar sobre el pavimento, para que éstas sean comparadas con la alternativa base. La alternativa base es lo que corresponde a un mantenimiento del tipo rutinario, o sea sin ningún tipo de conservación en el pavimento.

La decisión de cuál de las alternativas resulta ser la más conveniente, se obtiene a través de los resultados técnicos y de costo-beneficio que arroja HDM-4.

6 ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DEL ACCV

El análisis del costo del ciclo de vida (ACCV) es un análisis técnico usado para evaluar a largo plazo las diversas alternativas de inversión vial, al permitir la evaluación y comparación de los costos que representa cualquiera sea la alternativa de pavimentación. Un correcto uso del ACCV, es capaz de encontrar la estrategia de inversión al mejor valor y desempeño esperado.

El ACCV no es una herramienta que permita determinar el tiempo estimado que durará cada alternativa de diseño o rehabilitación del pavimento, sino que es un procedimiento de análisis económico que utiliza los datos técnicos que presenta el pavimento. Por ende, la calidad de los resultados arrojados por el ACCV depende tanto de los datos económicos, como de los datos técnicos, incluyendo la vida útil esperada de las diversas alternativas de pavimento.

El ACCV consta principalmente de siete etapas:

1. Selección del período de análisis.
2. Selección de la tasa de descuento.
3. Estimación del costo inicial.
4. Estimación de los costos para el usuario.
5. Estimación de los costos futuros.
6. Estimación del valor residual.
7. Comparación de las alternativas.

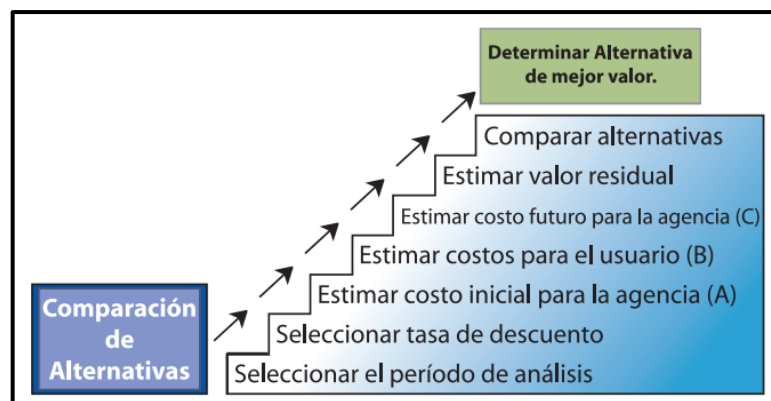


Figura 6-1 Etapas del ACCV
Fuente: Análisis del costo del ciclo de vida (ACPA, 2012)

6.2 DEFINICIÓN DE LOS VALORES ADOPTADOS PARA EL ACCV DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS

6.2.1 Selección del Período de Análisis

El período de análisis es el marco de tiempo en el que se compararán las diversas alternativas de pavimento. El período debe ser lo suficientemente extenso, de tal manera de poder reflejar las diferencias que presentan en su desempeño las alternativas a comparar. Por consiguiente, el período de análisis debe por lo menos incluir una actividad importante de conservación o rehabilitación para cada alternativa. En el Anexo H, se observa el rango típico de duración de los pavimentos y sus conservaciones.

Por esta razón, el período de análisis para las diversas alternativas de pavimentos para la presente memoria es de 20 años.

6.2.2 Selección de la Tasa de Descuento

La tasa de descuento real se usa para referirse a la tasa de variación en el tiempo del valor real del dinero, al considerar las fluctuaciones de la tasa de inflación y de la tasa de interés de la inversión.

En la Ecuación 6-1 (Thuesen y Fabrycky 1984), se muestra el procedimiento para calcular la tasa de descuento real.

$$d = \frac{1+i_{int}}{1+i_{inf}} - 1 \quad \text{(Ecuación 6-1)}$$

Donde:

d : Tasa de descuento real [%].

i_{int} : Tasa de interés [%].

i_{inf} : Tasa de inflación [%].

Cuando la tasa de descuento real es alta, se tiende a reducir el efecto que presentan altos gastos en el futuro. Es por ello, que se dice que las altas tasas de descuento real benefician a las alternativas que presentan costos iniciales bajos y grandes costos futuros, a diferencia de las tasas de descuento real bajas que benefician a las alternativas con costos iniciales grandes y

menores costos futuros. A modo de ejemplo en la Figura 6-2 se muestra el valor actual de un \$1 a diversas tasas de descuento.

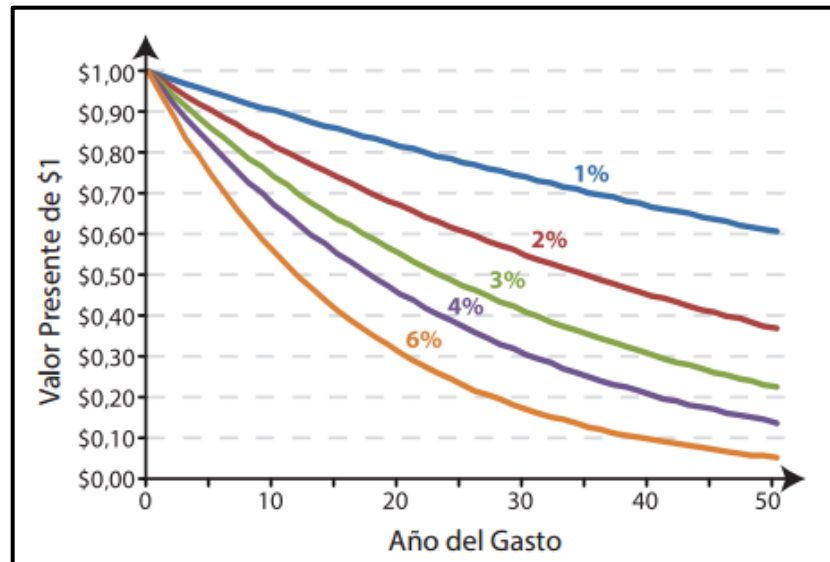


Figura 6-2 Efecto de la Tasa de Descuento Real
Fuente: Análisis del costo del ciclo de vida (ACPA, 2012)

Como el impacto de la tasa de descuento real sobre el valor del dinero es importante, se propone utilizar cuatro distintas tasas de descuento real para el desarrollo de esta memoria:

- $d = 0\%$.
- $d = 3\%$.
- $d = 6\%$.
- $d = 9\%$.

6.2.3 Estimación del Costo Inicial

Corresponde a todos los costos del diseño de las alternativas y la respectiva construcción. En la consideración de los costos iniciales debiesen estimarse solamente los que son diferentes entre las diversas alternativas.

Los costos iniciales pueden variar entre un 50% hasta un 90% de los costos del ACCV, dependiendo netamente del tipo de pavimento y de las actividades de conservación.

Para la estimación de los costos iniciales de los pavimentos diseñados en el presente estudio, se utilizan los precios referenciales de SERVIU – Valparaíso, la cual se encuentra en los siguientes documentos: *Listado de Valores Referenciales de Costos de Construcción para los Programas Pavimentación y Espacios Públicos* (SERVIU Valparaíso, 2015) y *Valores Referenciales para Obras Nuevas* (SERVIU Valparaíso, 2008). La utilización de precios referenciales del año 2008, es de utilización exclusiva en las capas asfálticas, para los otros materiales se usará solamente los precios de referencia del año 2015; con ello se busca poder comparar el encarecimiento que sufrió en los últimos años el precio del petróleo. Por otro lado, se utilizan los precios unitarios, lo que significa la utilización de los costos unitarios considerando el 19% de IVA, y un 25% de gastos generales y ganancias. A continuación se presenta una serie de 4 tablas indicando los precios unitarios utilizados, de material colocado en terreno (costo material, mano de obra, maquinarias, etc).

Tabla 6-1 Precios Unitarios del Pavimento Asfáltico a precios del año 2008
Fuente: Elaboración Propia

Descripción del Trabajo	Unidad	Precio Unitario (M\$)
Capa superficial asfáltica	m ³	169,24
Capa Adherencia 2	m ²	1,21
Carpeta Binder	m ³	147,76
Capa Adherencia 1	m ²	1,21
Base CBR 80%	m ³	36,20
SubBase CBR 40%	m ³	34,48
Excavación no clasificada	m ³	12,33

Tabla 6-2 Precios Unitarios del Pavimento Asfáltico a precios del año 2015
Fuente: Elaboración Propia

Descripción del Trabajo	Unidad	Precio Unitario (M\$)
Capa superficial asfáltica	m ³	334,93
Capa Adherencia 2	m ²	1,42
Carpeta Binder	m ³	293,11
Capa Adherencia 1	m ²	1,42
Base CBR 80%	m ³	36,20
SubBase CBR 40%	m ³	34,48
Excavación no clasificada	m ³	12,33

Tabla 6-3 Precios Unitarios del Pavimento de Hormigón Tradicional
Fuente: Elaboración Propia

Descripción del Trabajo	Unidad	Precio Unitario (M\$)
Pavimento Hormigón	m ³	149,640
SubBase CBR 60%	m ³	36,202
Barras de Transferencia Φ	Kg	1,100
Sello de Juntas	m	2,699
Excavación no clasificada	m ³	12,331
Corte Hormigón	m	1,330

Tabla 6-4 Precios Unitarios del Pavimento de Hormigón de Losas Cortas
Fuente: Elaboración Propia

Descripción del Trabajo	Unidad	Precio Unitario (M\$)
Pavimento Hormigón	m ³	149,640
SubBase CBR 60%	m ³	36,202
Barras de Transferencia Φ	Kg	1,100
Royalty TCP Patent	m ²	0,862
Excavación no clasificada	m ³	12,331
Corte Hormigón	m	1,330

Según la información entregada por SERVIU el precio del asfalto del año 2008 hasta el año 2015 creció un 98%. Dando como resultado que el precio unitario del metro cúbico del asfalto en los últimos años, fuese el doble de lo que cuesta un metro cúbico de hormigón.

Como criterio para la profundidad de la excavación, se determina como la profundidad necesaria para dejar el pavimento a la cota natural que presenta el terreno, representando el criterio más utilizado en la cota final que tienen los firmes.

6.2.4 Estimación de los Costos para el Usuario

Los costos para el usuario son todos aquellos que se encuentran asociados a la alternativa de pavimento y que son contraídos por los usuarios de la vía durante el período de análisis.

Los costos que afectan a los usuarios por el cierre de pistas y otros, se denominan costos de impacto por cierre. Y entre los factores que le influyen se pueden mencionar: longitud de la zona de trabajo, cantidad y capacidad de las pistas abiertas, duración y coordinación de los cierres, restricciones de velocidad, y la disponibilidad y capacidad de rutas alternativas.

Los costos contraídos por uso normal de la vía se denominan costos de operación vehicular. Dentro de los costos de operación vehicular, se pueden nombrar los costos relacionados al consumo de combustible, aceite, el desgaste de neumáticos y otras piezas. Principalmente, el costo de operación vehicular es una función de la capacidad de soporte del pavimento.

Por último, existen los costos debido a las demoras por problemas de capacidad y accidentes.

En la presente memoria no se contempla la estimación de los costos para el usuario, siendo que hubiese sido posible de realizar, a través del HDM-4 y los precios sociales del año 2015.

6.2.5 Estimación de los Costos Futuros

Generalmente los costos a futuro se pueden dividir en dos grupos: Costos de mantenimiento y operación, y los costos de conservación o rehabilitación.

Los costos de mantenimiento y operación, corresponden a los costos diarios necesarios para mantener un nivel de servicio.

Mientras que los costos de conservación o rehabilitación son costos a futuro asociados con un mejoramiento en la condición del pavimento.

Para la estimación de los costos a futuros del presente estudio se utilizan los precios referenciales de SERVIU-Valparaíso, tanto para el año 2008 como el 2015. También son usados los precios usados en la evaluación técnico-económica del año 2014 de la red vial pavimentada, según la Dirección de Vialidad del MOP.

En las Tablas 6-5 y 6-6 se muestran los precios unitarios utilizados en las conservaciones de los pavimentos flexibles y rígidos.

Tabla 6-5 Precios Unitarios de las Conservaciones de los Pavimentos Asfálticos
Fuente: Elaboración Propia

Conservación	Unidad	P.U. ASF-2008 (M\$)	P.U. ASF-2015 (M\$)
Recapado y Fresado 5 [cm]	m ²	14,95	25,16
Recapado 5 [cm]	m ²	9,668	18,17
Recapado 6 [cm]	m ²	11,36	21,57
Repavimentación 1	m ²	12,1	23,68
Repavimentación 2	m ²	23,93	46,04
Repavimentación 3	m ²	29,9	57,42
Repavimentación 4	m ²	35,83	68,67
Reconstrucción 1	m ²	26,402	37,98
Reconstrucción 2	m ²	35,85	55,76
Reconstrucción 3	m ²	43,236	69,79
Reconstrucción 4	m ²	47,62	78,25

Tabla 6-6 Precios Unitarios de las Conservaciones de los Pavimentos de Hormigón
Fuente: Elaboración Propia

Conservación	Unidad	P.U. (M\$)
Cepillado	m ²	4,22
Sellado de Juntas	m	2,699
Reemplazo de drenes	Km	18576,5
Reparación Profundidad Parcial	m	43,46
Reemplazo Losa 16 [cm]	m ²	27,64
Reemplazo Losa 16 [cm] con Barra	m ²	29,309
Reemplazo Losa 13 [cm] OPTIPAVE	m ²	23,086
Reemplazo Losa 15 [cm] OPTIPAVE	m ²	26,97

Cabe consignar que el precio del mantenimiento rutinario, tanto para asfalto como para hormigón, se opta por un valor de M\$2837.9 por kilómetro. Aquí es importante advertir que se tomó el dato vigente según los documentos consultados, pero claramente una de las conclusiones del trabajo es que no debería ser el mismo.

A manera de comparación en la Tabla 6-7 se muestran los costos futuros tipo efectuados a un pavimento asfáltico con 10.000.000 EE. Mientras que la Tabla 6-8 se muestran los costos futuros tipo de un pavimento rígido con 10.000.000 EE, según AASHTO 98. Ambas estimaciones del momento a realizar las respectivas conservaciones, son obtenidas de los resultados de la modelación en HDM-4.

Tabla 6-7 Costos Futuros Tipo de un Pavimento Asfáltico sometido a 10.000.000 EE con precios del año 2015
Fuente: Elaboración Propia

Año	Tipo de Trabajo	Descripción del Trabajo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (M\$)	Costo Total (M\$)
1	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
2	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
3	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
4	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
5	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
6	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
7	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
8	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
9	Conservación	Recapado y Fresado	7000	m ²	25,16	176120
9	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
10	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
11	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
12	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
13	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
14	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
15	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
16	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
17	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
18	Conservación	Recapado y Fresado	7000	m ²	25,16	176120
18	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
19	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9
20	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2837,9

Tabla 6-8 Costos Futuros Tipo de un Pavimento de Hormigón Tradicional sometido a 10.000.000 EE
Fuente: Elaboración Propia

Año	Tipo de Trabajo	Descripción del Trabajo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (M\$)	Costo Total (M\$)
1	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
2	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
3	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
4	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
5	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
5	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,7	5398
6	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
7	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
8	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
9	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
10	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
10	Conservación	Reemplazo Drenes	1	km	18576,5	18577
11	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
12	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
13	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
14	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
15	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
15	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,7	5398
16	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
17	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
17	Conservación	Cepillado [6 mm]	7000	m2	4,2	29540
18	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
19	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838
20	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,7	5398
20	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,9	2838

6.2.6 Estimación del Valor Residual

El valor residual se puede definir dentro de los siguientes criterios:

- El valor neto que el pavimento tendría si fuese reciclado al final de su vida útil.
- El valor de la vida remanente al final del análisis.
- El valor del pavimento al ser utilizado como capa de soporte para una nueva sobrecarpeta o sobrecapa.

La estimación del valor residual se debe realizar cuando exista la probabilidad de que las diversas alternativas tengan valores residuales muy diferentes al final del período de análisis.

Para efecto del análisis realizado en la presente memoria, no se considera la estimación del valor residual, suponiendo que teóricamente todas las estructuras según indica la teoría pasados los 20 años deberían finalizar con la misma serviciabilidad. Sin embargo, en la práctica se ha observado que los pavimentos de hormigón tienen un período de desempeño esperado entre los 20 -40 años,

mientras que los pavimentos asfálticos su período de desempeño se encuentra entre los 8 -25 años. (ACPA, 2012)

6.2.7 Comparación de las Alternativas

Las diversas alternativas utilizadas en el ACCV se deben comparar usando una medida del valor económico de una inversión. Lo usual es que las estrategias se comparen en base al valor presente neto (VPN).

Todos los costos futuros mostrados en las tablas 6-7 y 6-8 deben ser descontados de los respectivos valores actuales equivalentes y sumar al costo inicial entregando lo que se conoce como VPN, esto se visualiza en la Tabla 6-9 que vendría siendo la estimación del VPN para la Tabla 6-7.

**Tabla 6-9 VPN de un Pavimento Asfáltico sometido a 10.000.000 EE con precios del año 2015 y d=6%
Fuente: Elaboración Propia**

Año	Tipo de Trabajo	Costo Total (M\$)	Valor presente (M\$)
0	Construcción inicial	375142	375142
1	Mantenimiento	2838	2677
2	Mantenimiento	2838	2526
3	Mantenimiento	2838	2383
4	Mantenimiento	2838	2248
5	Mantenimiento	2838	2121
6	Mantenimiento	2838	2001
7	Mantenimiento	2838	1887
8	Mantenimiento	2838	1781
9	Mantenimiento/Conservación	178958	105925
10	Mantenimiento	2838	1585
11	Mantenimiento	2838	1495
12	Mantenimiento	2838	1410
13	Mantenimiento	2838	1331
14	Mantenimiento	2838	1255
15	Mantenimiento	2838	1184
16	Mantenimiento	2838	1117
17	Mantenimiento	2838	1054
18	Mantenimiento/Conservación	178958	62697
19	Mantenimiento	2838	938
20	Mantenimiento	2837,9	885
VALOR PRESENTE NETO TOTAL: M\$			573640

Los análisis del VPN son aplicables solamente a alternativas excluyentes, durante el mismo período de análisis, es por ello que el uso de los valores remanentes es una forma de ajustar el hecho de que las alternativas al final de su vida real no tienen la misma vida de servicio.

La ecuación para el valor actual (\$P), debido a un costo futuro (\$F) por una sola vez es:

$$\$P = \$F * \left[\frac{1}{(1+d)^t} \right]$$

(Ecuación 6-2)

Donde:

d : Tasa de descuento real [%].

t : Año en que ocurrió el costo futuro por una sola vez.

En la Figura 6-3 se muestra el resultado esperado, al relacionar la condición del pavimento con los resultados financieros a través del VPN a medida que transcurre el tiempo.

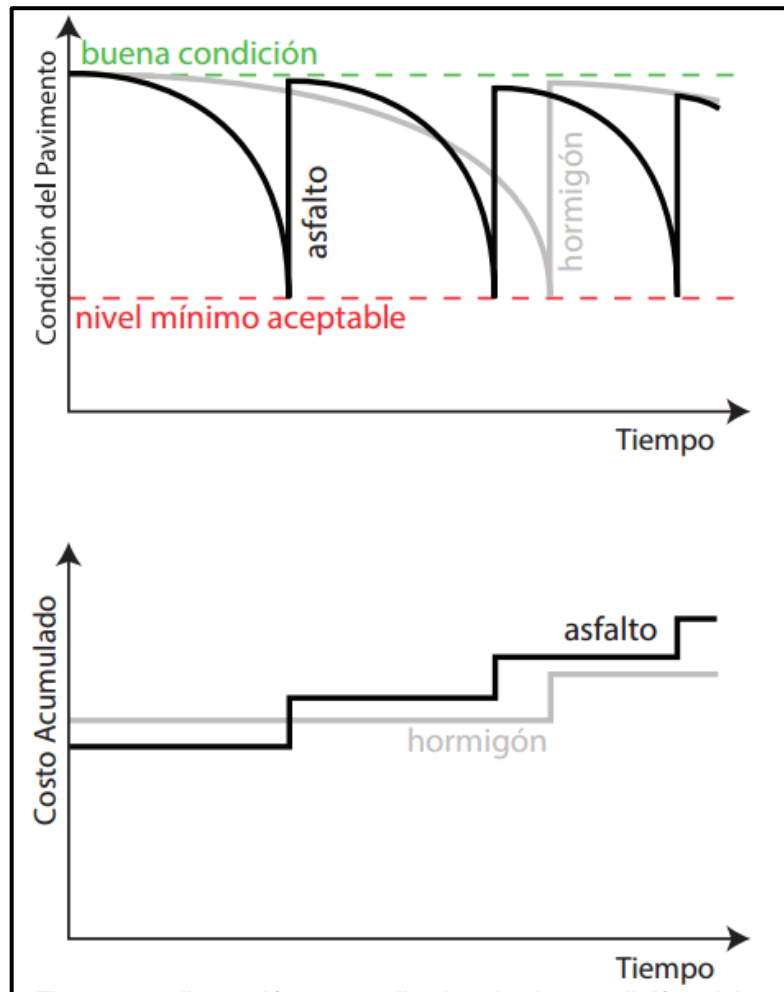


Figura 6-3 Ejemplo de la Comparación entre Alternativas en base al VPN
Fuente: Análisis del costo del ciclo de vida (ACPA, 2012)

7 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ACCV PARA LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO

Antes de entregar los resultados es importante hacer algunas consideraciones en la presentación de los gráficos. Para mejor visualización de los gráficos, solamente se presentarán 4 métodos de diseños: AASHTO 93 en asfalto, AASHTO 98, MEPDG sin barras de transferencia y OPTIPAVE sin barras de transferencia.

La utilización de AASHTO 93, por sobre el método MOP, se debe al encarecimiento de las capas asfálticas en los últimos años. Esto perjudica en sobremanera la utilización de un número estructural mínimo para las capas asfálticas y favorece el diseño al mínimo espesor permitido en las capas ligadas.

En los diseños de hormigón tradicional se prefiere visualizar los resultados por el método AASHTO 98, aunque el diseño por AASHTO 93 entregue resultados semejantes, AASHTO 98 es más eficiente.

Como la utilización de barras de transferencia no es habitual en Chile, se desea visualizar los resultados tanto de MEPDG y OPTIPAVE, sin la utilización de las dovelas. Sin embargo, es necesario aclarar que para los diseños por AASHTO 98, para los 10.000.000 E.E. se es necesario realizar un cepillado al año 17 (Tabla 6-8), para los 30.000.000 EE el cepillado es al año 14 y para los 100.000.000 EE el cepillado es en el año 11; en el Anexo I se entregan las respectivas tablas de las conservaciones de un pavimento de hormigón diseñado por AASHTO 98, para los 30 y 100 millones de E.E. Del Anexo I, se desprende que si con MEPDG (sin dovelas) se hubiese diseñado para que el pavimento falle en el año 10 con un IRI de 4 mm/Km, ocasionando el respectivo cepillado, los espesores de las losas hubiesen resultado mucho menores que los diseñados por AASHTO 98.

Si se considera necesario conocer el resultado de los costos iniciales de cada uno de los métodos de diseño, estos se encuentran en los Anexos.

En la estimación de los resultados, desde los 2.000.000 EE hasta los 30.000.000 EE, se considera una vía con un ancho total de 7 [m]. Mientras que para los 100.000.000, el ancho total de la vía es de 14 [m]. Para todos los casos la estimación de los costos están referidos a una largo unitario de la vía de 1 [km].

7.1 COMPARACIÓN DE LOS COSTOS INICIALES

En los Gráficos 7-1 al 7-3 se muestran los costos iniciales de los cuatro métodos de diseño seleccionados. La presentación está diferenciada por el CBR característico de la subrasante y va desde los 2.000.000 EE hasta los 30.000.000 EE.

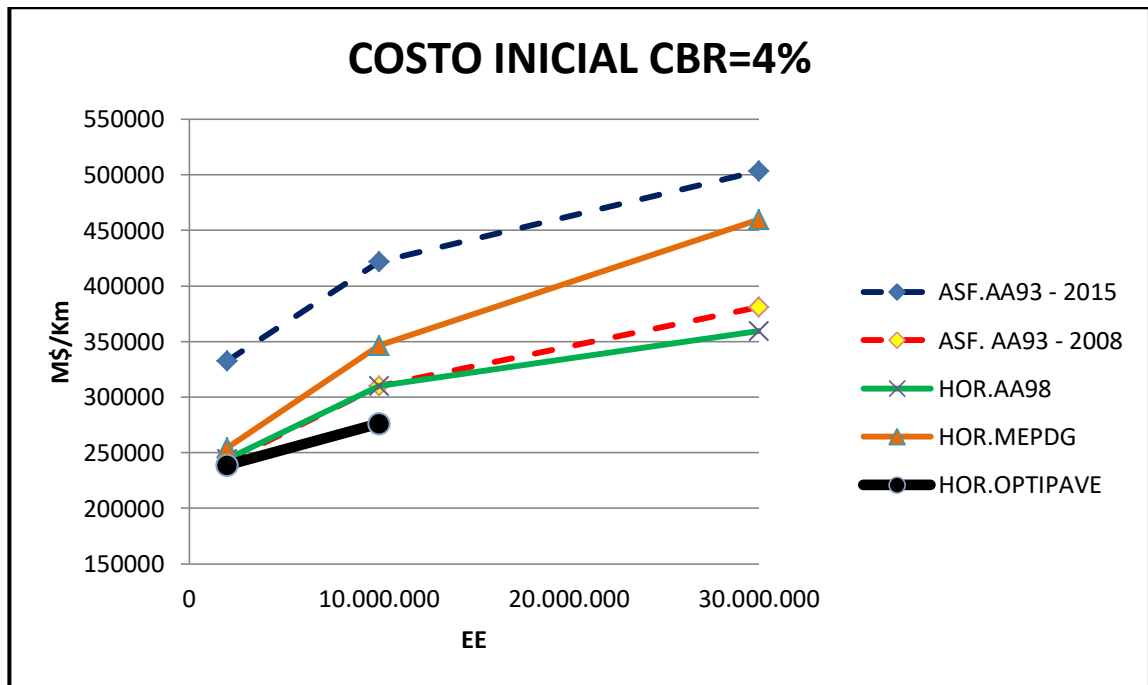


Gráfico 7-1 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 4% de la Subrasante

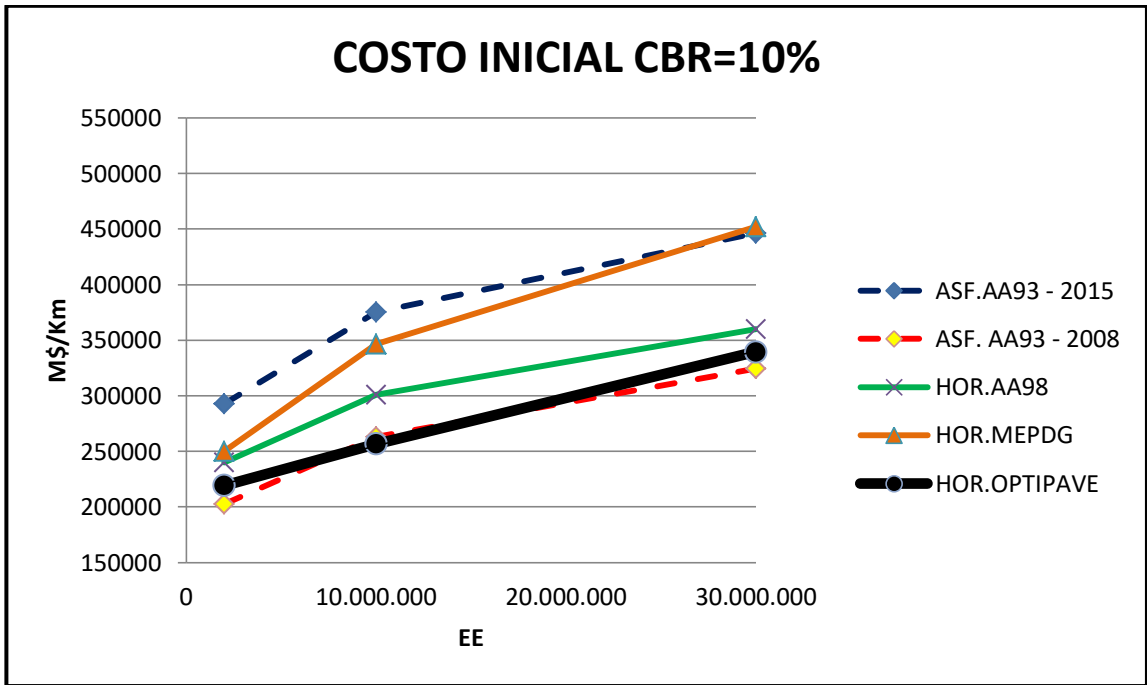


Gráfico 7-2 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 10% de la Subrasante

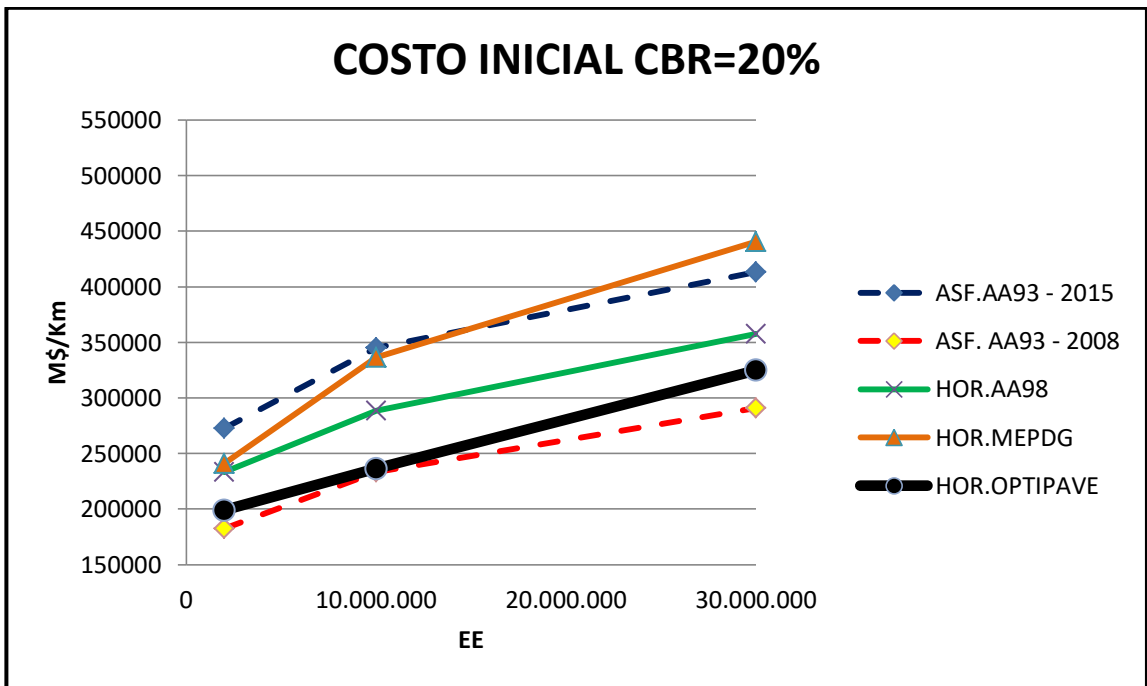


Gráfico 7-3 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 20% de la Subrasante

Producto del encarecimiento del asfalto el método de diseño realizado por MOP para los pavimentos asfálticos, resulta en el año 2015 en promedio un 13% más caro que el diseño por el

método de AASHTO 93. Con precios del año 2008, no se encuentran grandes diferencias en el costo inicial entre los métodos. El costo del pavimento asfáltico, entre 6 a 7 años, subió un 40%.

Aunque el diseño por MEPDG sin dovelas, en los niveles de tránsito medio y alto, genera grandes costos iniciales, estos se deben a problemas con el deterioro funcional (IRI) y como se explicó en el comienzo del capítulo, los diseños por MEPDG se deben realizar considerando un cepillado alrededor del año 10. Por otra parte, si no desea realizar un cepillado sobre el pavimento, la utilización de barras de transferencia de cargas aminora considerablemente el espesor de la losa (incluso muy por debajo del diseño por AASHTO 98), y en consecuencia los costos. Es importante advertir eso sí que para bajo tránsito la utilización de dovelas incrementa el costo en un 3%, sin embargo, en el tránsito medio y alto el costo inicial se disminuye un 16% y un 30%, respectivamente. Con la utilización de barras de transferencia, el diseño pasa de ser el más costoso a colocarse a un costo igual (tránsito medio) o por debajo del costo (tránsito alto) que requiere hacer un pavimento con asfalto, estando este a precios del año 2008.

A igual que lo que sucede en MEPDG, en OPTIPAVE, la utilización de barras de transferencia es muy útil. Sin embargo, solamente esto sucede para un tránsito alto. Ya que el costo inicial para un tránsito bajo y medio, se aumenta en un 4% y un 2,5%, respectivamente; en la situación del tránsito alto, el costo inicial se disminuye en un 18%. Con ello para cualquier situación de tránsito medio (sin barras de transferencia) o alto (con barras de transferencia), OPTIPAVE es el método de diseño que arroja los costos más bajos.

Debido al alto costo inicial de los diseños de pavimentos de hormigón, a través de MEPDG, se decidió realizar una interpolación entre el año del cepillado y el espesor de la losas (entre MEPDG y AASHTO 98), para luego extrapolar la función y poder determinar el espesor al cual el diseño de MEPDG presenta una falla por escalonamiento e IRI al año 10 para los 30.000.000 y 100.000.000 E.E. Mientras que para los 10.000.000 E.E., el año de realización del cepillado es el 17, ya que a menores años para llegar al cepillado se afecta enormemente el agrietamiento de la losa. Las losas que soportan bajos volúmenes de tránsito, no fueron rediseñadas. En la Tabla 7-1, se entregan los resultados de los espesores obtenidos para los diseño de MEPDG, considerando cepillados en las losas. En el Anexo J, se presenta la interpolación obtenida para obtener el espesor necesario y desarrollar el respectivo cepillado.

Tabla 7-1 Diseño de MEPDG considerando Conservaciones
Fuente: Elaboración Propia

			EE			
			100.000.000	30.000.000	10.000.000	2.000.000
CBR [%]	4	Espesor Losa [cm]	32	21	20	16
		Espesor Subbase [cm]	23	20	20	17
	10	Espesor Losa [cm]	32	20	19	16
		Espesor Subbase [cm]	22	20	20	17
	20	Espesor [cm]	32	20	18	15
		Espesor Subbase [cm]	20	20	19	15

De la Tabla 7-1, cabe señalar que el agrietamiento para los 10.000.000 E.E. es de un 7%. Para los 30.000.000 E.E. el agrietamiento es de un 8%, mientras que para los 100.000.000 E.E. el agrietamiento es de 0%.

En los Gráficos 7-4 al 7-6, se muestran los costos iniciales mostrados en los Gráficos 7-1 al 7-3, pero considerando en el diseño MEPDG los respectivos cepillados anunciados anteriormente.

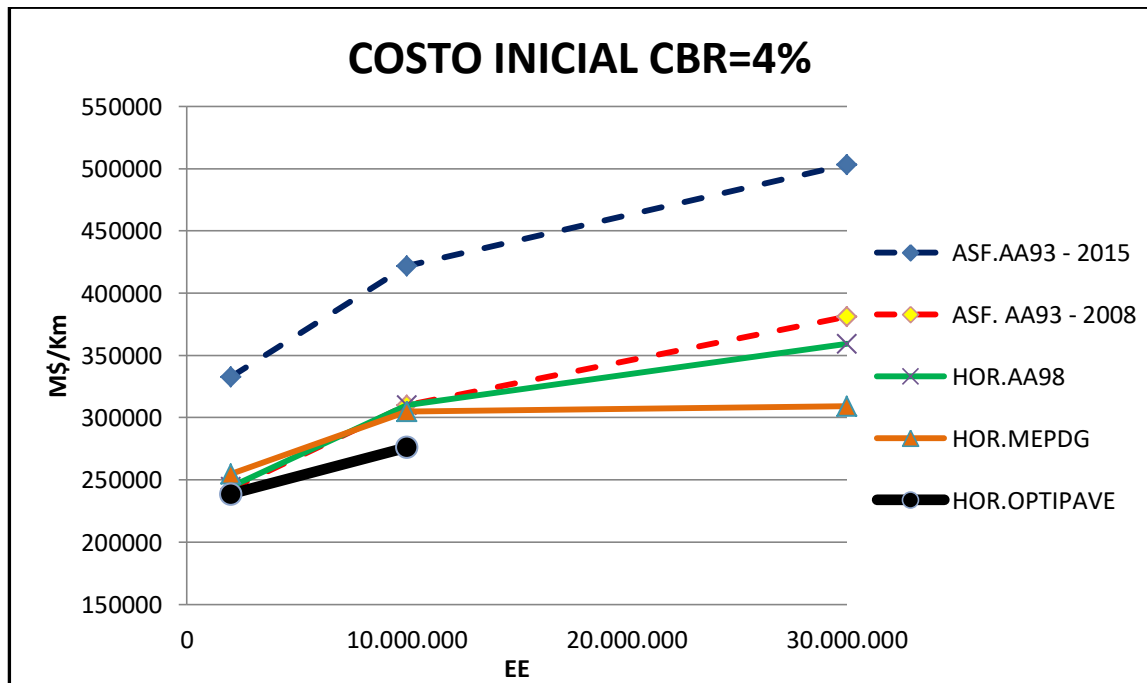


Gráfico 7-4 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 4% de la Subrasante y considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

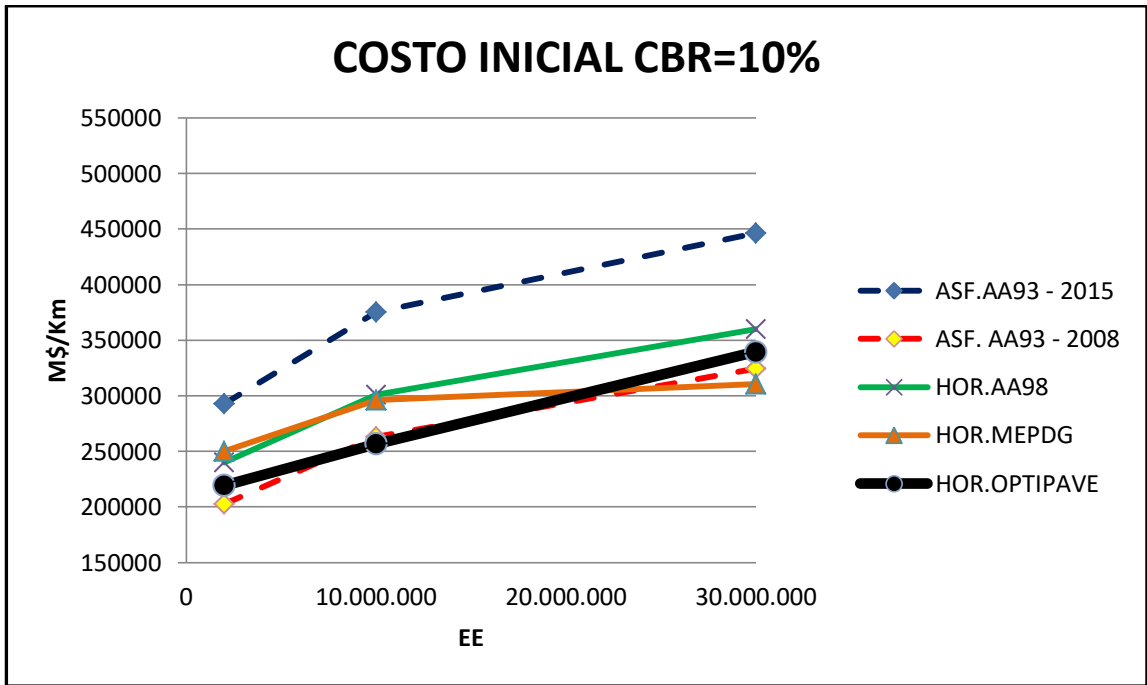


Gráfico 7-5 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 10% de la Subrasante y considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

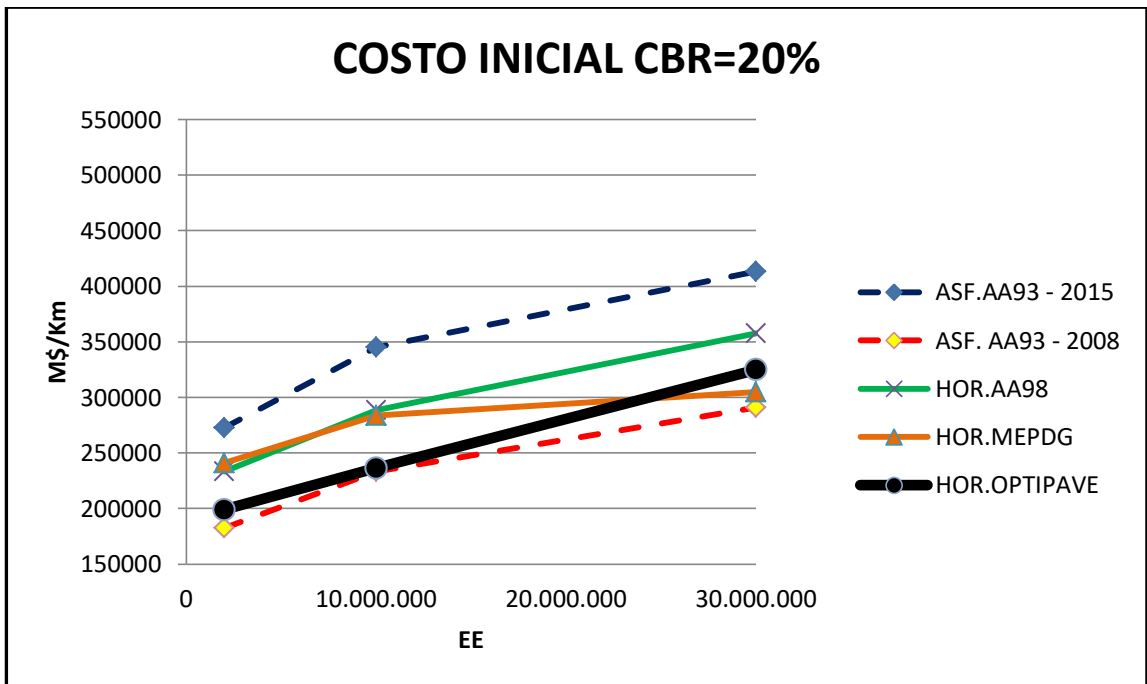


Gráfico 7-6 Costo Inicial de los Pavimentos con CBR 20% de la Subrasante y considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

Se desprende de los Gráficos 7-4 al 7-6, que los diseños realizados por MEPDG considerando en el futuro cepillados del pavimento, ocasiona que el diseño de pavimentos de hormigón tradicional sea mucho más competitivo. Incluso el diseño logra ser mucho más económico que el diseño de losas cortas.

En el Gráfico 7-7, se muestran los resultados del costo inicial para los 100.000.000 EE. En el gráfico se visualiza los costos iniciales del método MEPDG, considerando la extrapolación del espesor para el cual se debe realizar un cepillado al año 10. Por otra parte, se muestran los diseños por MEDPG con la utilización de barras de transferencia de carga.

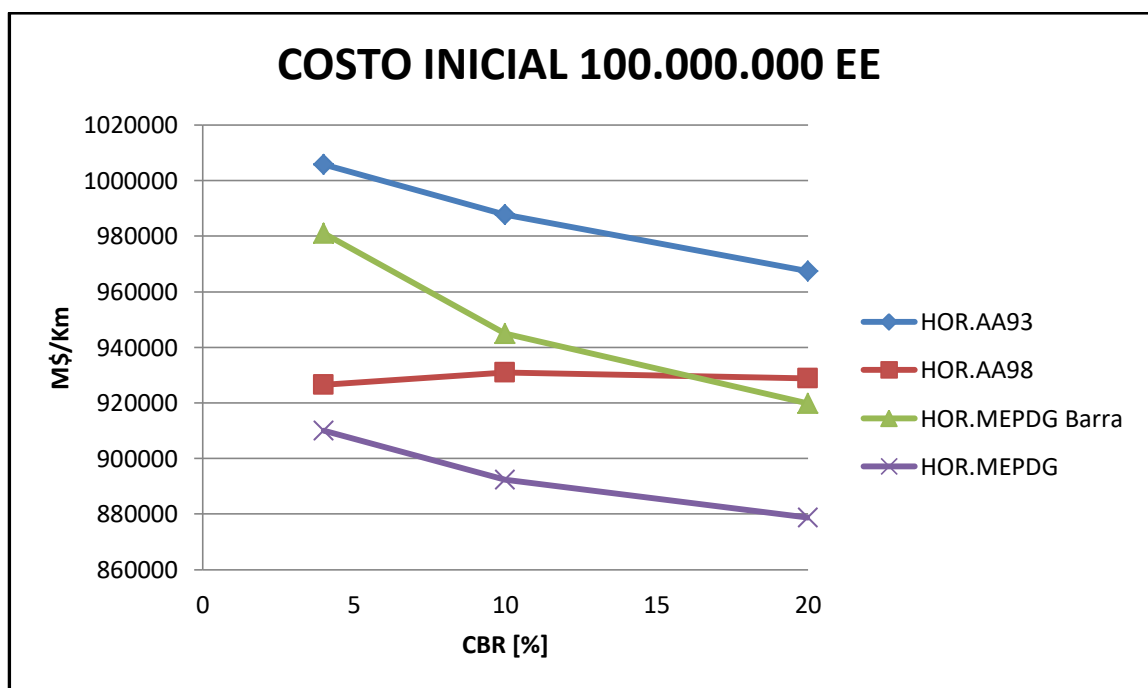


Gráfico 7-7 Costo Inicial de los Pavimentos de Hormigón Tradicional para 100.000.000 EE

Aunque el costo inicial del diseño con barras, sigue siendo en algunas situaciones más costoso que en AASHTO 98, hay que recordar que el diseño por MEPDG durante los 20 años no necesita conservaciones. El mayor valor del diseño MEPDG con dovelas se debe a que en términos de espesores, AASHTO 98, es levemente mayor, pero el uso de las dovelas de gran diámetro ($\phi 38$) absorbe el menor espesor y costo de los diseños por MEPDG. Por otro parte, se hace necesario realizar el diseño tradicional de hormigón, a través de MEPDG, considerando un cepillado cada 10, ya que ello resultará en menores costos iniciales.

De la Gráfico 7-7, se puede desprender que el diseño más óptimo para los 100.000.000 E.E., se obtendría realizando un diseño con barras de transferencia de carga y que al año 10 se realice un cepillado.

Es sabido que para bajo tránsito la alternativa más conveniente es la utilización de asfalto, sin embargo el diseño por OPTIPAVE argumenta que el diseño por losas cortas puede lograr ser más barato que el asfalto. En los Gráficos 7-8 y 7-9, se hace un comparativo entre el diseño OPTIPAVE y el pavimento asfáltico, y entre OPTIPAVE y el pavimento de hormigón tradicional. Cabe recordar que según la Tabla 4-6, el mínimo espesor de capa asfáltica para un pavimento diseñado para 2.000.000 E.E., es de 7,5 [cm], haciéndose poco viable la utilización de un tratamiento superficial.

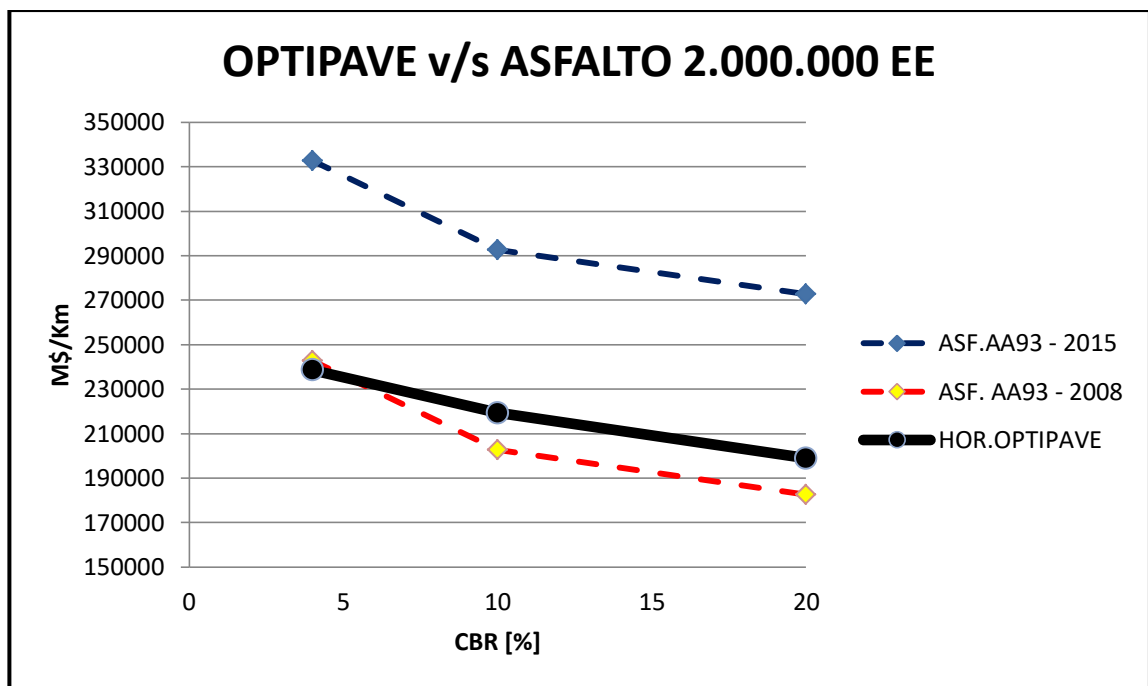


Gráfico 7-8 Comparación entre OPTIPAVE y ASFALTO para bajo tránsito

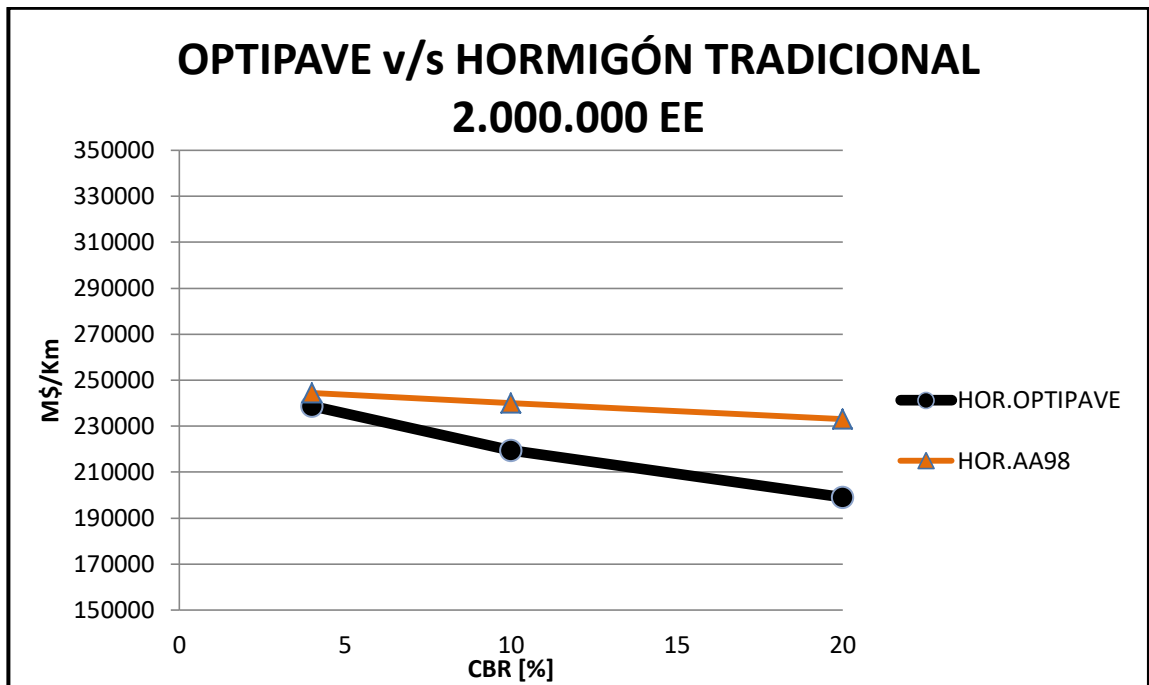


Gráfico 7-9 Comparación entre OPTIPAVE y HORMIGÓN TRADICIONAL para bajo tránsito

Al observar el Gráfico 7-9, para cualquier situación el diseño por OPTIPAVE es más conveniente que el diseño tradicional de pavimentos rígidos. Sin embargo, al analizar el Gráfico 7-8, el diseño por losas cortas al compararlo con el pavimento asfáltico, resulta ser más conveniente para los suelos de baja calidad. Para suelos medios y buenos, el asfalto es en promedio un 8% más barato, pero con la salvedad que el diseño por OPTIPAVE asegura que durante los 20 años no será necesario realizar alguna medida de conservación importante.

7.2 COMPARACIÓN A LARGO PLAZO A TRAVÉS DEL VALOR PRESENTE NETO

La información arrojada por *Precios Sociales Vigentes 2015*” (MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL, 2015), indica que la tasa de descuento recomendada es de un 6%, provocando que la presentación de los gráficos tengan como preminencia este valor.

Producto de la diversidad de medidas de conservaciones existentes, la presentación de los resultados es realizada a través de un ajuste exponencial que comprende a una nube de puntos de

todas la medidas de conservación realizadas al pavimento, independiente del CBR que presente la subrasante. Con ello se busca entregar los resultados solamente en base al volumen del tránsito, porque las desviaciones que genera el costo inicial por efecto del nivel de la subrasante son irrelevantes a largo plazo. Los resultados de los ajustes se pueden encontrar en los Anexos.

Para estimar el efecto en el ACCV de los diseños con dovelas (MEPDG y OPTIPAVE), basta con ubicar el costo inicial que presenta el diseño del pavimento con dovelas, para luego trazar una curva paralela a la que presenta el respectivo método de diseño homólogo, pero sin las dovelas. Lo anterior solo es aplicable para los Gráficos 7-10 al 7-13.

7.2.1 Valor Presente Neto con Tasa de Descuento Real del 6%

En los Gráficos 7-10 al 7-12, se muestran los resultados obtenidos al realizar el ACCV con una tasa de descuento real del 6%. Los Gráficos 7-11 y 7-12, son los obtenidos al realizar los diseños por MEPDG para falla de escalonamiento e IRI, al año 20.

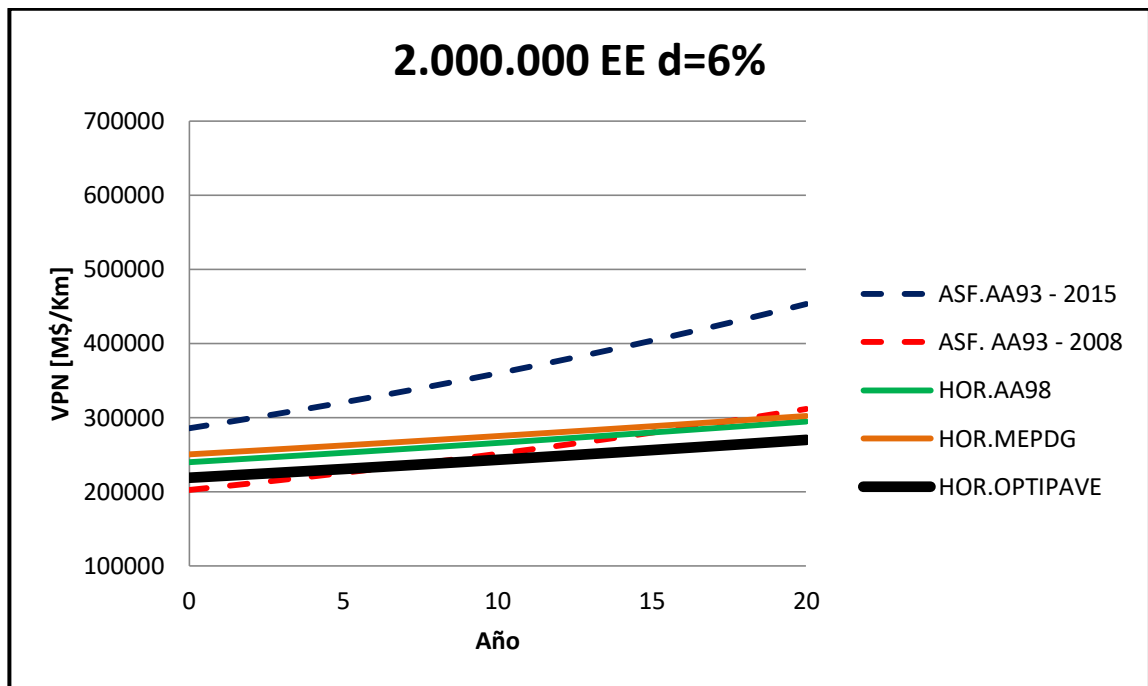


Gráfico 7-10 ACCV para 2.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%

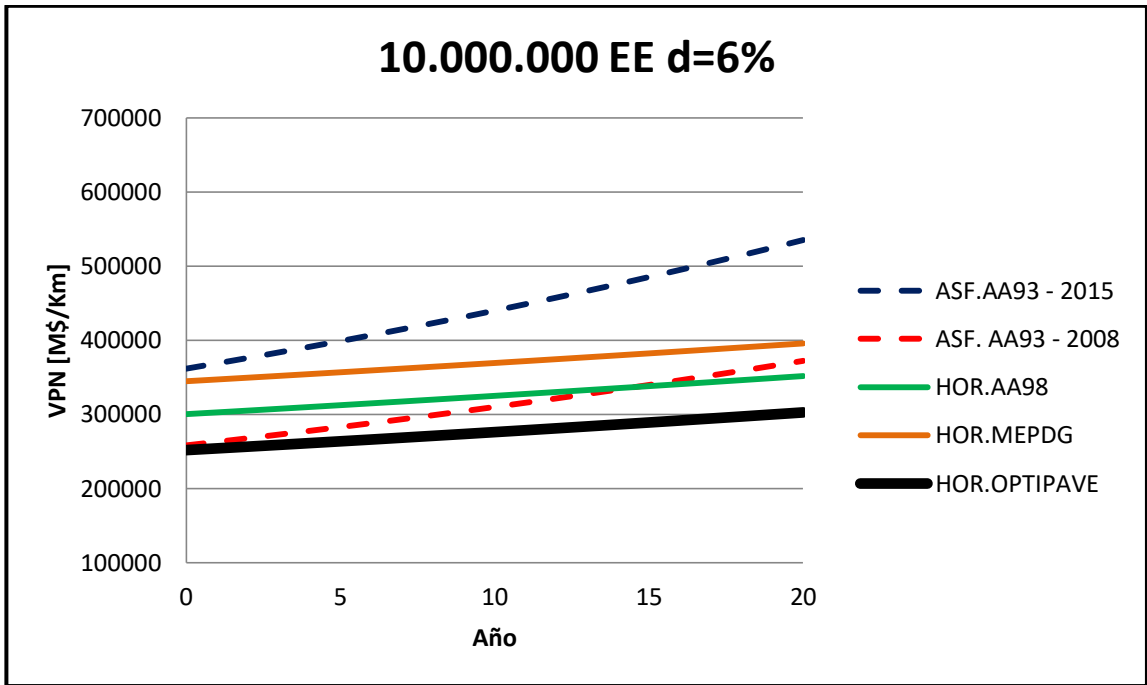


Gráfico 7-11 ACCV para 10.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%

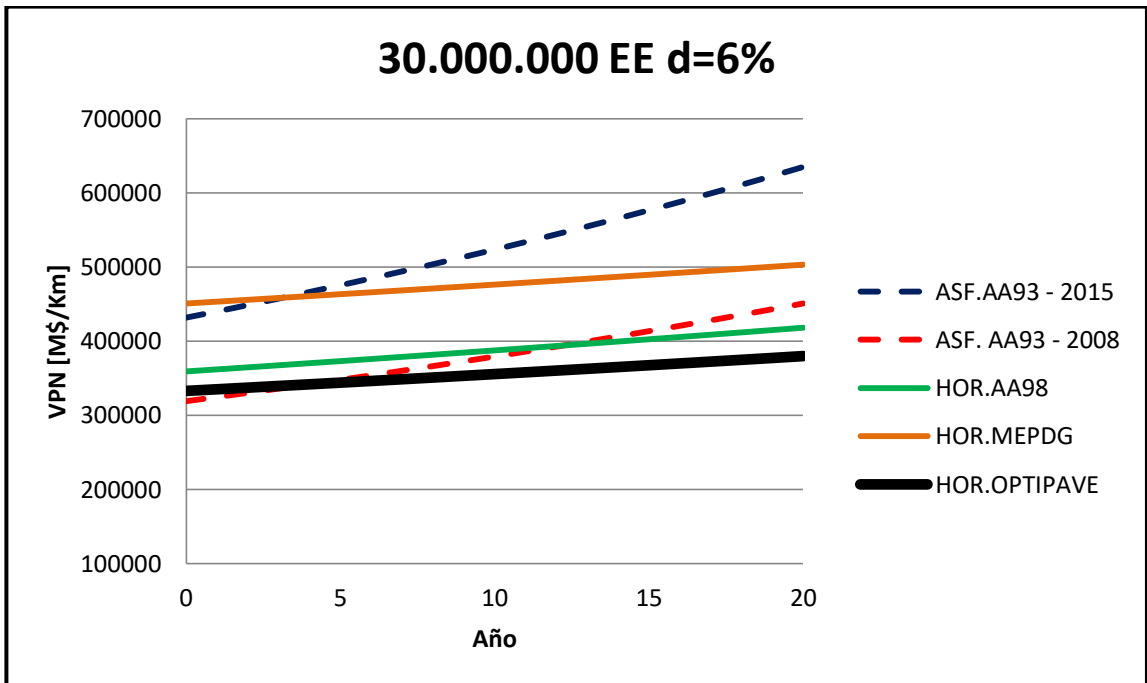


Gráfico 7-12 ACCV para 30.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%

Al analizar los tres gráficos anteriores, se puede decir que si bien es cierto que para bajo tránsito el costo inicial más conveniente es el de un pavimento asfáltico con precios al año 2008, al cabo de unos 5 años el diseño por losas cortas termina imponiéndose como el que abarata más los costos. Esto ocurre porque la diferencia de costos iniciales entre OPTIPAVE y el pavimento asfáltico no es muy grande, y al cabo de los 5 años el pavimento asfáltico ya es sometido a sello de grietas, tratamientos superficiales, bacheos y sello de agregados; ocasionando que en un margen muy pequeño de tiempo, el pavimento flexible sea una alternativa más cara que el pavimento por losas cortas. Y como se dijo anteriormente ya sea para medio o alto tránsito, desde un comienzo OPTIPAVE es la alternativa técnico-económica más viable. Se aclara, sin embargo, que el método utilizado subestima el costo del ciclo de vida de los pavimentos de losas cortas, ya que la mayor cantidad de juntas requerirá de mayores costos de mantención, diferencia que no fue considerada en el análisis.

Por otra parte, el pavimento asfáltico hasta el año 18 resulta ser más conveniente que el diseño tradicional en hormigón, todo esto para un tránsito bajo. Esto ocurre ya que habitualmente al año 18, ya se han realizado dos fresados y recapados sobre el pavimento flexible, incrementando enormemente el costo inicial que presentaba el pavimento asfáltico. Si el nivel de tránsito aumenta, en una menor cantidad de tiempo el pavimento de hormigón tradicional logra ser más conveniente que el pavimento asfáltico.

Para analizar el efecto de realizar los diseños por MEPDG, pero considerando cepillados en los pavimentos cuyo tránsito sea 10.000.000, 30.000.000 y 100.000.000 E.E., es que en los Gráficos 7-13 al 7-15 se entregan las curvas características del ACCV obtenido.

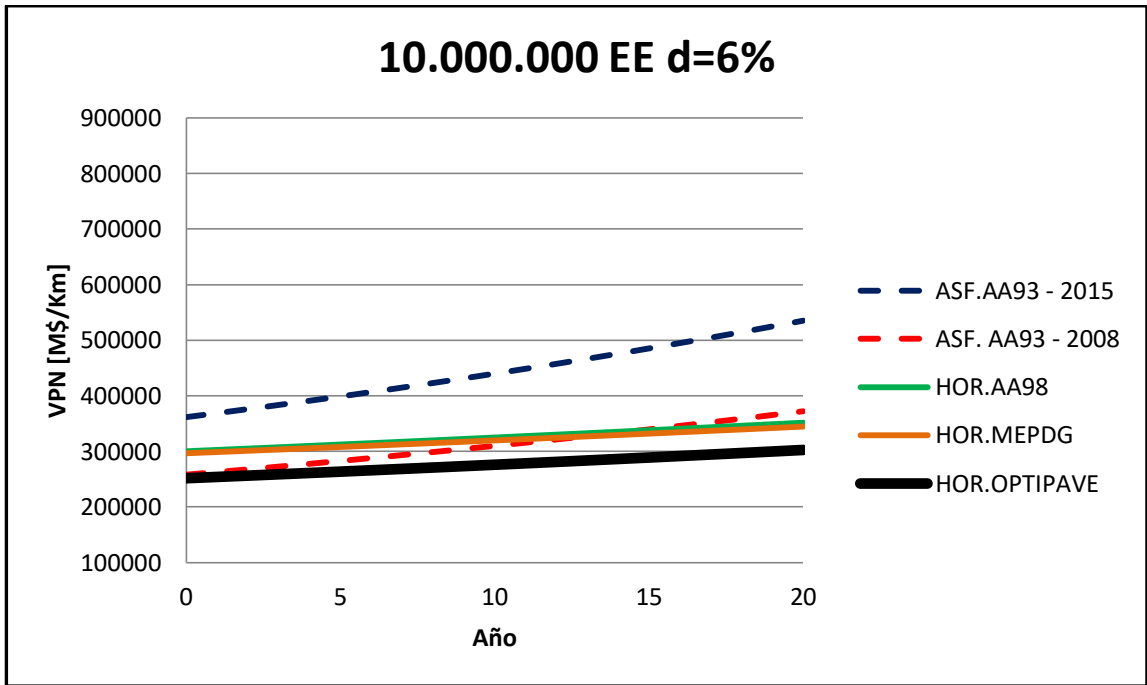


Gráfico 7-13 ACCV para 10.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

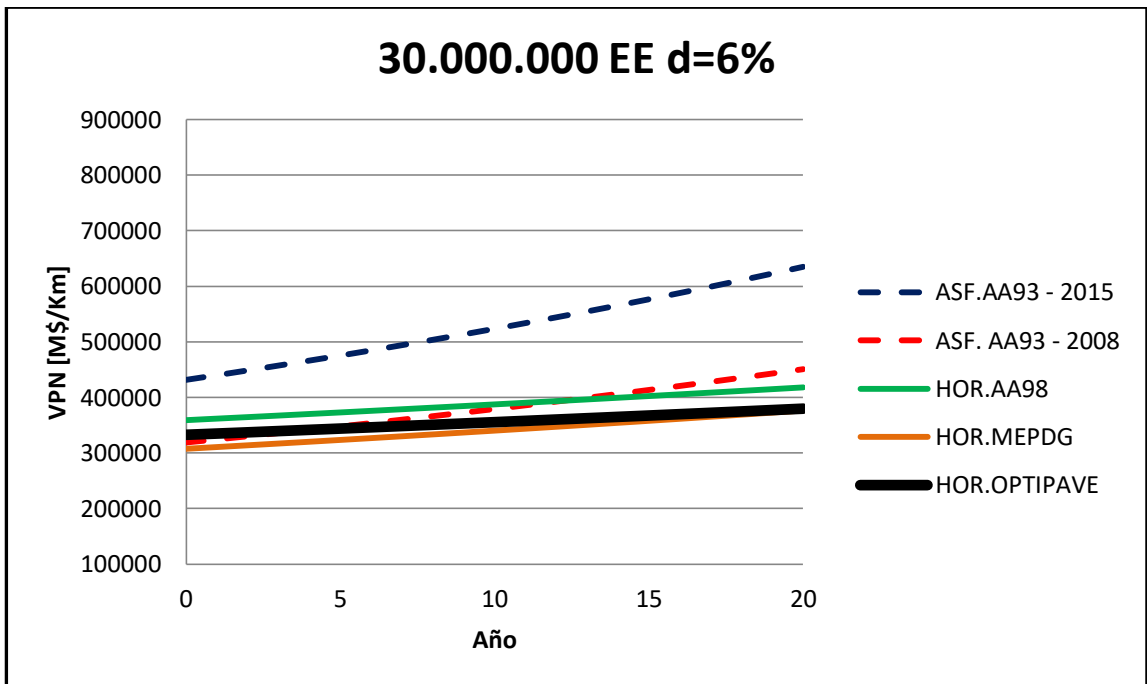


Gráfico 7-14 ACCV para 30.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

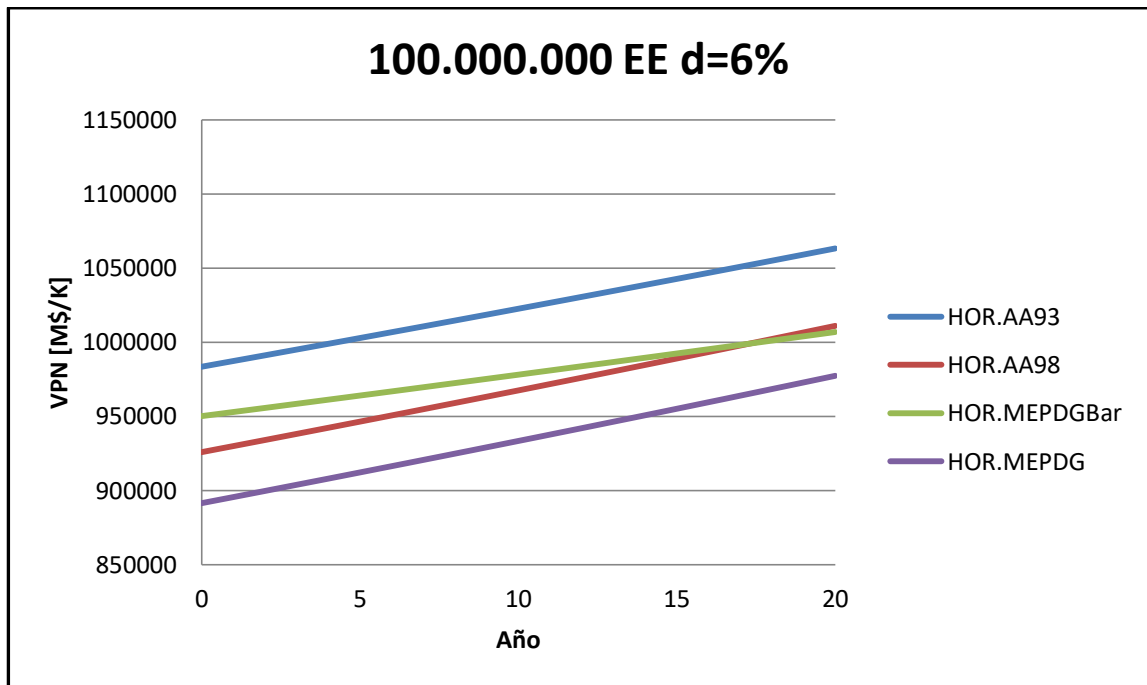


Gráfico 7-15 ACCV para 100.000.000 EE y Tasa de Descuento Real del 6%

De acuerdo al Gráfico 7-13, obtenemos que la curva obtenida para los diseños por MEDPG considerando un cepillado, sea casi idéntica a la obtenida por los diseños AASHTO 98.

En el Gráfico 7-14, se puede concluir que la realización de cepillados en los pavimentos de 30.000.000 E.E. diseñados por MEPDG resulta muy poco incidente en la curva obtenida del ACCV. Pudiendo incluso a largo plazo resultar altamente competitivo con los diseños de lasas cortas.

Al igual que el Gráfico 7-14, en el Gráfico 7-15, el diseño de una carretera de muy alto tránsito es conveniente de realizar por el método MEPDG considerando la realización de cepillados.

7.2.2 Valor Presente Neto con Tasa de Descuento Real variable

A manera de ejemplo en los Gráficos 7-16 al 7-18, se muestran los efectos de utilizar diversas tasas de descuento real, con objeto de comprender la importancia de seleccionar correctamente la respectiva tasa de descuento. Los gráficos están referidos solamente para bajo tránsito.

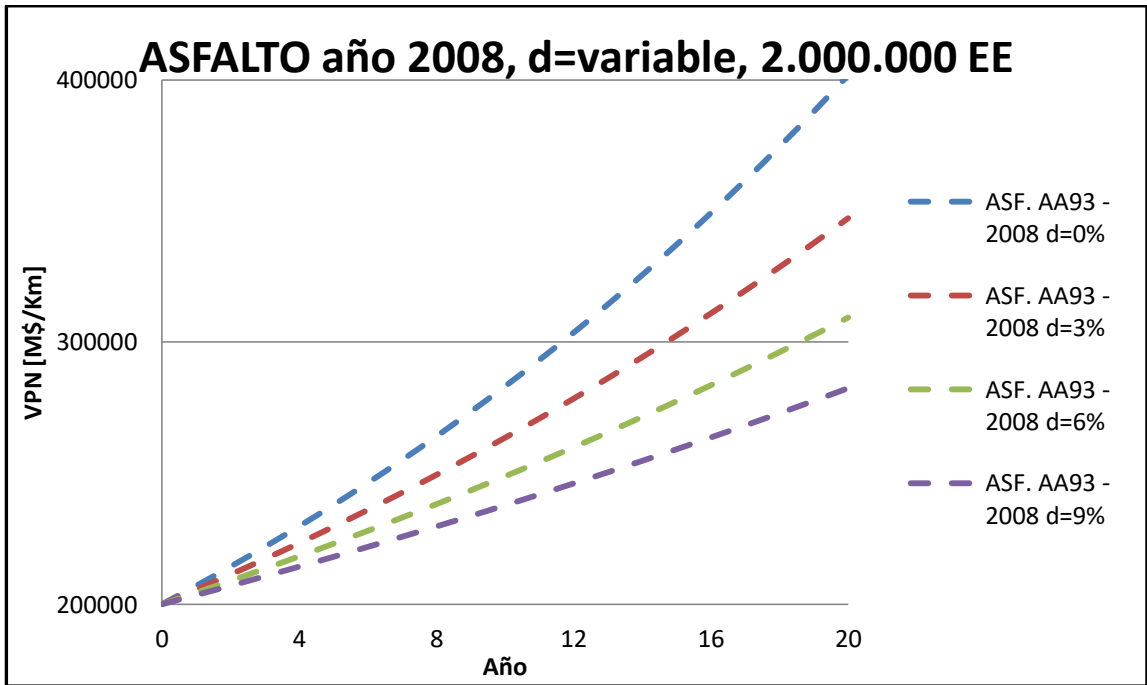


Gráfico 7-16 Efecto de la Tasa de Descuento Real sobre el Pavimento Asfáltico en bajo Tránsito

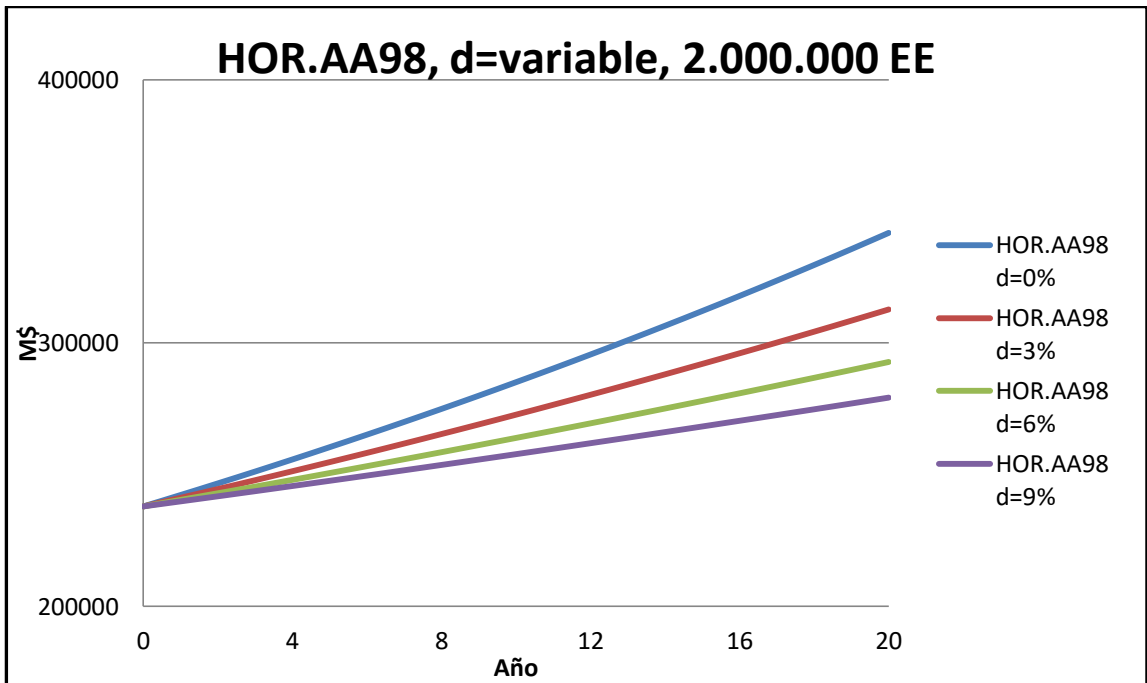


Gráfico 7-17 Efecto de la Tasa de Descuento Real sobre el Pavimento de Hormigón Tradicional en bajo Tránsito

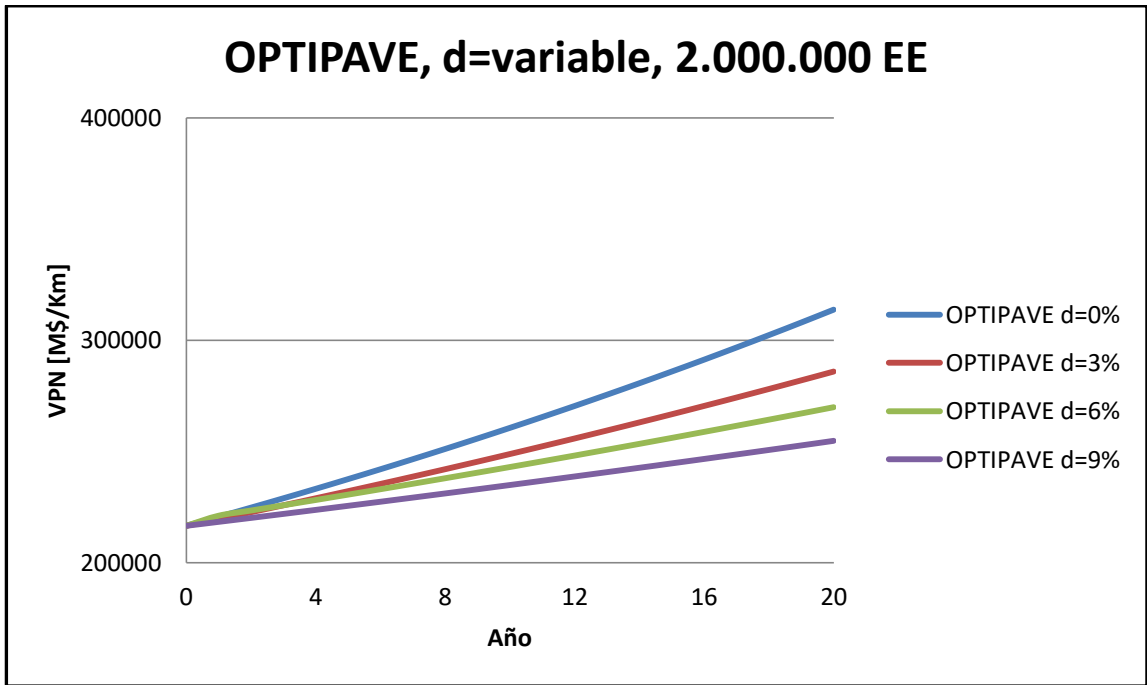


Gráfico 7-18 Efecto de la Tasa de Descuento Real sobre el Pavimento de Losas Cortas en bajo Tránsito

Al observar el efecto de la tasa de descuento real, aquellos pavimentos cuyo método de diseño genere pocas intervenciones de conservación, les afecta muy poco la variación de la tasa de descuento. Sin embargo, a los pavimentos asfálticos les resultan mucho más beneficiosas las tasas de descuento altas, de tal forma de poder mantenerse más cerca de su costo inicial más bajo. Ya que tasas bajas, le manifiestan mucha importancia al costo de las conservaciones.

En los Gráficos 7-19 al 7-21, se entregan según la tasa de descuento y el nivel de tránsito, el VPN total que presentan los métodos de diseño al cabo de los 20 años. Los Gráficos 7-20 y 7-21, traen como diseño MEPDG a los obtenidos al realizar los diseños considerando la falla por escalonamiento e IRI, al año 20.

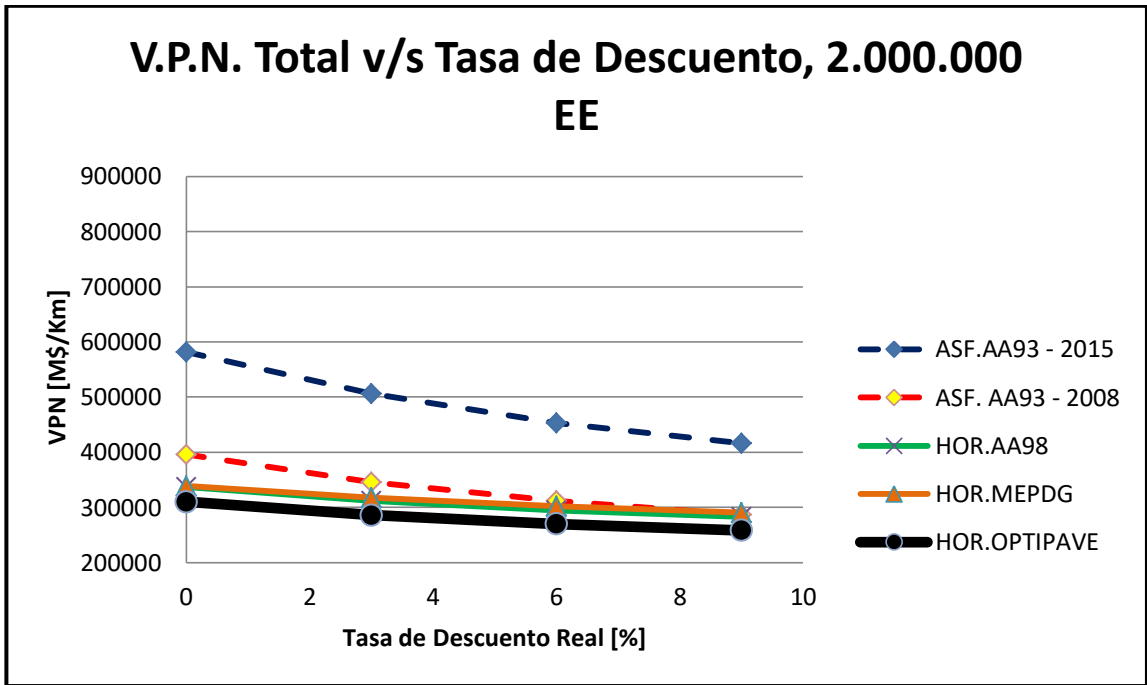


Gráfico 7-19 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 2.000.000 EE

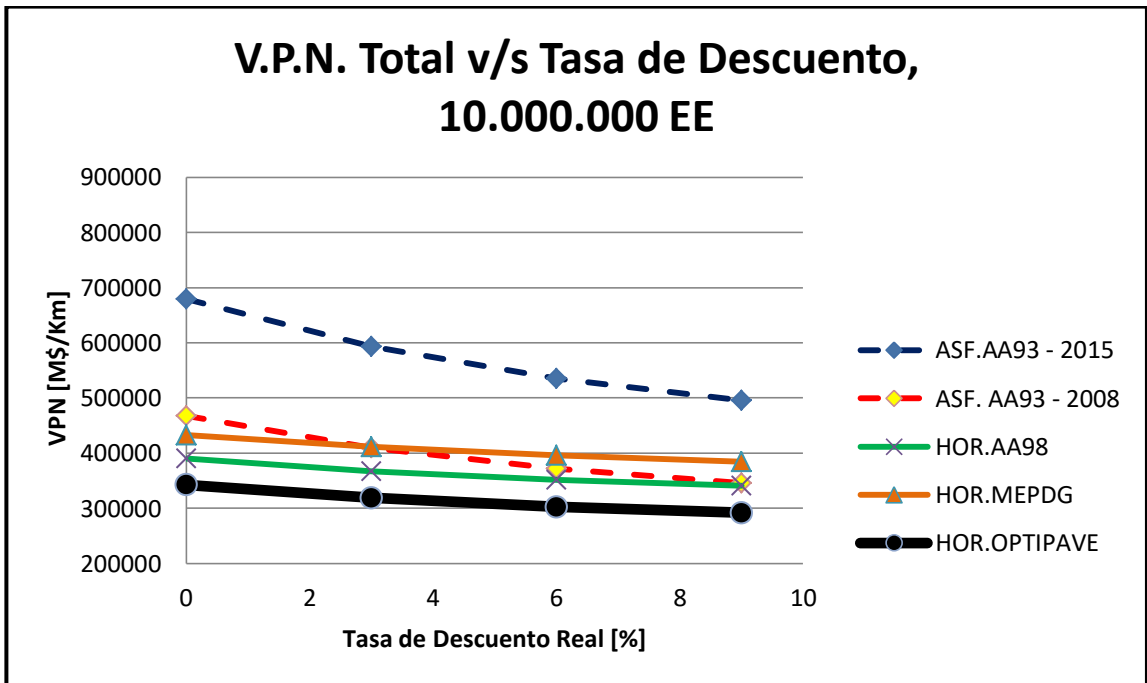


Gráfico 7-20 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 10.000.000 EE

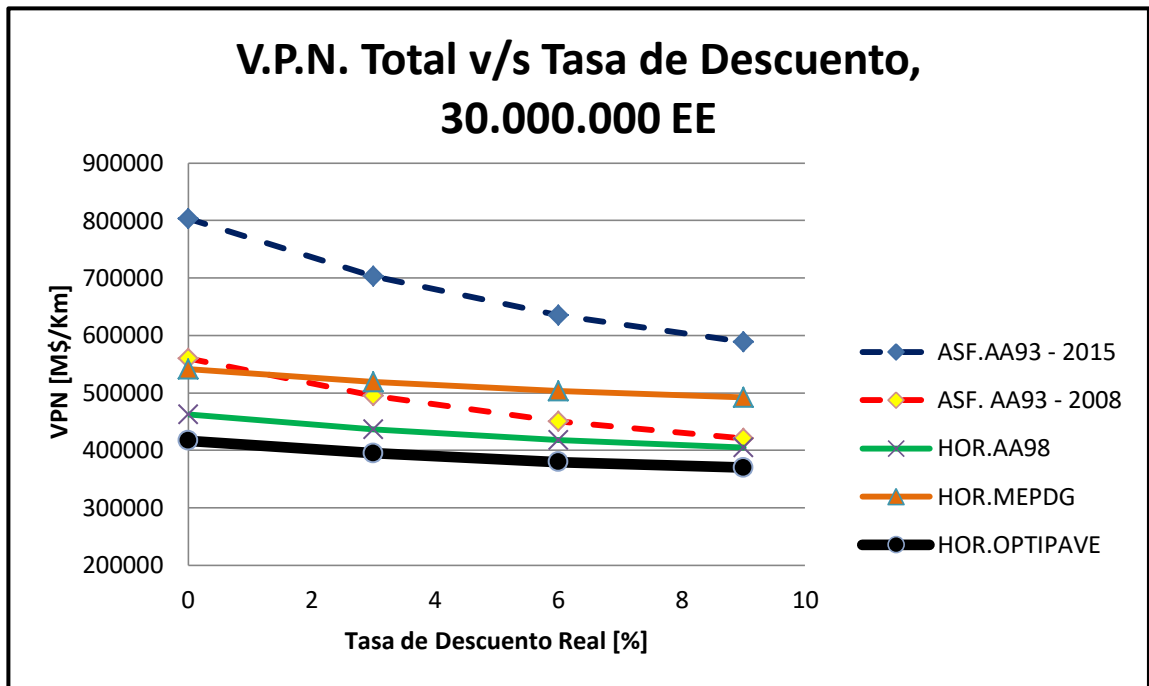


Gráfico 7-21 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 30.000.000 EE

Independiente de la tasa de descuento real utilizada, siempre OPTIPAVE resulta ser la alternativa más conveniente, y como ya se ha mencionado anteriormente esto parte desde su costo inicial. Sin embargo, se vuelve a reiterar que el método utilizado subestima el costo del ciclo de vida de los pavimentos de losas cortas, ya que la mayor cantidad de juntas requerirá de mayores costos de mantención, diferencia que no fue considerada en el análisis. Luego, la utilización de pavimentos de hormigón tradicional a largo plazo resulta siempre más beneficiosa que la implementación de pavimentos flexibles, aunque se utilicen tasas de descuento altas.

Solamente para tasas de descuentos muy altas es conveniente la pavimentación de carreteras de muy alto tránsito sin la utilización de dovelas.

Si se considera necesario, en los Anexos se entregan los resultados de los Gráficos 7-19 al 7-21 discretizando los efectos de la tasa de descuento real a manera de cómo son mostrados en el apartado 7.2.1.

En lo que respecta a la consideración de cepillados en los diseños de MEPDG, en los Gráficos 7-22 al 7-24, se entregan según la tasa de descuento y el nivel de tránsito, el VPN total que presentan los métodos de diseño al cabo de los 20 años.

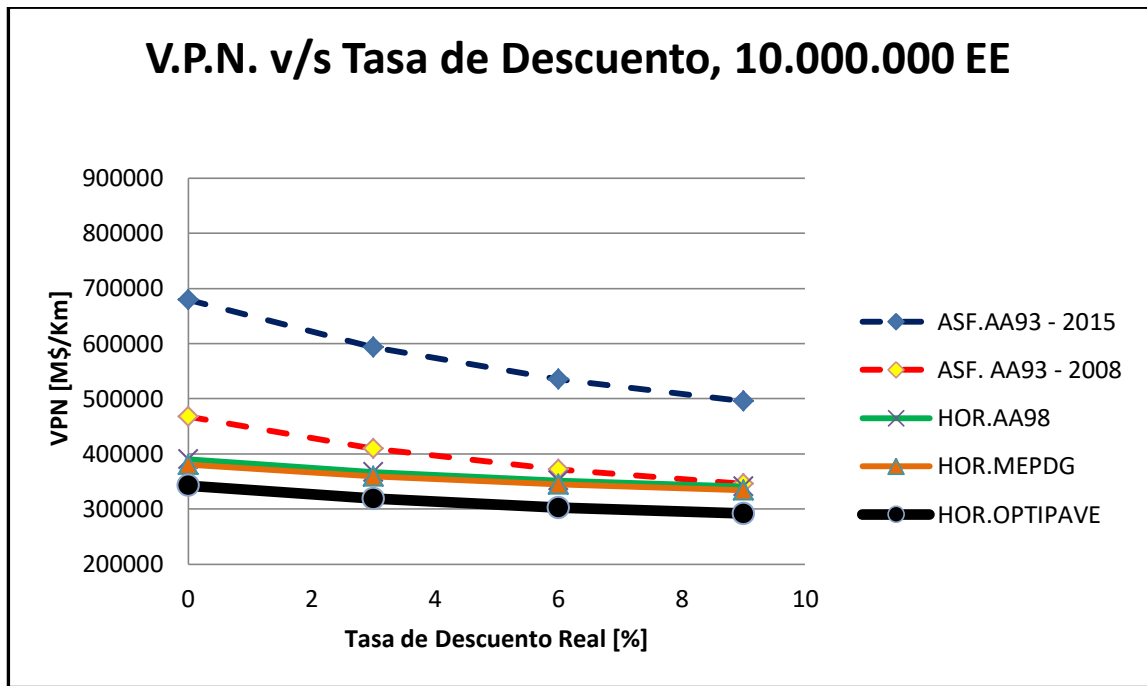


Gráfico 7-22 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 10.000.000 EE, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

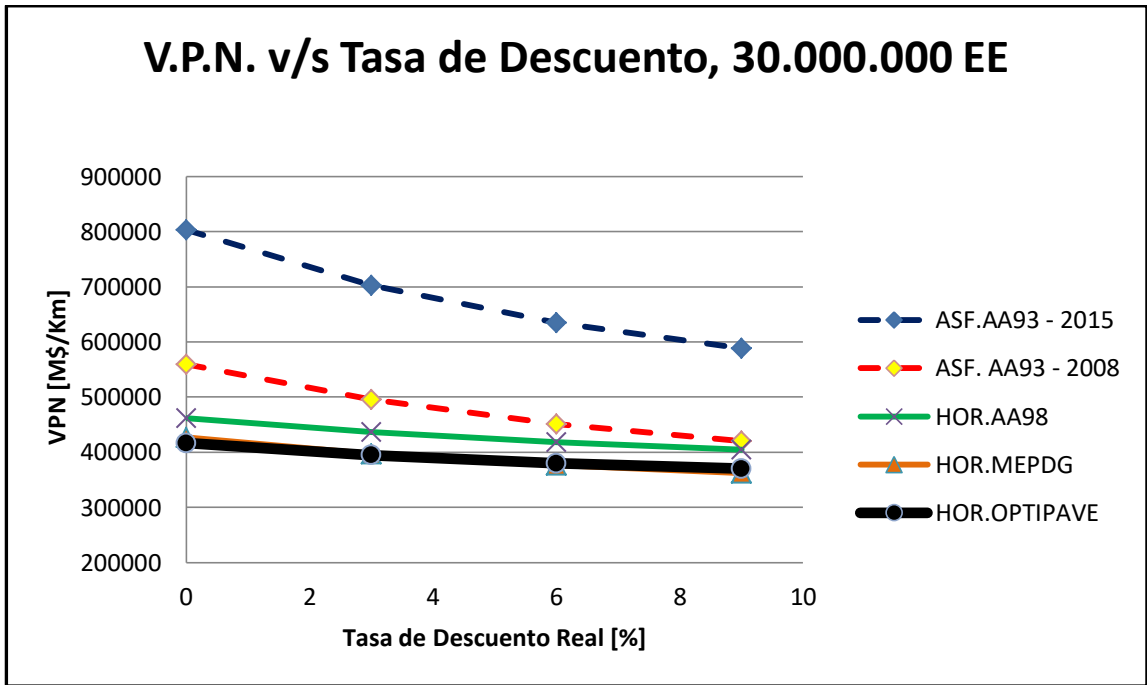


Gráfico 7-23 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 30.000.000 EE, considerando Cepillados en los Diseños por MEPDG

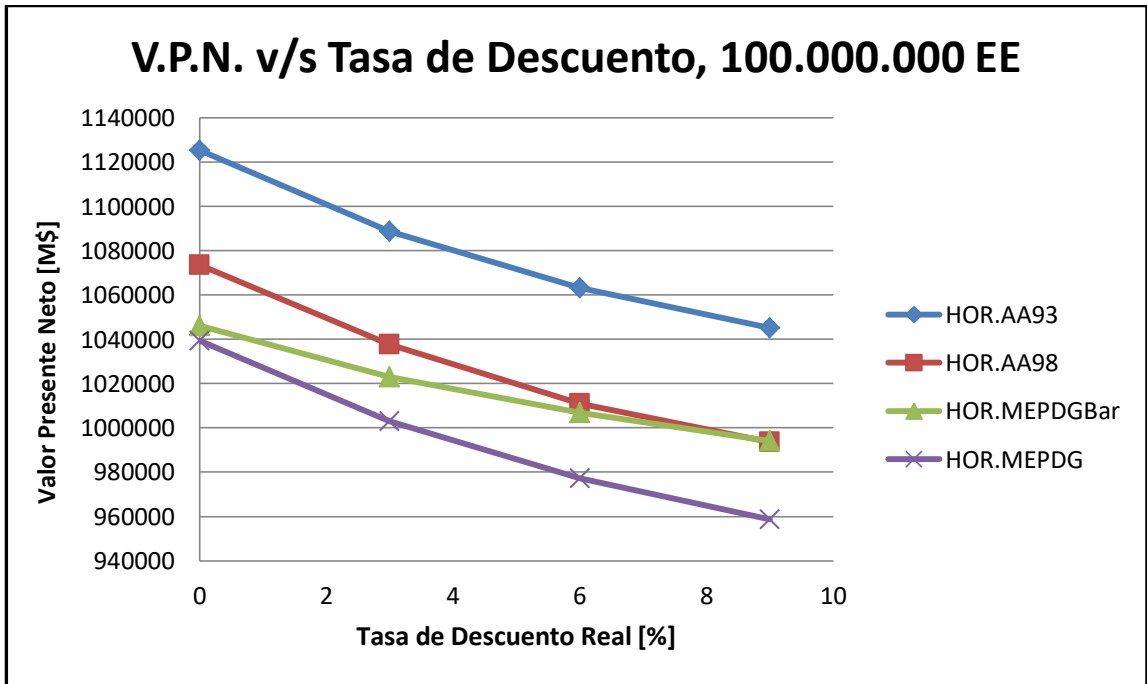


Gráfico 7-24 VPN Total v/s Tasa de Descuento Real para 100.000.000 EE

Finalmente, según los Gráficos 7-22 al 7-24, para cualquier situación de tasa de descuento real, los diseños de MEPDG considerando cepillados resultan ser más económicos que los diseños por AASHTO 98. En el caso de los 30.000.000 E.E., independiente de la tasa de descuento utilizada, el desempeño de MEPDG es casi igual al del diseño de losas cortas.

Para un volumen de tránsito de 100.000.000, los dos mejores desempeños se obtienen para el diseño de MEPDG considerando cepillados y el diseño de MEPDG con barras de transferencias. Por ende, una combinación entre ambos diseños (MEPDG con cepillado al año 10 y con barras de transferencias), resultará en el óptimo desempeño económico y técnico.

8 CONCLUSIONES

El análisis desarrollado en general permitió demostrar la importancia que tienen en la toma las decisiones a largo plazo el evaluar los proyectos de pavimentación con el ACCV dentro del contexto de Chile, basado en lo siguiente:

- ✓ Al comparar los escenarios que se definieron como los casos más representativos de Chile para los ACCV de proyectos de pavimentación considerados en la memoria, los cuales fueron diseñados por distintos métodos de cálculo y materialidad, se encontraron diferencias que justifican el tener en cuenta la toma de decisiones al hacer la valoración del costo en el ciclo de vida.
- ✓ Al verificar las diferencias entre un análisis de costos directos iniciales frente a los costos de ciclo de vida apoyados en evaluaciones hechas en HDM-4 para diversos escenarios se encontraron resultados y valores que justifican y respaldan la importancia de evaluar los proyectos en el largo plazo.
- ✓ Al analizar la sensibilidad de algunos parámetros dentro del marco de las evaluaciones y análisis efectuados, fue posible verificar cuáles de ellos son incidentes y determinantes en la toma de decisiones de diseño, construcción y conservación.
- ✓ A partir de los resultados obtenidos, se identificaron con claridad aquellos aspectos a considerar dada su incidencia en el costo directo y en el del ciclo de vida, de modo de según sea el caso y las circunstancias, se pueda tomar una adecuada decisión sobre la materialidad más conveniente para el pavimento a diseñar y construir.

En base a lo anterior, para la implementación del ACCV para la selección de los pavimentos en Chile, se debe tener presente que este consta de una serie de pasos. En primer lugar es de suma importancia considerar una gran variedad de alternativas de pavimentación, teniendo siempre presente las ventajas y desventajas que presenta cada una de las alternativas.

En los pavimentos asfálticos la gran ventaja que tienen es su bajo costo inicial, sin embargo debido al encarecimiento del precio del petróleo entre los años 2010 hasta el 2015, pasó a ser simplemente un mito que el asfalto sea más barato. De ahí se concluye que el precio del asfalto está íntimamente relacionado a la inestabilidad del precio del petróleo, y sucede que ahora el

precio del petróleo está a la baja, por lo que la utilización de pavimentos flexibles vuelve a ser una alternativa competitiva desde su costo inicial, y por ende se es necesario utilizar el ACCV. Por otra parte, una buena condición del suelo siempre permitirá que la utilización del asfalto sea la alternativa más viable, viéndolo desde el costo inicial, mientras que si el suelo es malo el pavimento asfáltico requiere de grandes capas de mejoramiento del suelo y la utilización de geotextiles, resultando ser una alternativa más costosa que su competencia el pavimento rígido. En conclusión, el pavimento flexible se ve muy afectado tanto por la calidad del suelo como por el nivel de tránsito al que se encuentra sometido.

Si bien es cierto que en el pasado el pavimento de hormigón tradicional era más costoso que su par el pavimento flexible, entre las ventajas que presentaba el pavimento rígido se encontraba su gran durabilidad, ocasionando una disminución de las mantenciones. Pero es interesante observar que con la implementación de MEPDG para los pavimentos de mediano y alto tránsito, los espesores de las losas utilizadas en Chile se encuentran sobredimensionados, ya que la falla que controla el diseño es el escalonamiento junto con el IRI, el agrietamiento es casi nulo. Por ende, se recomienda realizar los diseños considerando la falla por escalonamiento e IRI alrededor del año 10 al 12, para luego realizar el respectivo cepillado, en términos de costos iniciales y costo del ciclo de vida esto resultará en menores costos que los que conlleva el diseño de pavimentos de hormigón con AASHTO 98. Es más se puede llegar a ser altamente competitivo, incluso con los diseños de losas cortas y pavimentos de asfaltos, para volúmenes de tránsito altos.

Es necesario comprender que si no se desea realizar el diseño por MEPDG considerando un cepillado en el pavimento, se debe implementar la utilización de barras de transferencia de carga para controlar el escalonamiento y el IRI, y con ello disminuir hasta donde fuera posible el espesor de la losa. Ocurre que la disminución de los espesores son valores no despreciables, de manera tal que la utilización de las dovelas disminuye el costo inicial de los pavimentos de hormigón. En el caso de un pavimento para bajo tránsito, la falla que controla el diseño es el agrietamiento y la utilización de barras de transferencia, no mejora sustancialmente el desempeño del pavimento.

De los resultados obtenidos se confirma la incidencia del nivel de tránsito en la definición de los espesores de cualquier tipo de estructura. Adicionalmente, el tipo de suelo tiene también una incidencia que particularmente es más notoria en el caso de los pavimentos de asfalto.

Otra diferencia observada, es que en lo que respecta al asfalto y su volatilidad en el precio, el hormigón presenta un precio más estable a lo largo del tiempo, y por ende, es más fácil de predecir su comportamiento en el costo, ya que pareciera que se rige a la par de la inflación.

Aunque los diseños por losas cortas, hace muy poco tiempo se están empezando a implementar, éstos han respondido de buena manera (Ruta Cauquenes – Chanco, Camino Internacional). Al igual que en los pavimentos tradicionales de hormigón, se hace necesaria la utilización de barras de transferencia para los pavimentos sometidos a tránsito alto.

El segundo paso de suma importancia, es la estimación de las medidas de conservación a realizar sobre los respectivos pavimentos. Para ello la implementación de la herramienta HDM-4 es de vital importancia. Sin embargo, se es necesario afinar considerablemente los datos de entrada a utilizar en el programa, entre los que se pueden nombrar: Una cantidad incierta de los precios sociales a utilizar en el software no se encuentran disponibles, la serie de calibración utilizada por el Departamento de Gestión Vial no permite modelar correctamente el desempeño de los pavimentos diseñados, etc. Mientras más y mejores sean los datos ingresados, mejores también serán los resultados entregados por HDM-4 y con mayor exactitud la estimación de las medidas correctivas sobre el pavimento.

En lo que respecta a los pavimentos asfálticos, se llega a la conclusión que los modelos de deterioros de HDM-4 no son sensibles al espesor de la capa asfáltica, sino que la sensibilidad se encuentra relacionada al respectivo Número Estructural total que tenga pavimento. Por ello, aunque los diseños por AASHTO 93 se hubiesen realizado haciendo uso de la verificación por capas, el resultado final del momento a realizar las conservaciones sería indistinto al que se obtuvo en el presente estudio.

Por otra parte, a través de HDM-4 se puede decir que aproximadamente entre los 8 a 10 años de construido un pavimento asfáltico, ya se es necesario realizar un fresado y recapado, porque la estructura presenta sobre un 25% del área del pavimento dañado y al cabo de 2 años más el área dañada será de sobre un 50%. Por otra parte, los pavimentos tradicionales de hormigón diseñados por el método AASHTO 93 o 98 para bajo tránsito, necesitan que se reemplacen las losas por tener más de un 30% de las losas agrietadas al cabo de los 20 años, y para mediano y alto tránsito solamente se necesita un cepillado entorno a los 15 años.

El tercer y último paso, es la estimación del VPN. Primordialmente se ve afectado por la tasa de descuento real, en el que tasas altas favorecen a las alternativas que tengan bajos costos iniciales y gran cantidad de mantenciones, como lo es el pavimento asfáltico. Tasas bajas favorecen un costo inicial más alto a cambio de pocas medidas de conservación (hormigón tradicional). Por ende, aquí es de suma importancia haber realizado previamente una buena calibración de la herramienta HDM-4, ya que una mala estimación del tiempo a realizar la conservación afecta enormemente en el VPN y si a eso se le agrega una mala elección de la tasa de descuento real, se puede obtener errores garrafales en los resultados del ACCV.

Por último, haciendo caso a la confiabilidad del modelo utilizado en el diseño de pavimento por losas cortas, tanto por costo inicial como por AACV, el diseño de losas cortas resulta ser la alternativa técnico-económica más conveniente. Aunque se reitera que el método utilizado subestima el costo del ciclo de vida de los pavimentos de losas cortas, ya que la mayor cantidad de juntas requerirá de mayores costos de mantención, los que no fueron considerados en el análisis. Por otra parte, aunque el asfalto puede volver a tener un costo inicial más bajo que el hormigón tradicional, según los análisis realizados en el presente estudio, a largo plazo resulta ser una mejor alternativa la implementación de pavimentos de hormigón, ya sea por losas cortas o por diseño tradicional.

Finalmente, de acuerdo a los análisis realizados en los casos evaluados en el presente estudio, se observó que para tránsito medio y alto, resulta más conveniente inclinarse por utilizar las alternativas de pavimento de hormigón tradicional o de losas cortas. Para el caso de bajos tránsitos, las alternativas de pavimentos de losas cortas y de asfaltos, resultaban más convenientes que los pavimentos de hormigón tradicional.

9 REFERENCIAS

- ACPA. (2012). Análisis del costo del ciclo de vida. *Una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas en pavimentación*. EE.UU.
- ADOCEM. (2013). GUÍA PARA EL DISEÑO DE VÍAS DE ALTO VOLUMEN. *Pavimentos Rígidos*. República Dominicana.
- Coronado Iturbide, J. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Secretaría de Integración Económica Centroamericana.
- de Solminihac, H., Hidalgo, P., Salgado, M., & Valdés, M. (2002). Calibración del modelo de grietas estructurales para pavimentos asfálticos en HDM-4 a las condiciones de Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 17(1), 12-22.
- Departamento de Gestión Vial. (Diciembre 2014). *Red Vial Nacional, Dimensionamiento y Características*. Santiago, Chile.
- Departamento de Obras Civiles, U.T.F.S.M. (23 de Septiembre de 2014). *Guía para la utilización del método AASHTO 2008 para el diseño de pavimentos rígidos en Chile*. Valparaíso, V Región, Chile.
- Dirección de Inversión Pública, Provincia de Buenos Aires. (s.f.). *Guía Sectorial: Pavimentos*. Recuperado el 12 de Febrero de 2016, de Subsecretaría de Finanzas: http://www.ec.gba.gov.ar/sceoci/inversion_publica/Documentos/GUIA%20PAVIMENTOS.pdf
- Dirección de Vialidad. (2014). *Proposiciones de Acciones de Mantenimiento y Estado de la Calzada*. Santiago, Chile.
- Duravía. (s.f.). *Duravía*. Recuperado el 15 de Febrero de 2016, de Coleccionable Duravía V.2: <http://www.duravia.com.pe/wp-content/uploads/COLECCIONABLE-DURAVIA-V.2.pdf>
- Holahan, W. L. (March 14, 2007). *Addendum to Presentation at the 8th Annual Concrete Paving Conference*. University of Wisconsin - Milwaukee.

- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (8 - 12 de Junio de 2015). *Curso Aplicación y Manejo del HDM-4*. Santiago, Chile.
- Kerali, H. (2001). HDM-4 v.1. *Visión General de HDM-4* . Francia.
- MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL. (Marzo de 2015). *Precios Sociales Vigentes 2015*. Santiago, Chile.
- MINVU. (2008). *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*. Santiago, Chile.
- MOP. (2014). Manual de Carreteras, Volumen 3. *Instrucciones y Criterios de Diseño*. Gobierno de Chile.
- MOP. (2014). Manual de Carreteras, Volumen 7, Mantenimiento Vial. *Anexo: "Catálogo de deterioros"*. Gobierno de Chile.
- Morosiuk, G., Riley, M., & Odoki, J. (2004). *Modelling Road Deterioration and Works Effects* (Vol. 6). HDM-4 version 2.
- Rodríguez Moreno, M., Theboux Zeballos, G., & González Vaccarezza, A. (Noviembre de 2013). *Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile*. Recuperado el 01 de Febrero de 2016, de SciELO: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000200012&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- SERVIU. (s.f.). *SECCIÓN 2 Preparación de la Subrasante*. Santiago, Chile.
- SERVIU. (2008). *Valores Referenciales para Obras Nuevas*. Valparaíso, V Región, Chile.
- SERVIU. (2015). *Listado de Valores Referenciales de Costos de Construcción para los Programas Pavimentación y Espacios Públicos*. Valparaíso, V Región, Chile.
- SERVIU Metropolitano. (05 de Junio de 2001). *Diseño Estructural de Pavimentos*. Santiago, Chile.
- TCPavements. (s.f.). *TCPavements - Innovación en Pavimentos*. Recuperado el 8 de Febrero de 2016, de <http://www.tcpavements.com/index.php?lang=es>

ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS DE LOS AJUSTES DE LAS CURVAS DE DETERIORO EN HDM-4

A.1 Ajuste de los pavimentos asfálticos

Debido a que el diseño de los pavimentos asfálticos es netamente empírico, el ajuste de los deterioros se debió realizar a través de los hechos conocidos en lo que respecta al desempeño de los pavimentos flexibles y se consultó a la literatura especializada en relación al tema. Por ello, en la Figura A-1 se muestra el resultado de calibraciones realizadas a los pavimentos asfálticos, en estudios anteriores.

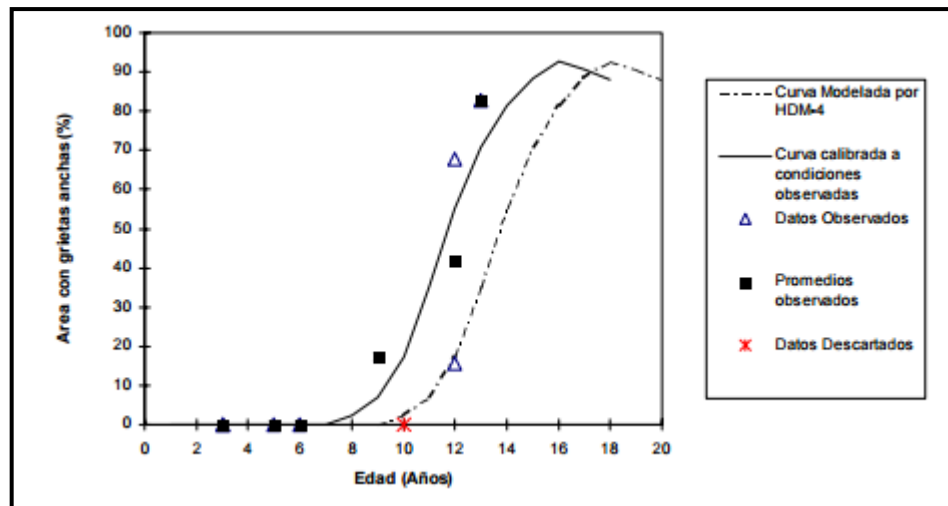


Figura A-1 Curva predicha por el modelo HDM-4 vs. Curva calibrada a condiciones reales observadas
Fuente: Calibración del modelo de grietas estructurales para pavimentos asfálticos en HDM-4 a las condiciones de Chile (de Solminihac, Hidalgo, Salgado, & Valdés, 2002)

En base a las calibraciones previas, se optó por modificar la serie de calibración utilizada por el Departamento de Gestión Vial, hasta imitar la calibración entregada en la Figura A-1. En el Gráfico A-1 y A-2 se muestran las curvas de deterioros tipo obtenidas para los pavimentos asfálticos, de acuerdo a la serie de calibración usada en la presente memoria. Se entrega a la vez, el resultado de utilizar la serie de calibración del Departamento de Gestión Vial y en la Tabla A-1 se entrega esta serie.

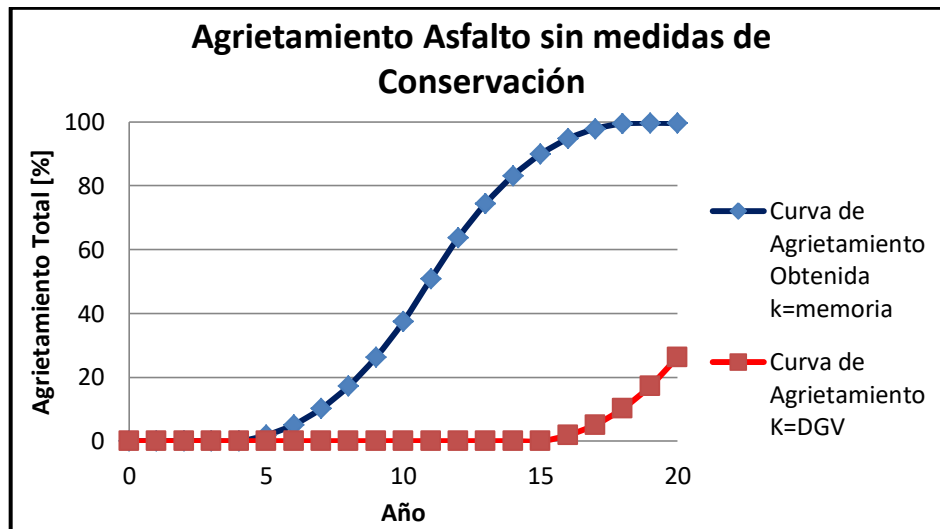


Gráfico A-1 Agrietamiento del asfalto predicho por HDM-4

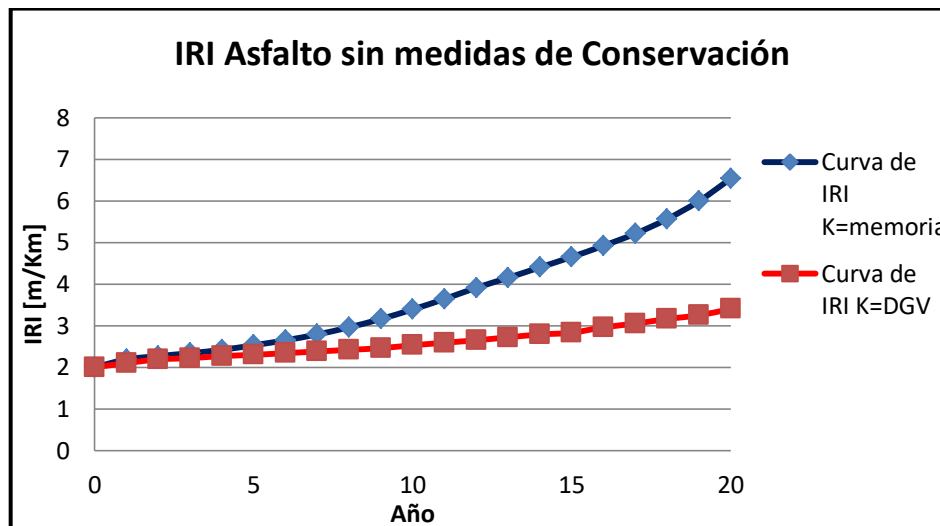


Gráfico A-2 IRI del asfalto predicho por HDM-4

Tabla A-1 Serie de calibración pavimentos de asfalto
Fuente: Departamento de Gestión Vial

Juego de calibración RD		Tipo de pavimento										Material superficial		CDS	CDB	CRT
Asfalto Centro		Mezcla asfáltica sobre base granular										Concreto asfáltico		1.00	0.00	0.00
Doble Tratamiento Centro		Tratamiento superficial sobre base granular										Doble riego de sello		1.00	0.00	0.00

RRF	Kcia	Kcpa	Kciw	Kcpw	Kcit	Kcpt	Kvi	Kvp	Kpic	Kpir	Kpp	Keb	Ktd	Ksfc	Ksfcs	Krid	Krst	Krpd
1.00	1.98	0.18	1.23	0.53	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.87	1.45
1.00	1.18	0.28	1.00	0.60	1.00	1.00	0.68	2.10	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	1.22	1.00

Kdrain	Ksnpk	Krsw	Krds	Kf	Kgm	Kgs	Kgc	Kgr	Kgp	Vehículos que utilizan llantas con aditamentos (%)	¿Se utiliza sal en la carretera?	Kddf
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	0.60	1.66	1.08	0.57	0.00	No	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	1.00	1.00	0.67	0.55	0.00	No	1.00

Numero de acotamientos	ESTEP (mm)	Tipo de carril TNM
2	0.00	Asfáltica
2	0.00	Asfáltica

A.2 Ajuste de los pavimentos de hormigón

Para realizar el ajuste de las curvas de deterioros de los pavimentos de hormigón, se siguió los siguientes pasos:

- a. Tomar los datos deterioros obtenidos de cada uno de los diseños obtenidos, tanto MEPDG (sin fallas en 20 años) y OPTIPAVE. Se tomó un valor de deterioro por año, debido a que HDM-4 realiza sus iteraciones por períodos de tiempo de mínimo un año. Por ende, se seleccionó el dato del deterioro (MEPDG o OPTIPAVE) obtenido al final de cada año.
- b. Para poder hacer un ajuste más preciso se tomó la decisión de utilizar un solo tipo de camión que circula por la vía, cuyo TMDA sea el utilizado en los diseños de MEPDG y OPTIPAVE, y tasa de crecimiento sea lo más semejante a ambos diseños. Para poder hacer semejante la cantidad de ejes equivalentes por cada año, en HDM-4, se buscó un factor de equivalencia de carga del camión de tal manera que los ejes equivalentes totales y por año, sean muy semejante a los obtenidos en MEPDG.
- c. Se ingresaron en HDM-4, todos los datos de las estructuras obtenidas, según los diseños MEPDG y OPTIPAVE. Luego con el factor de calibración del agrietamiento utilizada por el departamento de gestión vial, se realiza la primera iteración para observar los

resultados año a año obtenidos en HDM-4. Estos resultados año a año, son comparados a los resultados año a año seleccionados del respectivo diseño, ya sea MEPDG u OPTIPAVE.

- d. Debido a que el factor de agrietamiento arrojó resultados irreales (80% de agrietamiento al término de los 20 años), se procedió a repetir el “paso c”, hasta encontrar el factor de calibración del agrietamiento cuyos resultados del deterioro, según HDM-4, fuese lo más cercano a los obtenidos por los diseños año a año.
- e. En continuación al paso d, se procedió a ajustar las curvas del escalonamiento. Donde se repitió los “pasos c y d”, pero con los datos del escalonamiento de cada una de las estructuras. El procedimiento se efectuó hasta poder hallar el factor de calibración del escalonamiento, cuyos resultados del deterioro, según HDM-4, fuesen lo más cercano a los obtenidos por los diseños (MEPDG u OPTIPAVE) año a año.
- f. Finalmente, como el IRI depende del agrietamiento y del escalonamiento, se procedió a ajustar las curvas del IRI. Se repitió los “pasos c y d”, pero con los datos del IRI de cada una de las estructuras. El procedimiento se efectuó hasta poder hallar el factor de calibración del IRI, cuyos resultados del deterioro, según HDM-4, fuesen lo más cercano a los obtenidos por los diseños (MEPDG u OPTIPAVE) año a año.
- g. Por último, los factores de calibración obtenidos para los diseños de MEPDG sin barras y sin fallas durante los 20 años, se extrapolaron a los diseños realizados por AASHTO 93 y 98.

A.2.1 Ajuste de los pavimentos de hormigón tradicional

Para el ajuste de los pavimentos rígidos tradicionales, se utilizó los datos de deterioros proporcionados por el método MEPDG. Luego, para la realización de la primera iteración se empleó la serie de calibración del Departamento de Gestión Vial, que es entregada en la Tabla A-2. Finalmente, se obtiene la serie entregada en la Tabla 5-2 y 5-3.

Tabla A-2 Serie de Calibración Pavimentos de Hormigón
Fuente: Departamento de Gestión Vial

Juego de calibración RD	Tipo de pavimento	Tipo de subrasante	KMOD	Elasticidad del concreto	Módulo de ruptura (Mpa)	Coefficiente de contracción	Expansión térmica (1/°C)
Hormigón	JPCP sin pasajuntas	Fino	54.00	29000	4.50	0.0004	0.00001
Diámetro de pasajuntas (mm)	¿Pasajuntas con protección anti-corrosión?	Tipo de sello en juntas	Acero de refuerzo	Colocación del refuerzo	Tipo de capa de base	¿Capa de base permeable?	Factor de calibración de irregularidad
30.00	no	Asfalto	0.15	Silletas	Granular	Si	0.60
Factor de calibración de escalonamiento	Factor de calibración de despostillamiento	Factor de calibración de agrietamiento	Factor de calibración de grietas deterioradas	Factor de calibración de fallas	Factor de drenaje	Tipo de carril TNM	
0.51	2.59	0.20	1.00	1.00	1.00	Asfáltica	

A.2.1.1 Ajuste para bajo tránsito

En la Figura A-2, se muestran los resultados de la calibración en HDM-4, de los pavimentos rígidos para bajo tránsito.

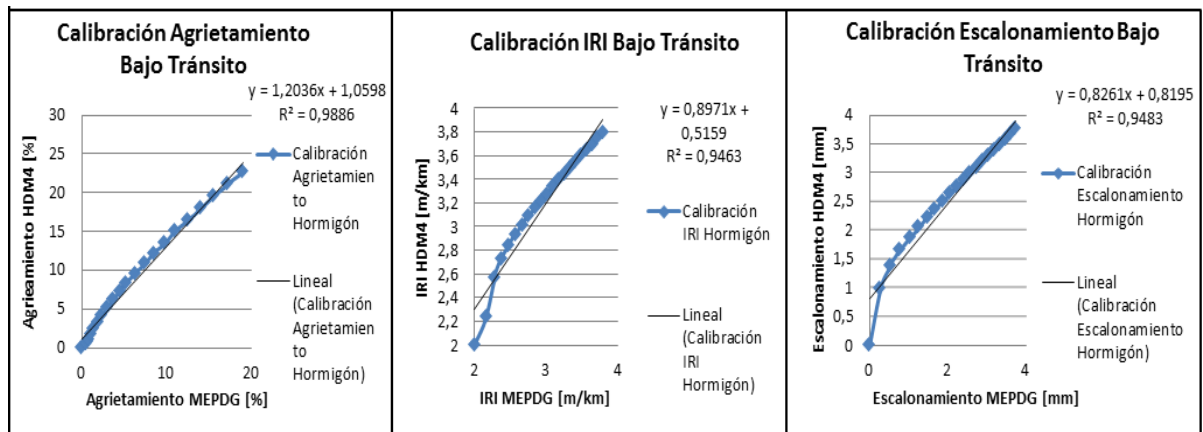


Figura A-2 Deterioros calibrados para bajo tránsito en hormigón tradicional

Por otro lado, en consecuencia a la extrapolación de la calibración para los métodos AASHTO 93 y 98, en la Figura A-3, se entregan las predicciones de deterioro para bajo tránsito.

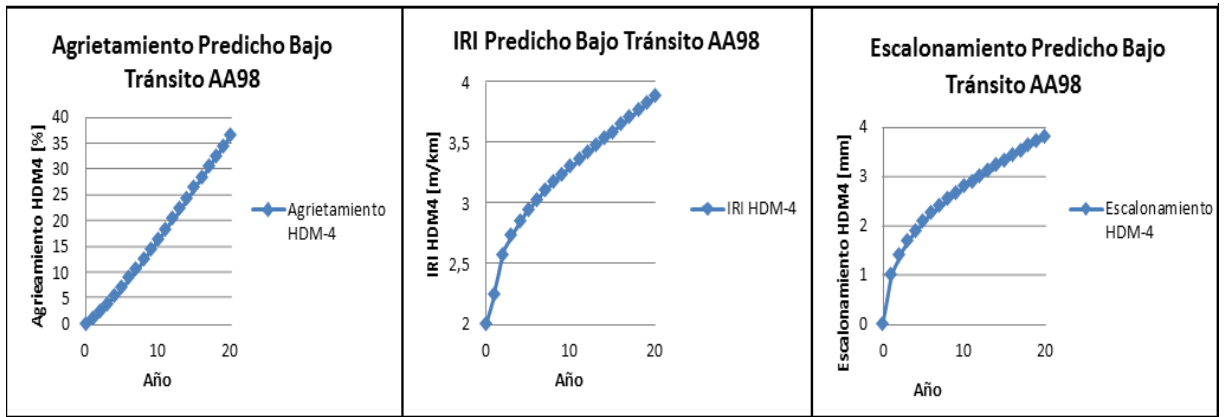


Figura A-3 Deterioros predichos por HDM-4 para AASHTO 98 en bajo tránsito

Al observar la Figura A-2 y A-3, se concluye que el deterioro que controla el diseño de los pavimentos rígidos, para bajo tránsito, es el agrietamiento.

A.2.1.2 Ajuste para mediano hasta muy alto tránsito

A diferencia de lo que sucede en los pavimentos diseñados para bajo tránsito, los pavimentos desde mediano tránsito hacia arriba, no se agrietan. Por ello, en la Figura A-4, solamente como ejemplo son mostradas las calibraciones hechas para el escalonamiento y el IRI, en alto tránsito.

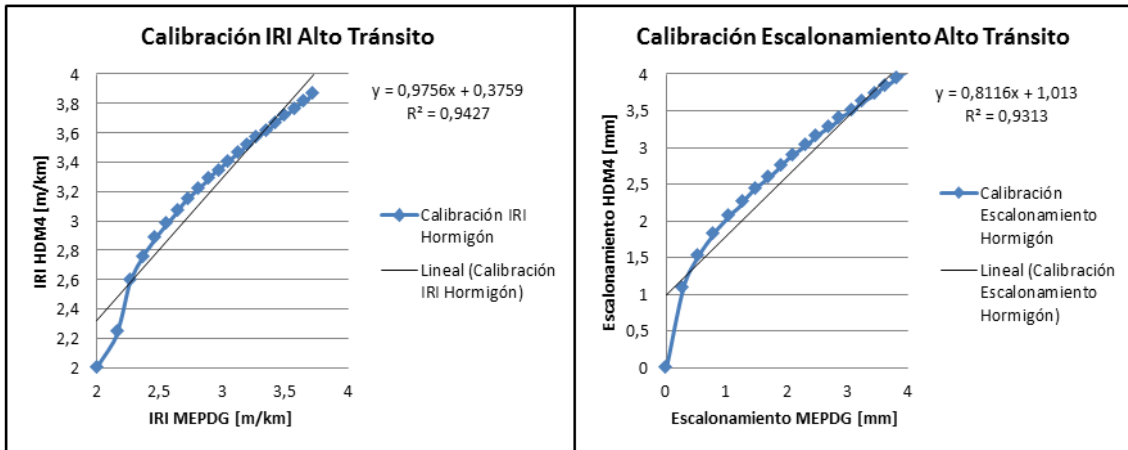


Figura A-4 Deterioros calibrados para alto tránsito en hormigón tradicional

En la Figura A-5, se entrega la predicción realizada por HDM-4 para alto tránsito, para un pavimento diseñado por el método AASHTO 98.

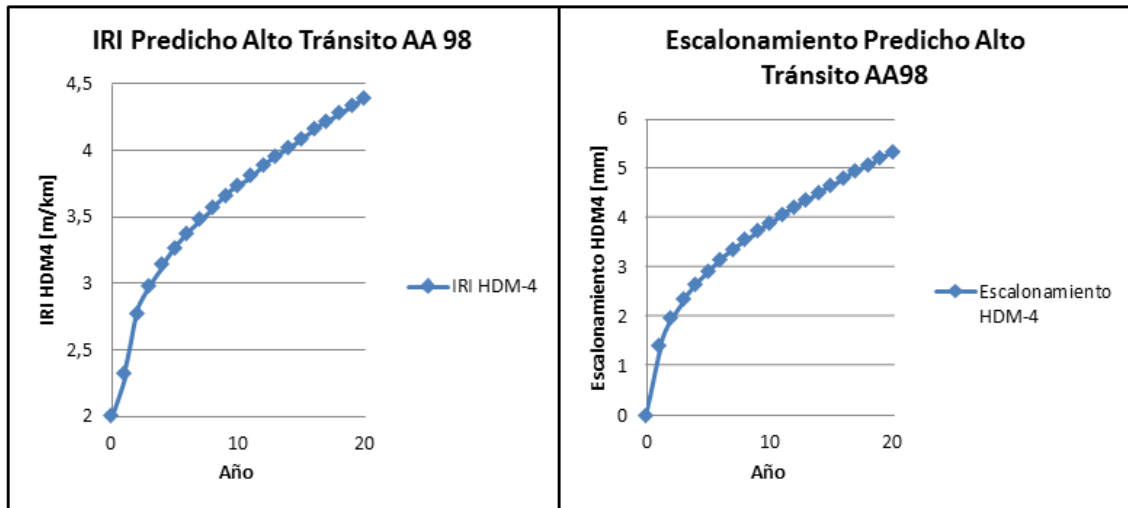


Figura A-5 Deterioros predichos por HDM-4 para AASHTO 98 en alto tránsito

Se observa que los pavimentos de hormigón tradicional para alto tránsito, fallan por escalonamiento y afectando con ello la regularidad del pavimento.

A.2.2 Ajuste de los pavimentos de hormigón tradicional con barras de transferencia

Por comodidad, en la Figura A-6 se presenta el resultado del ajuste para mediano tránsito, ya que el comportamiento de este tipo de pavimento en bajo y alto tránsito, se asemeja al de la respectiva figura. Sin embargo, el agrietamiento para alto tránsito con una losa de 20 [cm] resulta ser entorno al 9%.

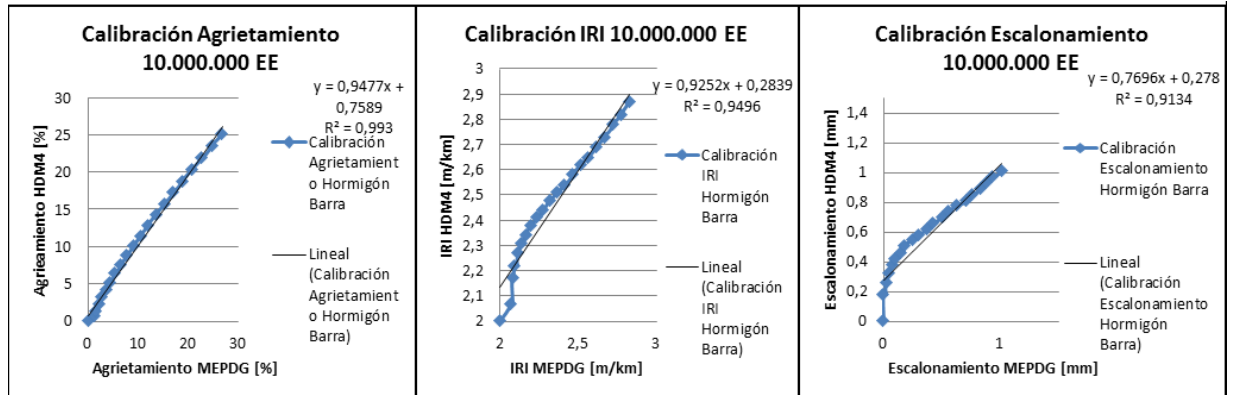


Figura A-6 Deterioros calibrados para mediano tránsito en hormigón tradicional con barras

Por otra parte, la Figura A-7 entrega la calibración obtenida para muy alto tránsito. En esta situación sí se obtiene que el agrietamiento sea nulo, y aunque el IRI y el escalonamiento sean muy pequeños, la falla del pavimento está relacionada con la predicción de la confiabilidad del IRI.

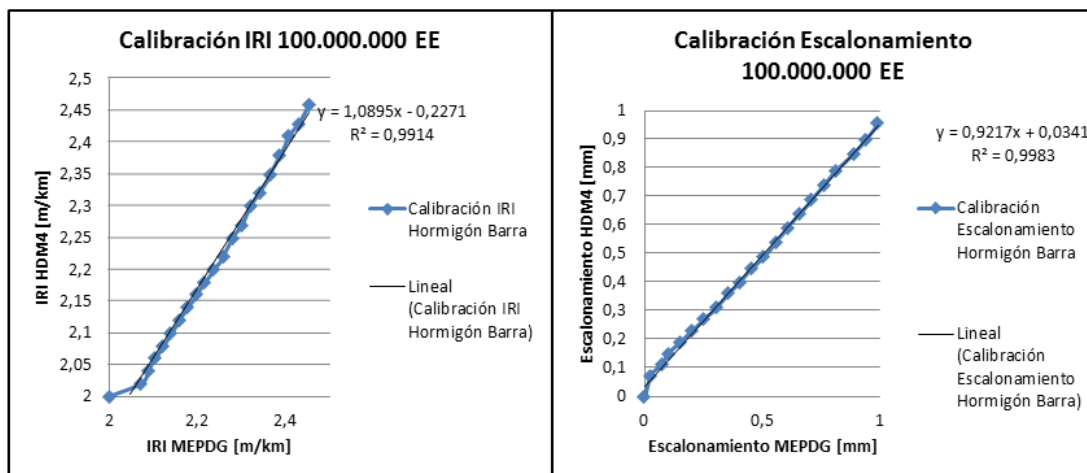


Figura A-7 Deterioros calibrados para muy alto tránsito en hormigón tradicional con barras

A.2.3 Ajuste de los pavimentos de hormigón con losas cortas

Calibración para suelo malo $CBR = 4\%$

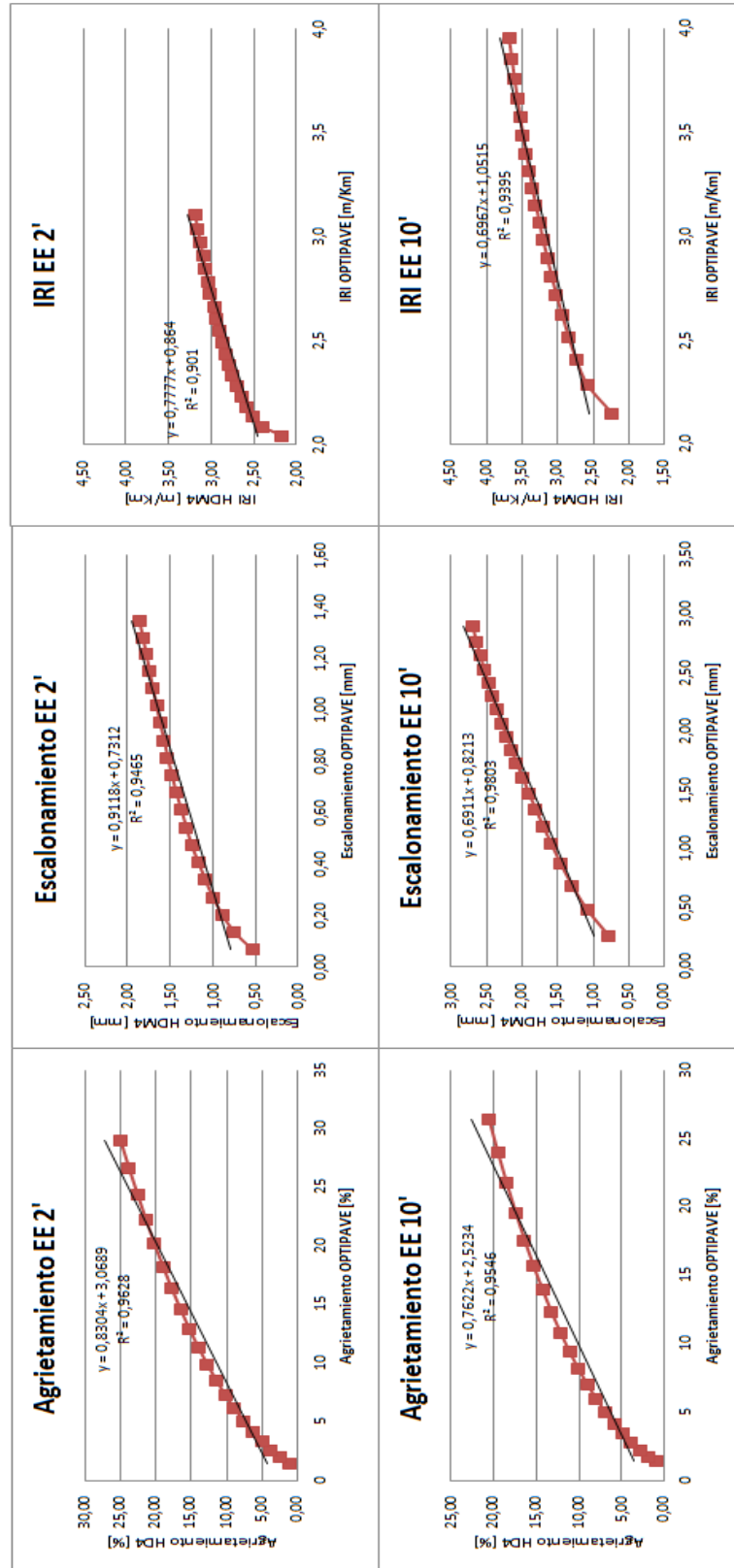


Figura A-8 Deterioros calibrados para suelo malo en hormigón de losas cortas

Calibración para suelo medio CBR= 10%

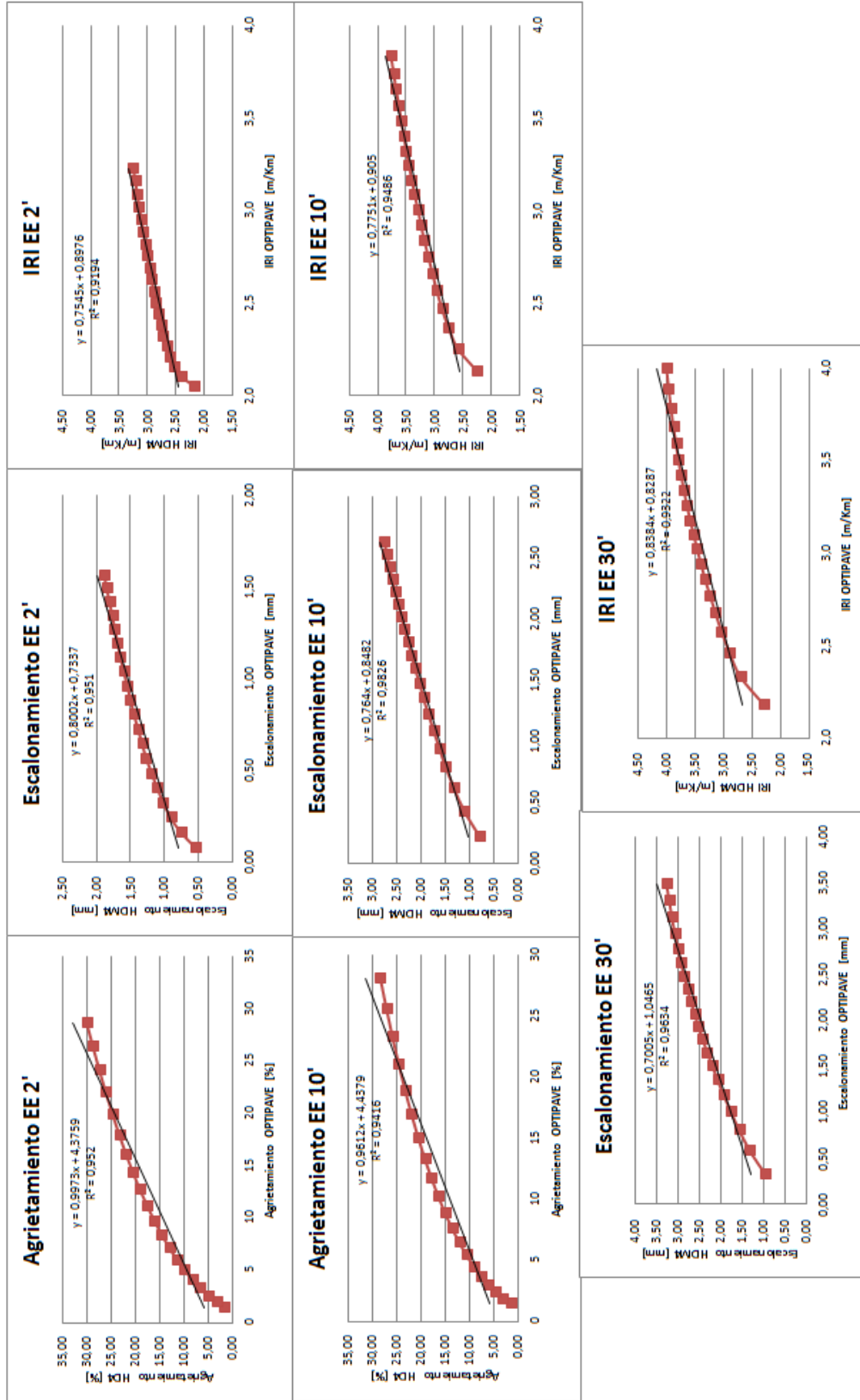


Figura A-9 Deterioros calibrados para suelo medio en hormigón de losas cortas

Calibración para suelo bueno CBR= 20%

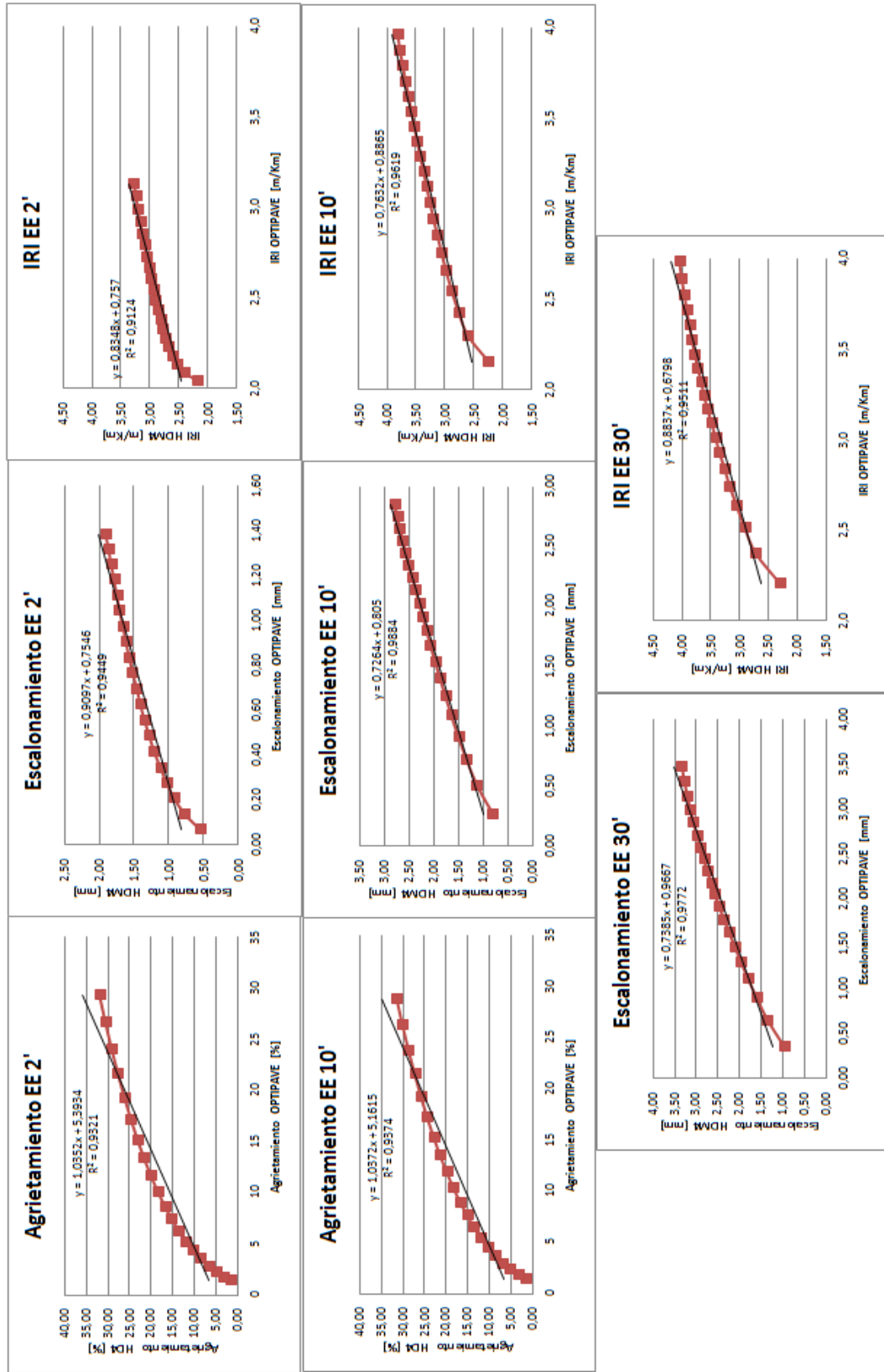


Figura A-10 Deterioros calibrados para suelo bueno en hormigón de losas cortas

Un hecho que es importante de advertir, es que para el caso particular de los pavimentos de losas cortas el programa tiene una restricción en cuanto a la dimensión mínima de las mismas (3 m de longitud). Sin embargo, al hallar la serie de calibración que pudiera modelar correctamente el deterioro del pavimento, la restricción de la dimensión mínima del largo de la losa no representa ninguna incidencia en los resultados obtenidos. El ajuste de las curvas de deterioro, dio origen al set de calibración mostrado en la Tabla 5-6.

ANEXO B: LISTADO DE LOS PRECIOS UNITARIOS REFERENCIALES

Para la utilización del listado de precios referenciales de SERVIU-Valparaíso, se empleó el valor U.F. de 24627.1, correspondiente a la fecha de 1 de Enero de 2015. El precio utilizado en la estimación de los costos para el desarrollo de la memoria, corresponde al promedio unitario en volumen del precio de los materiales.

B.1 Precios referenciales del año 2015

Tabla B-1 Precios referenciales año 2015
Fuente: Listado de Valores Referenciales de Costos de Construcción para los Programas Pavimentación y Espacios Públicos (SERVIU Valparaíso, 2015)

ITEM	PARTIDA	UNIDAD	C.U (UF)	P.U (UF)
1	RELLENOS			
1.1	Relleno Estructural (Incorpora material).	m3	0,5974	0,8886
1.2	Relleno Compactado (Material de obra).	m3	0,2306	0,3430
1.3	Relleno (material de obra y con placa bencinera).	m3	0,2476	0,3683
1.4	Relleno (con placa benc. c/suministro de mat.).	m3	0,5711	0,8495
1.5	Capa maicillo compactado (Suministro y colocación) e= 0,1 .	m2	0,1135	0,1688
2	EXCAVACIONES			
2.1	Excavación y Transporte a botadero.	m3	0,2589	0,3851
2.2	Excavación manual H= 0 -2 m. (Terreno duro y transporte a botadero).	m3	0,7451	1,1083
2.3	Excavación manual H= 2 - 4 m. (Terreno duro y transporte a botadero).	m3	1,2694	1,8882
2.4	Excavación de Zanjas con máquina y transporte a botadero.	m3	0,3769	0,5606
2.5	Excavación de corte común con máquina y transporte a botadero.	m3	0,3366	0,5007
2.6	Excavación con retroexcavadora y agotamiento (incl. transporte a botadero).	m3	0,3877	0,5767
3	PERFILADO DE SUELO			
3.1	Compactación y perfilado suelo natural.	m2	0,0807	0,1200
3.2	Preparación de la subrasante.	m2	0,0534	0,0794
3.3	Emparejamiento de veredones.	m2	0,0804	0,1196
3.4	Preparación de suelo (Hurneo y tierra vegetal + arena de planta h=30cms.	m2	0,5285	0,7861
4	BASE ESTABILIZADA 100% CBR			
4.1	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,10m.	m2	0,0993	0,1477
4.2	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,12m.	m2	0,1235	0,1837
4.3	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,15m.	m2	0,1731	0,2575
4.4	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,18m.	m2	0,2057	0,3060
4.5	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,20m.	m2	0,2288	0,3403
4.6	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,22m.	m2	0,2509	0,3732
4.7	Base Estab. CBR ≥(100%) e= 0,25m.	m2	0,2865	0,4262
4.8	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,28m.	m2	0,3224	0,4796
4.9	Base Estab. CBR ≥(100 %) e= 0,30m.	m2	0,3429	0,5101
5	BASE ESTABILIZADA (60-80)% CBR			
5.1	Base Estab. CBR ≥(60 - 80 %) e= 0,10m.	m2	0,0998	0,1485
5.2	Base Estab. CBR ≥(60 - 80 %) e= 0,12m.	m2	0,1095	0,1629
5.3	Base Estab. CBR ≥(60 - 80 %) e= 0,15m.	m2	0,1475	0,2194
5.4	Base Estab. CBR ≥(60-80 %) e= 0,18m.	m2	0,1787	0,2658
5.5	Base Estab. CBR ≥(60- 80 %) e= 0,20m.	m2	0,2018	0,3002

ÍTEM	PARTIDA	UNIDAD	C.U (UF)	P.U (UF)
5.6	Base Estab. CBR \geq (60-80 %) e= 0,22m.	m2	0,2204	0,3278
5.7	Base Estab. CBR \geq (60-80%) e= 0,25m.	m2	0,2527	0,3759
5.8	Base Estab. CBR \geq (60 - 80 %) e= 0,28m.	m2	0,2820	0,4195
5.9	Base Estab. CBR \geq (60 - 80 %) e= 0,30m.	m2	0,3036	0,4516
5.10	Base Estab. CBR \geq (60 %) Aceras e= 0,05m.	m2	0,0701	0,1043
5.11	Base Estab. CBR \geq (60 %) Zarpas e= 0,15m.	ml	0,0795	0,1183
5.12	Base Tratada con cemento (2 sac. Cem/m3). e=15cms	m3	1,3192	1,9623
6	BASE ESTABILIZADA 40% CBR			
6.1	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,10m.	m2	0,0905	0,1346
6.2	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,12m.	m2	0,1038	0,1544
6.3	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,15m.	m2	0,1424	0,2118
6.4	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,18m.	m2	0,1727	0,2569
6.5	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,20m.	m2	0,1853	0,2771
6.6	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,22m.	m2	0,2054	0,3055
6.7	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,25m.	m2	0,2432	0,3618
6.8	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,28m.	m2	0,2769	0,4119
6.9	Base Estab. CBR \geq (40%) e= 0,30m.	m2	0,2926	0,4352
7	CAPA DE RODADO			
7.1	Carpeta Asfáltica e= 0,04 m.	m2	0,3710	0,5519
7.2	Carpeta Asfáltica e= 0,05 m.	m2	0,4612	0,6860
7.3	Carpeta Asfáltica e= 0,06 m.	m2	0,5513	0,8201
7.4	Carpeta Asfáltica e= 0,07 m.	m2	0,6367	0,9471
7.5	Carpeta Asfáltica e= 0,08 m.	m2	0,7301	1,0860
7.6	Carpeta Asfáltica e= 0,09 m.	m2	0,8167	1,2148
7.7	Imprimación Asfáltica.	m2	0,0388	0,0577
7.8	Calzada H.C.V. e= 0,12 m.	m2	0,5668	0,8431
7.9	Calzada H.C.V. e= 0,15 m.	m2	0,6588	0,9800
7.10	Calzada H.C.V. e= 0,18 m.	m2	0,7463	1,1101
7.11	Calzada H.C.V. e= 0,20 m.	m2	0,8021	1,1931
7.12	Calzada H.C.V. e= 0,22 m.	m2	0,8576	1,2757
7.13	Calzada H.C.V. e= 0,25 m.	m2	0,9409	1,3996
7.14	Calzada H.C.V. e= 0,28 m.	m2	1,0249	1,5245
7.15	Badén HCV 1,00 x 0,15 m.	ml	0,6590	0,9803
7.16	Corte de Pavimento (prof. = 5 cms).	ml	0,0363	0,0540
7.17	Viga fin de pavimento (0,15 X 0,40).	ml	0,3246	0,4828
7.18	Viga fin de pavimento (0,30 X 0,50).	ml	0,5976	0,8889
7.19	Suministro y colocación de geogrilla.	m2	0,0664	0,0988
7.20	Zarpa HC 0,15 x 0,5 m.	ml	0,4037	0,6005
7.21	Sello de Juntas.	ml	0,0737	0,1096
7.22	Riego de liga.	m2	0,0388	0,0577
7.23	Pavimento HCV estriado e=15 cms.	m2	0,7072	1,0520

Por criterio, ya que no se entrega el precio unitario del kilogramo de acero, se tomó como valor coherente un precio de 1100 pesos el kilogramo de acero.

Por otra parte, el precio de la carpeta Binder, se estimó como 8/9 del precio de una carpeta asfáltica. A la vez, el precio de una base asfáltica se evaluó como 2/3 del precio de la carpeta asfáltica. Las consideraciones anteriormente descritas, se determinaron luego de consultar diversas estimaciones hechas a casos reales de pavimentación.

B.2 Precios referenciales del año 2008

Tabla B-2 Precios referenciales año 2008
Fuente: Valores Referenciales para Obras Nuevas (SERVIU Valparaíso, 2008)

LISTADO DE PRECIOS				
VALORES REFERENCIALES PARA OBRAS NUEVAS				
OBRAS DE PAVIMENTACIÓN Y OBRAS ANEXAS				
1. INICIO DE FAENAS				
1.1	Instalación de faenas: oficinas, bodegas, galpones, instalaciones provisionales, permisos, varios			4,20 %
1.2	Señalizaciones provisionales			1,00 %
1.3	Estudios de ingeniería			2,54 %
1.4	Movilización de la I.T.O.			1,50 %
1.5	Asesoría de inspección			5,00 %
1.6	Laboratorio de control técnico			2,00 %
2. MOVIMIENTO DE TIERRAS				
ÍTEM	DESIGNACIÓN	UN.	COSTO DIRECTO	PRECIO UNITARIO
			UF.	UF.
2.1	Compactación y perfilado suelo natural	m2	0,073	0,109
2.2	Emparejamiento de veredones en tierra	m2	0,042	0,062
2.3	Preparación de la subrasante	m2	0,036	0,054
2.4 EXCAVACIONES				
2.4.1	Excavación de corte común con máquina	m3	0,150	0,223
2.4.2	Excavación de zanjas con máquina	m3	0,163	0,242
2.4.3	Excavación manual H= 0 - 2 m. (terreno duro)	m3	0,245	0,364
2.4.4	Excavación manual H= 2 - 4 m. (terreno duro)	m3	0,375	0,558
2.4.5	Excavación manual con agotamiento	m3	0,462	0,687
2.4.6	Excavación con retroexcavadora y agotamiento	m3	0,189	0,281
2.4.7	Excavación en roca sin explosivo (0 - 2 m.)	m3	1,301	1,935
2.4.8	Excavación en roca sin explosivo (2 - 4 m.)	m3	1,952	2,904
2.4.9	Excavación y transporte a botadero (15 kms.)	m3	0,187	0,278

ÍTEM	DESIGNACIÓN	UN.	COSTO DIRECTO	PRECIO UNITARIO
2.5	RELLENO CON SUMINISTRO DE MATERIAL SELECCIONADO			
2.5.1	Relleno estructural	m3	0,355	0,528
2.5.2	Relleno con placa bencinera 60 kg.	m3	0,317	0,472
2.6	RELLENO CON MATERIAL DE OBRA			
2.6.1	Rellenos Compactados	m3	0,172	0,256
2.6.2	Relleno con placa bencinera 60 kg	m3	0,196	0,292
3.	<u>BASES Y SUB-BASES</u>			
3.1	BASES			
3.1.1	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,10 m	m2	0,083	0,123
3.1.2	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,12 m	m2	0,099	0,147
3.1.3	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,15 m	m2	0,122	0,181
3.1.4	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,18 m	m2	0,145	0,216
3.1.5	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,20 m	m2	0,160	0,238
3.1.6	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,22 m	m2	0,182	0,271
3.1.7	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,25 m	m2	0,205	0,305
3.1.8	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,28 m	m2	0,229	0,341
3.1.9	Base estabilizada CBR \geq (60-80%) e= 0,30 m	m2	0,244	0,363
3.1.10	Base estabilizada CBR \geq 60% Aceras e= 0,05 m	m2	0,042	0,062
3.1.11	Base estabilizada CBR \geq 60% Zarpas e= 0,15 m	ml	0,065	0,097
3.1.12	Base tratada con cemento (2 sac.cem./m3) e= 0,15 m	m2	0,185	0,275
3.2	SUB-BASES			
3.2.1	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,10 m	m2	0,077	0,115
3.2.2	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,12 m	m2	0,091	0,135
3.2.3	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,15 m	m2	0,113	0,168
3.2.4	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,18 m	m2	0,134	0,199
3.2.5	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,20 m	m2	0,148	0,220
3.2.6	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,22 m	m2	0,168	0,250
3.2.7	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,25 m	m2	0,190	0,283
3.2.8	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,28 m	m2	0,212	0,315
3.2.9	Base estabilizada CBR \geq 40% e= 0,30 m	m2	0,226	0,336



ÍTEM	DESIGNACIÓN	UN.	COSTO DIRECTO	PRECIO UNITARIO
4.	<u>OBRAS DE PAVIMENTACIÓN</u>			
4.1	CAPA DE RODADO			
4.1.1	Carpeta asfáltica e= 0,04 m	m2	0,185	0,275
4.1.2	Carpeta asfáltica e= 0,05 m	m2	0,231	0,344
4.1.3	Carpeta asfáltica e= 0,06 m	m2	0,277	0,412
4.1.4	Carpeta asfáltica e= 0,07 m	m2	0,323	0,480
4.1.5	Carpeta asfáltica e= 0,08 m	m2	0,370	0,550
4.1.6	Carpeta asfáltica e= 0,09 m	m2	0,416	0,619
4.1.7	Tratamiento superficial doble	m3	0,159	0,237
4.1.8	Tratamiento superficial doble (con emulsión modificada)	m2	0,183	0,272
4.1.9	Imprimación asfáltica	m2	0,041	0,061
4.1.10	Riego de liga	m2	0,033	0,049
4.1.11	Calzada HCV e= 0,12 m	m2	0,459	0,683
4.1.12	Calzada HCV e= 0,15 m	m2	0,553	0,823
4.1.13	Calzada HCV e= 0,18 m	m2	0,647	0,962
4.1.14	Calzada HCV e= 0,20 m	m2	0,711	1,058
4.1.15	Calzada HCV e= 0,22 m	m2	0,776	1,154
4.1.16	Calzada HCV e= 0,25 m	m2	0,874	1,300
4.1.17	Calzada HCV e= 0,28 m	m2	0,973	1,447
4.1.18	Calzada HCV estriada e= 0,18 m	m2	0,720	1,071
4.1.19	Calzada HCV estriada e= 0,20 m	m2	0,791	1,177
4.1.20	Calzada HCV estriada e= 0,22 m	m2	0,857	1,275
4.1.21	Zarpa HCV 0,50 m x 0,15 m	m1	0,290	0,431
4.1.22	Badén HCV 1,00 m x 0,15 m	m1	0,586	0,872



Al comparar las Tablas B-1 y B-2, se observa que el precio de las bases, subbases y capa de rodado de hormigón, en términos de U.F. no han variado considerablemente. Sin embargo, el precio de las capas asfálticas tiene un crecimiento cercano al 100%. En síntesis, todos los materiales que no se deriven del petróleo, tienen un encarecimiento en su costo relacionado a la inflación, y por ello, no fue necesario utilizar los precios que tenían en el año 2008, ya que el valor de la U.F. lo absorbe.

B.3 Precios unitarios de acciones de conservación no estimadas por los precios referenciales de SERVIU

Como los precios utilizados por SERVIU no permiten estimar la totalidad de las acciones de conservación a las que se someten los pavimentos, en la Tabla B-3 se entregan los precios faltantes, y que son utilizados por la Dirección de Vialidad para la conservación de los pavimentos.

Tabla B-3 Precios unitario de acciones de conservación
Fuente: Evaluación técnico-económica de la red vial pavimentada (Dirección de Vialidad, 2014)

Operación de Conservación	Unidad	Precio Unitario US\$
Conservación Rutinaria	Km/año	4577,18
Cepillado	m ²	6,8
Reposición de drenes	Km/año	29962,12

Debido a que los precios de la Tabla B-3, se encuentran en dólares, se consideró un precio de dólar por peso de 620. Este valor, corresponde aproximadamente al promedio del precio del dólar durante el año 2015.

ANEXO C: PRECIOS INICIALES DE CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS

En la Tabla C-1, se presenta la estimación de los costos para cada alternativa de diseño con suelo de CBR=4% y con MEPDG sin fallas.

Tabla C-1 Costo directo inicial de los pavimentos para suelo malo

Método de Diseño	Precio M\$		
	EE		
	2.000.000	10.000.000	30.000.000
ASF.AA93 - 2015	332730	421739	503184
ASF.MOP -2015	388821	500220	604825
ASF. AA93 - 2008	242640	309876	381147
ASF.MOP - 2008	245011	312865	373924
HOR.AA93	251248	307926	366883
HOR.AA98	244445	310193	359492
HOR.MEPDG	254649	346475	459854
HOR.MEPDG Barra	262916	291794	325311
HOR.OPTIPAVE	238631	276034	
HOR. OPTIPAVE Barra	244230	279365	303175

Por otra parte, en la Tabla C-2, se presenta la estimación de los costos para cada alternativa de diseño con suelo de CBR=10% y con MEPDG sin fallas.

Tabla C-2 Costo directo inicial de los pavimentos para suelo medio

Método de Diseño	Precio M\$		
	EE		
	2.000.000	10.000.000	30.000.000
ASF.AA93 - 2015	292686	375142	446396
ASF.MOP -2015	326387	427836	525887
ASF. AA93 - 2008	202596	263279	324359
ASF.MOP - 2008	204349	262253	316759
HOR.AA93	245579	302257	361214
HOR.AA98	239910	301123	360080
HOR.MEPDG	250114	346475	451918
HOR.MEPDG Barra	258381	290115	315107
HOR.OPTIPAVE	219356	256759	339526
HOR. OPTIPAVE Barra	228357	261225	277098

En consecuencia, en la Tabla C-3, se presenta la estimación de los costos para cada alternativa de diseño con suelo de CBR=20% y con MEPDG sin fallas.

Tabla C-3 Costo directo inicial de los pavimentos para suelo bueno

Método de Diseño	Precio M\$		
	EE		
	2.000.000	10.000.000	30.000.000
ASF.AA93 - 2015	272665	345049	413147
ASF.MOP -2015	265991	372075	466730
ASF. AA93 - 2008	182575	233186	291110
ASF.MOP - 2008	175901	228266	279375
HOR.AA93	235383	294324	356679
HOR.AA98	233116	288655	357813
HOR.MEPDG	241052	336275	440580
HOR.MEPDG Barra	247051	285584	311705
HOR.OPTIPAVE	198956	236355	324787
HOR. OPTIPAVE Barra	214760	246489	263492

En las Tablas C-4 al C-6, se presentan los costos iniciales mostrados en las Tablas C-1 al C-3, pero considerando los respectivos cepillados en el diseño MEPDG.

Tabla C-4 Costo directo inicial de los pavimentos para suelo malo

Método de Diseño	Precio M\$		
	EE		
	2.000.000	10.000.000	30.000.000
ASF.AA93 - 2015	332730	421739	503184
ASF.MOP -2015	388821	500220	604825
ASF. AA93 - 2008	242640	309876	381147
ASF.MOP - 2008	245011	312865	373924
HOR.AA93	251248	307926	366883
HOR.AA98	244445	310193	359492
HOR.MEPDG	254649	304948	309358
HOR.MEPDG Barra	262916	291794	325311
HOR.OPTIPAVE	238631	276034	
HOR. OPTIPAVE Barra	244230	279365	303175

Tabla C-5 Costo directo inicial de los pavimentos para suelo medio

Método de Diseño	Precio M\$		
	EE		
	2.000.000	10.000.000	30.000.000
ASF.AA93 - 2015	292686	375142	446396
ASF.MOP -2015	326387	427836	525887
ASF. AA93 - 2008	202596	263279	324359
ASF.MOP - 2008	204349	262253	316759
HOR.AA93	245579	302257	361214
HOR.AA98	239910	301123	360080
HOR.MEPDG	250114	296085	310587
HOR.MEPDG Barra	258381	290115	315107
HOR.OPTIPAVE	219356	256759	339526
HOR. OPTIPAVE Barra	228357	261225	277098

Tabla C-6 Costo directo inicial de los pavimentos para suelo bueno

Método de Diseño	Precio M\$		
	EE		
	2.000.000	10.000.000	30.000.000
ASF.AA93 - 2015	272665	345049	413147
ASF.MOP -2015	265991	372075	466730
ASF. AA93 - 2008	182575	233186	291110
ASF.MOP - 2008	175901	228266	279375
HOR.AA93	235383	294324	356679
HOR.AA98	233116	288655	357813
HOR.MEPDG	241052	283824	304691
HOR.MEPDG Barra	247051	285584	311705
HOR.OPTIPAVE	198956	236355	324787
HOR. OPTIPAVE Barra	214760	246489	263492

Finalmente, en la Tabla C-7, se entrega la estimación de los costos para los 100.000.000 EE.

Tabla C-7 Costo directo inicial de los pavimentos para tránsito muy alto

Método de Diseño	Precio M\$		
	CBR [%]		
	4	10	20
HOR.AA93	1005852	987720	967328
HOR.AA98	926486	931030	928779
HOR.MEPDG Barra	980984	944940	919783
HOR.MEPDG	909977	892423	878833

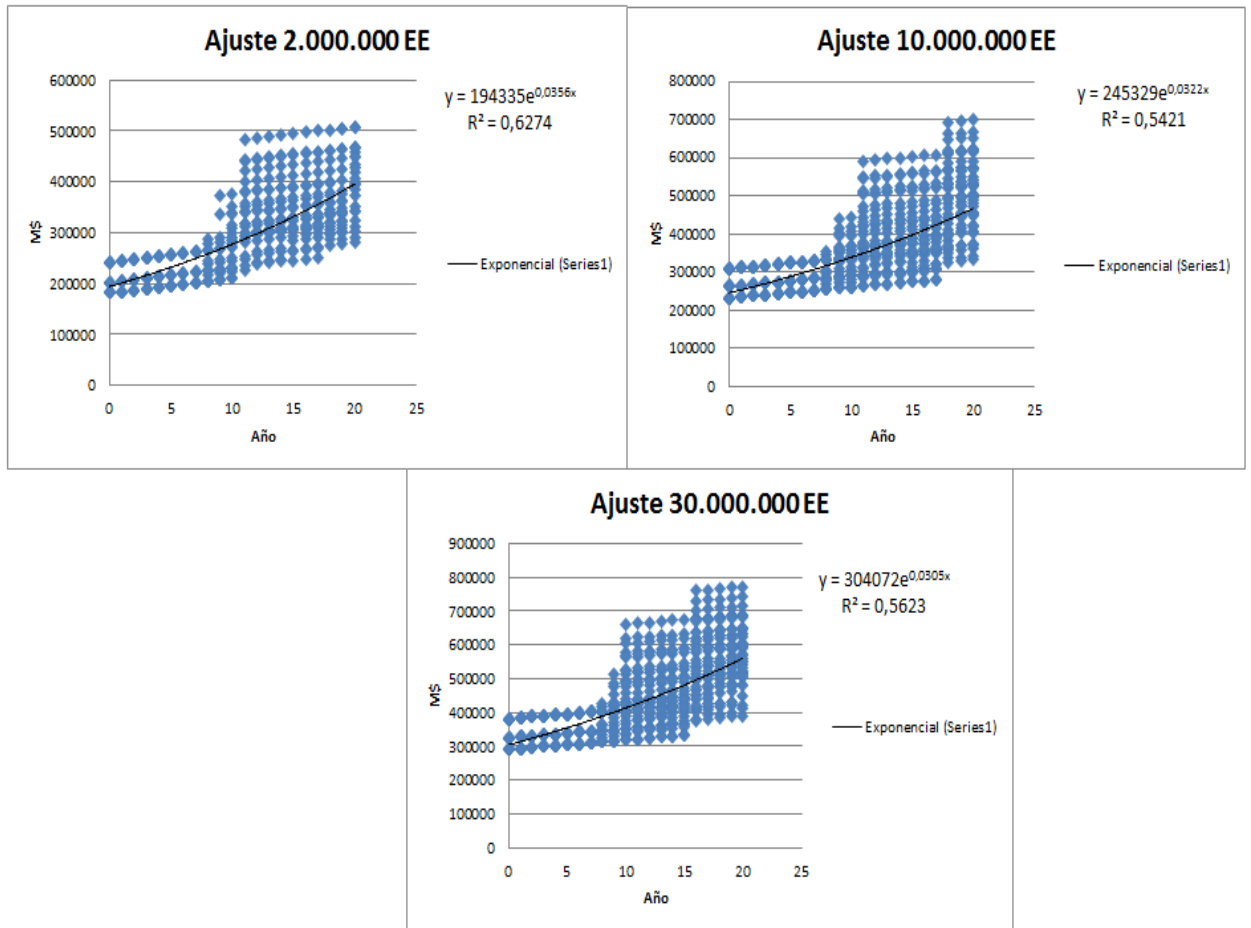
ANEXO D: AJUSTE DE LAS CURVAS DEL VALOR PRESENTE NETO

D.1 Ajuste de los pavimentos asfálticos

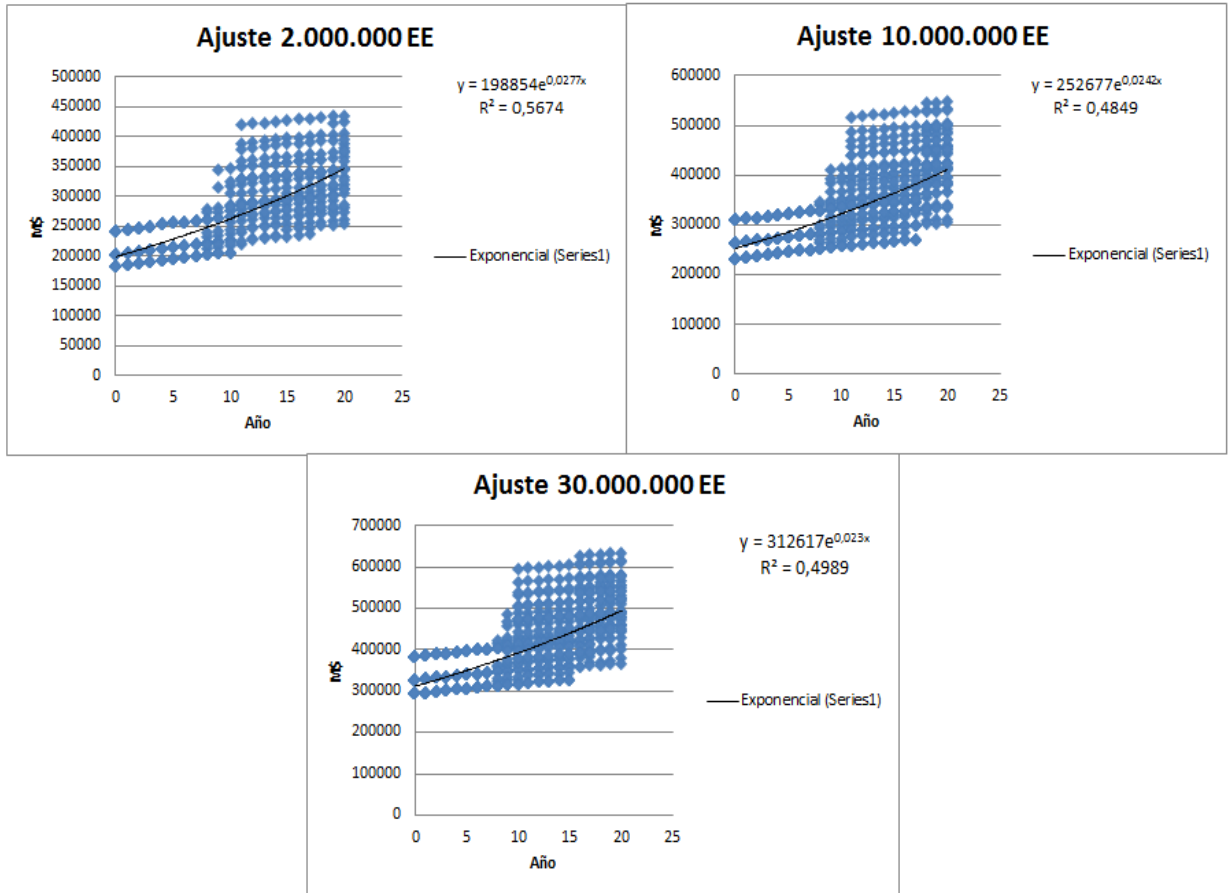
D.1.1 Ajuste para diseño por AASHTO 93

D.1.1.1 Ajuste para precios del año 2008

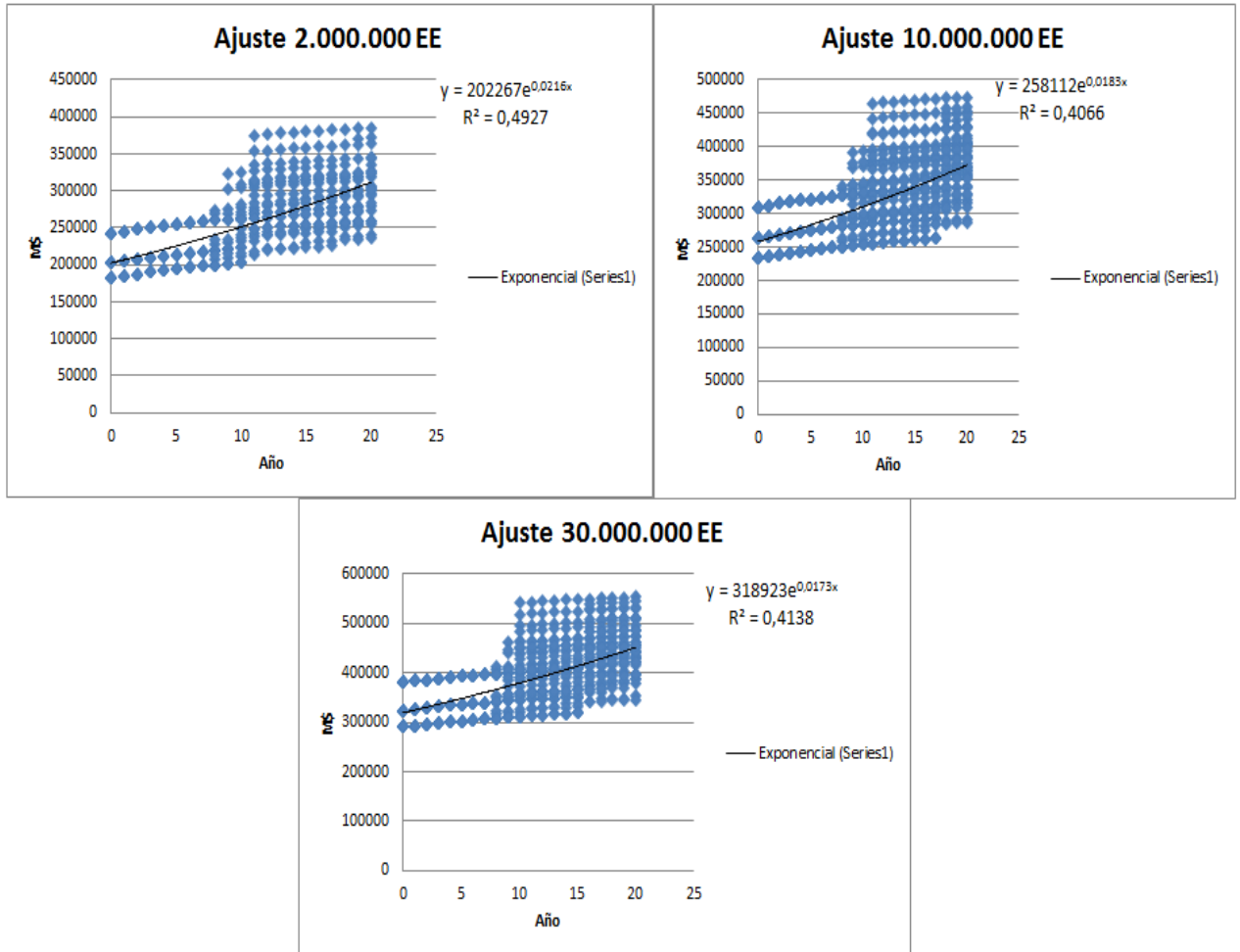
Tasa de Descuento Real de 0%



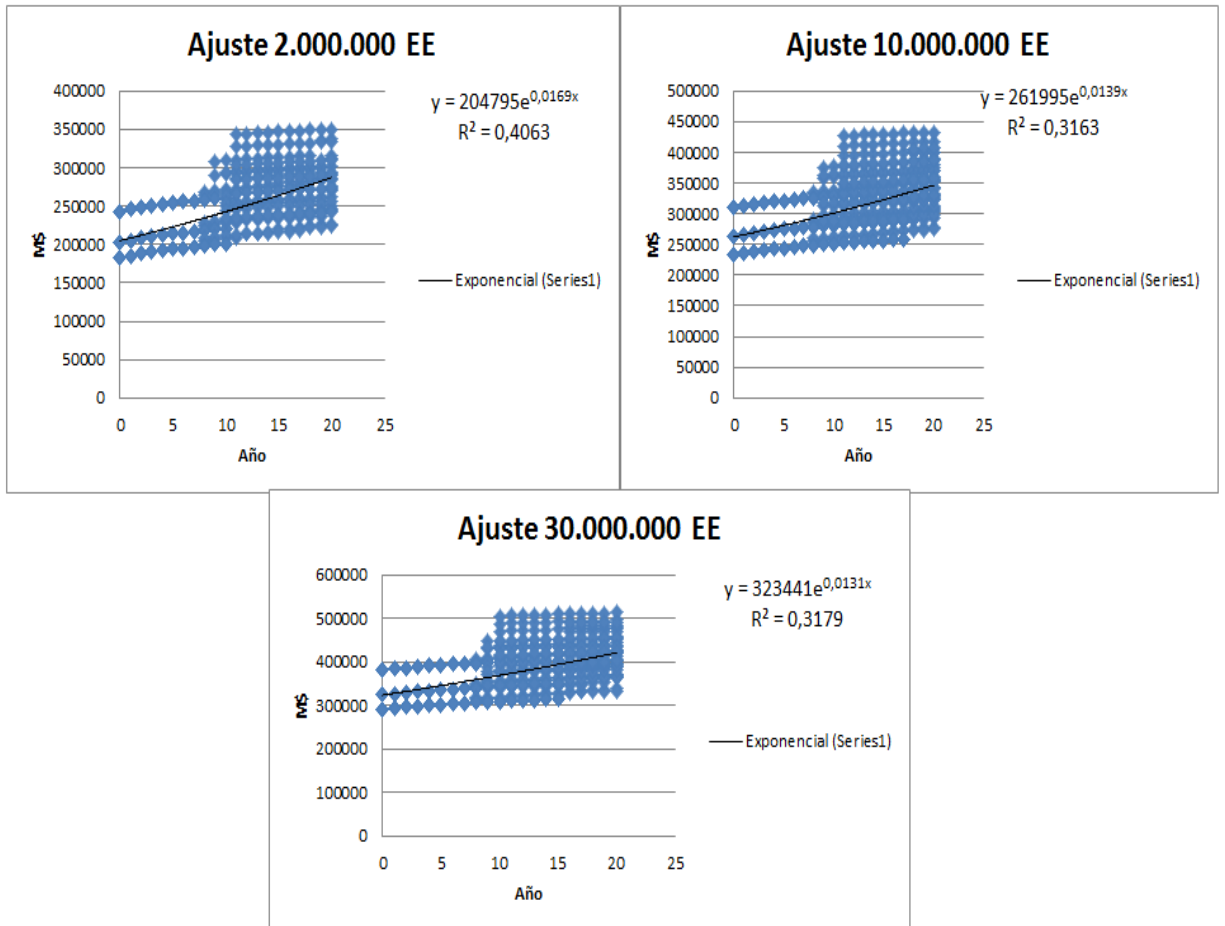
Tasa de Descuento Real de 3%



Tasa de Descuento Real de 6%

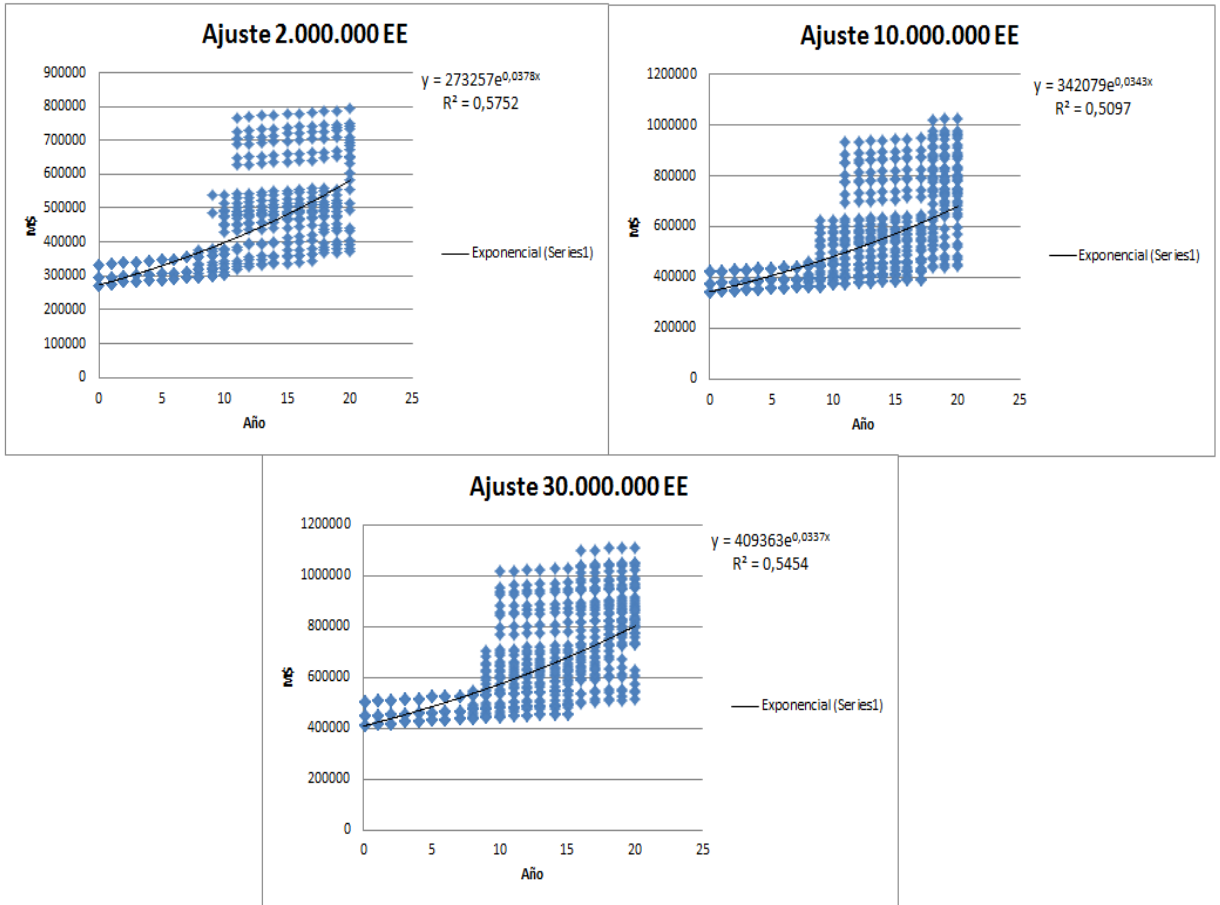


Tasa de Descuento Real de 9%

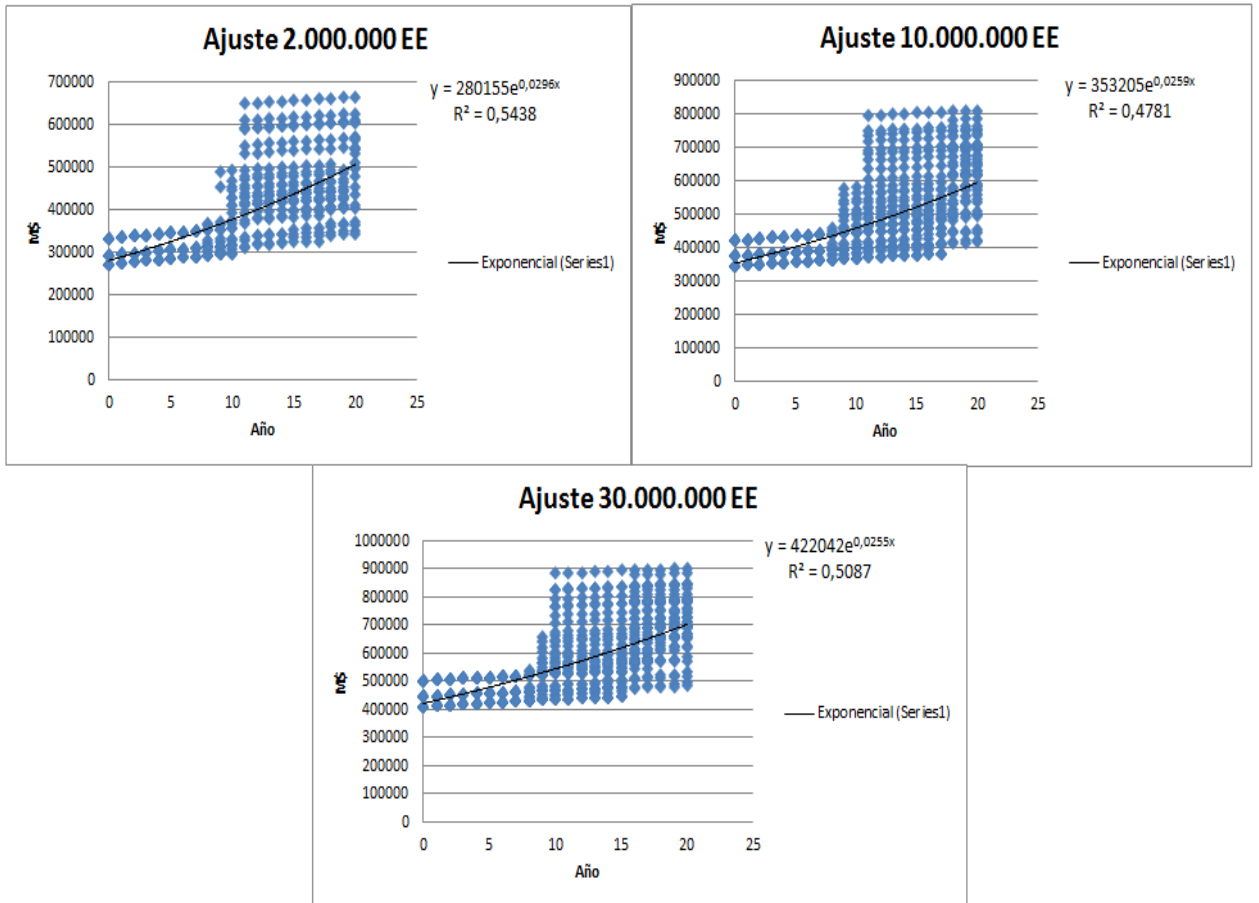


D.1.1.2 Ajuste para precios del año 2015

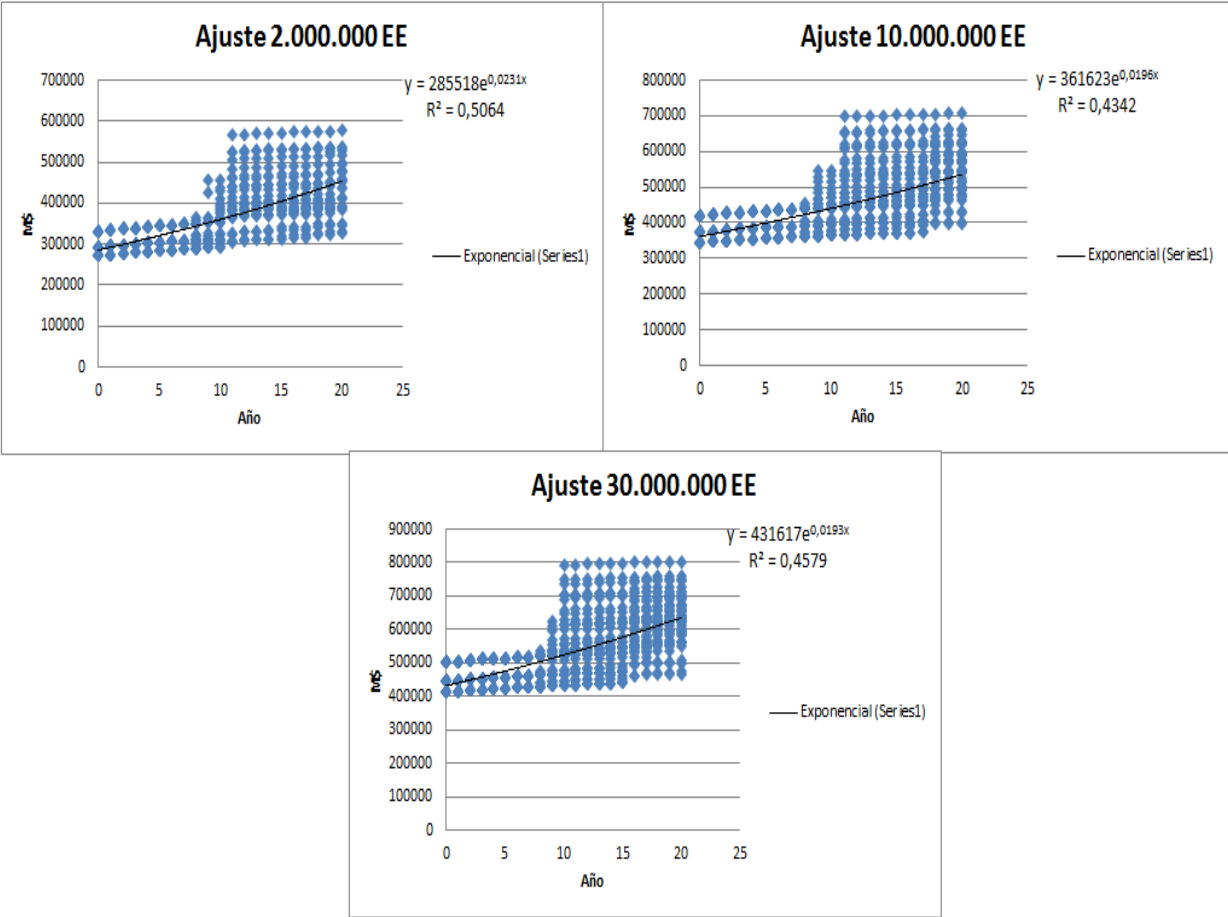
Tasa de Descuento Real de 0%



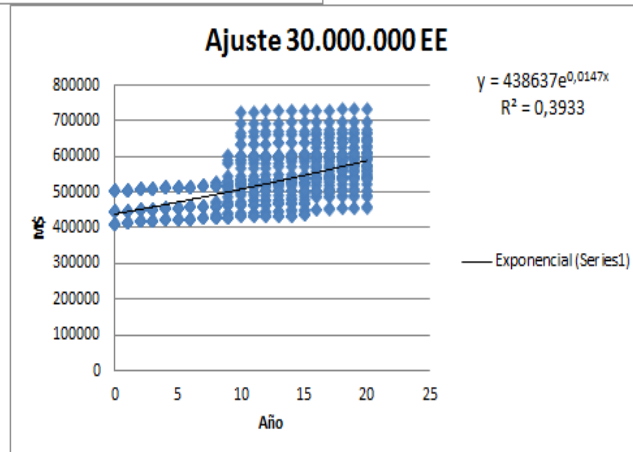
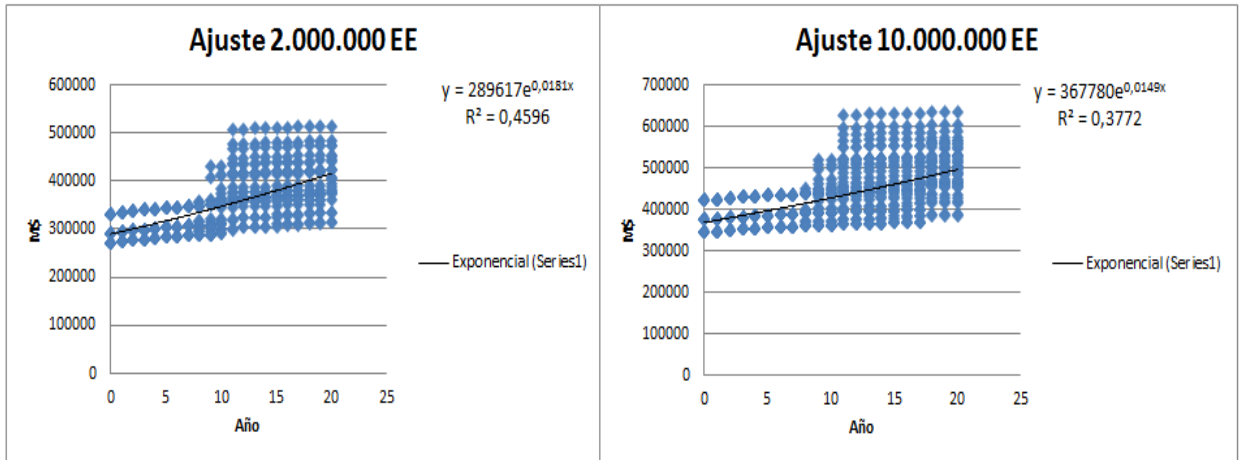
Tasa de Descuento Real de 3%



Tasa de Descuento Real de 6%



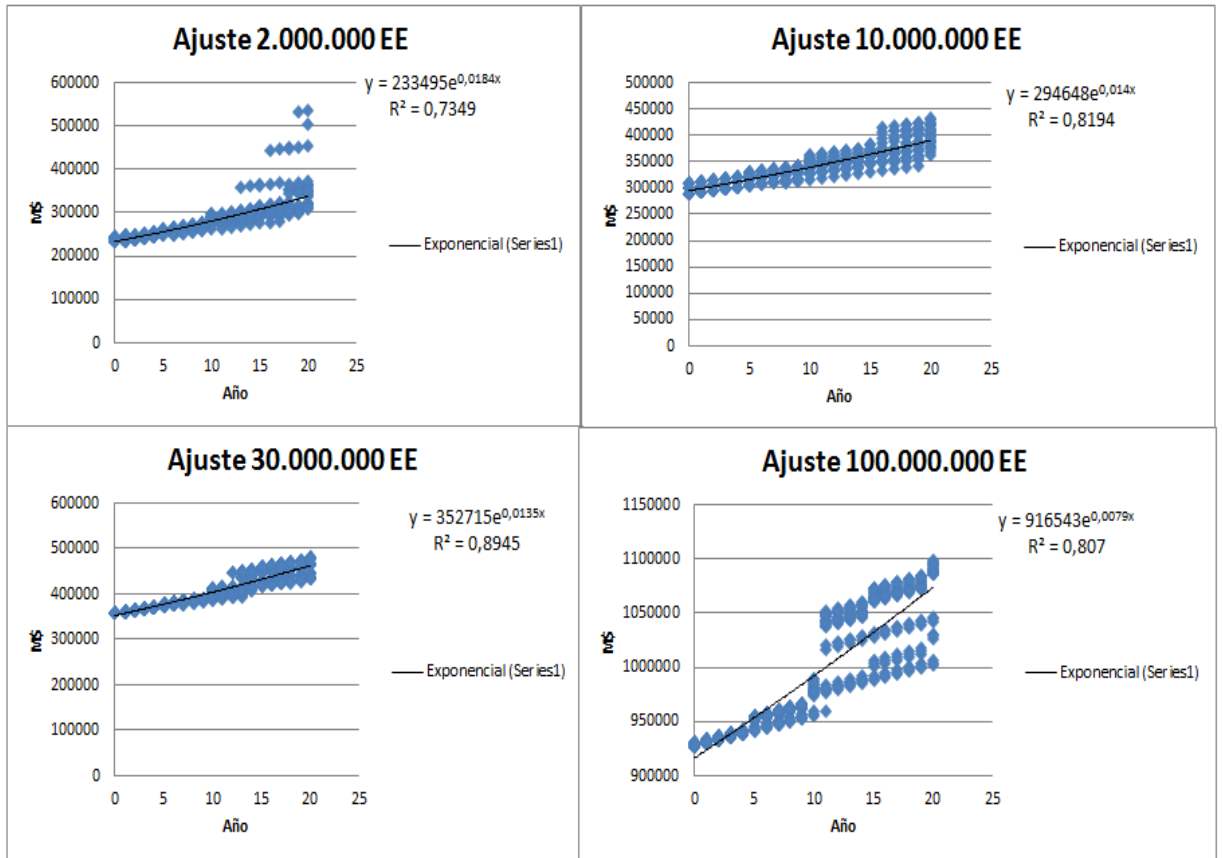
Tasa de Descuento Real de 9%



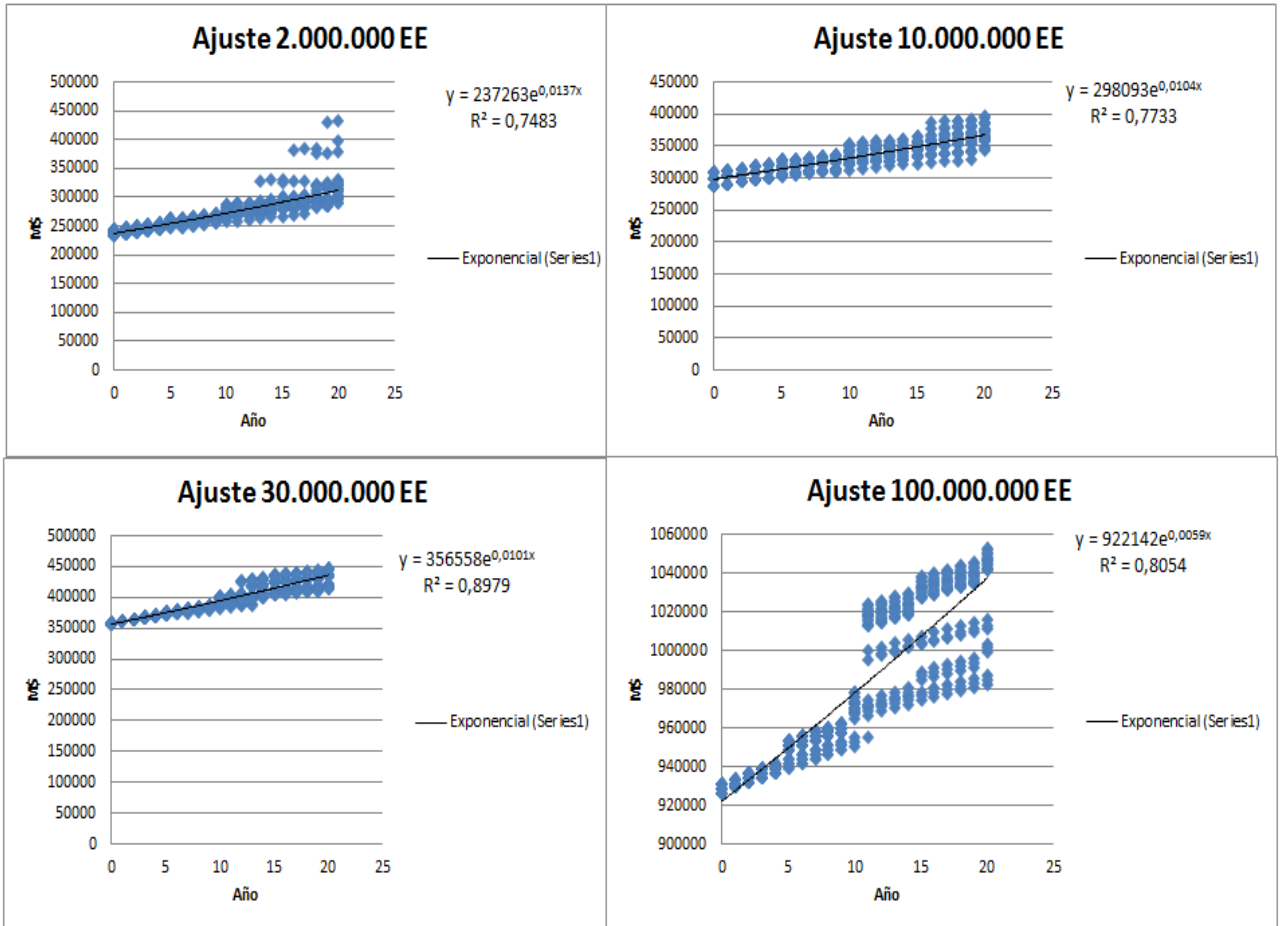
D.2 Ajuste de los pavimentos de hormigón

D.2.1 Ajuste para diseño por AASHTO 98

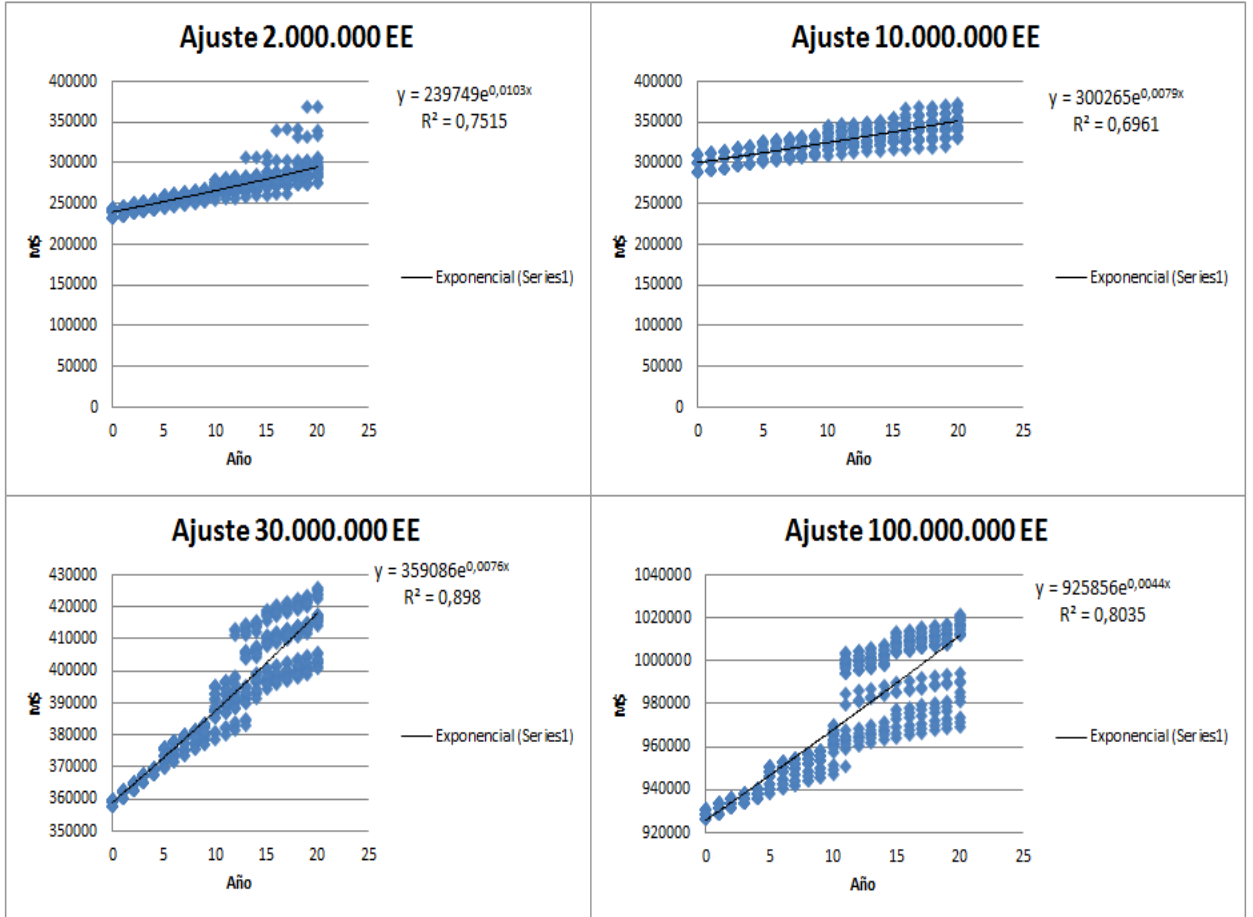
Tasa de Descuento Real de 0%



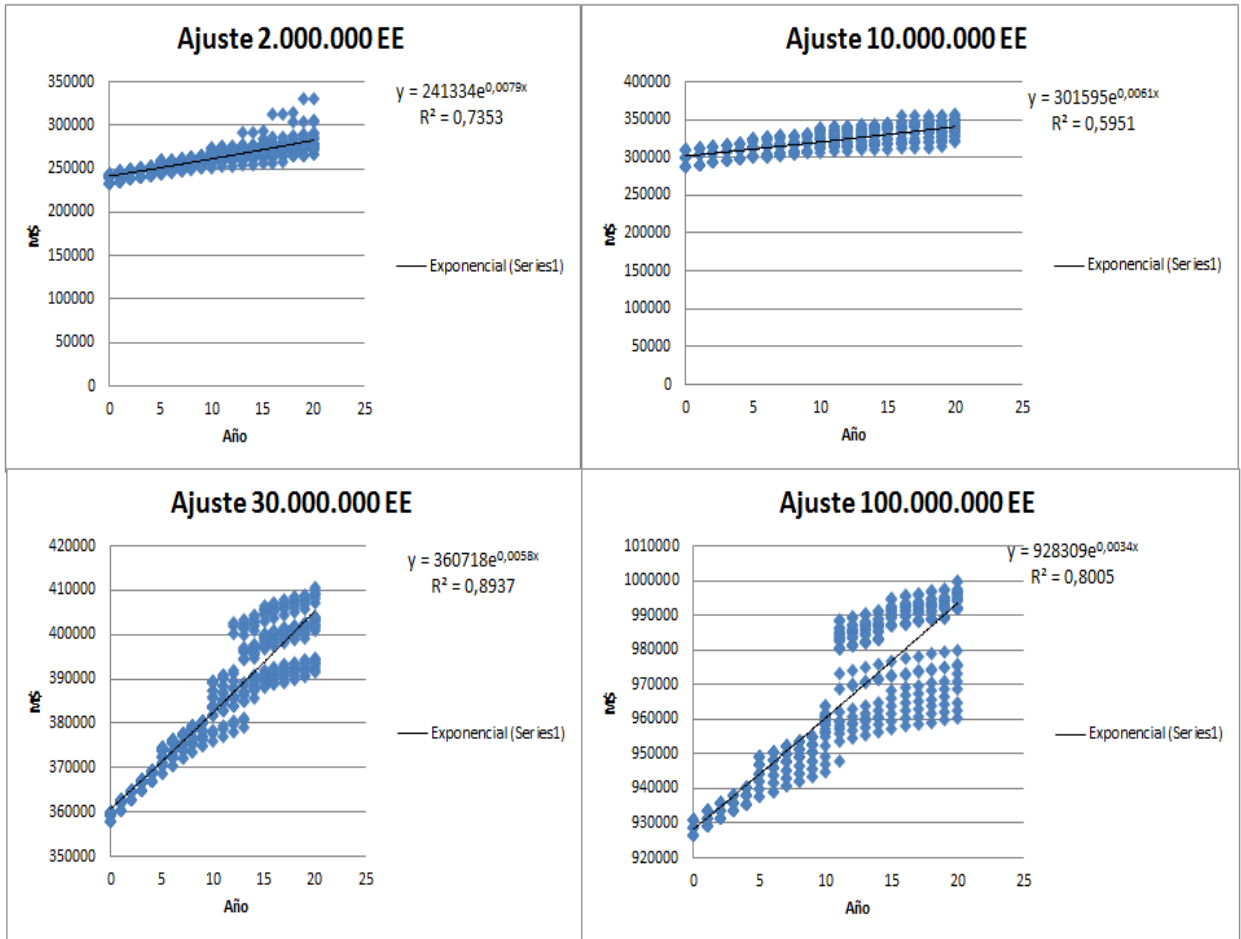
Tasa de Descuento Real de 3%



Tasa de Descuento Real de 6%

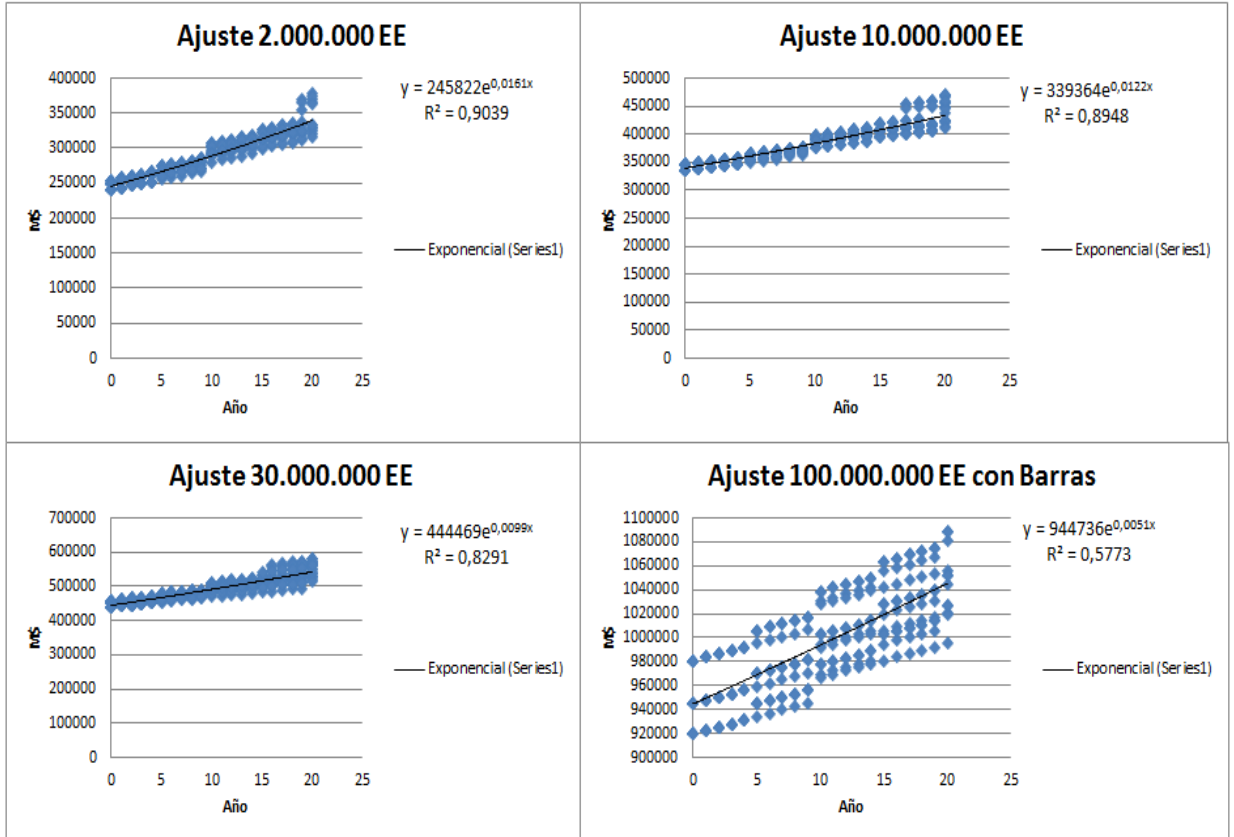


Tasa de Descuento Real de 9%

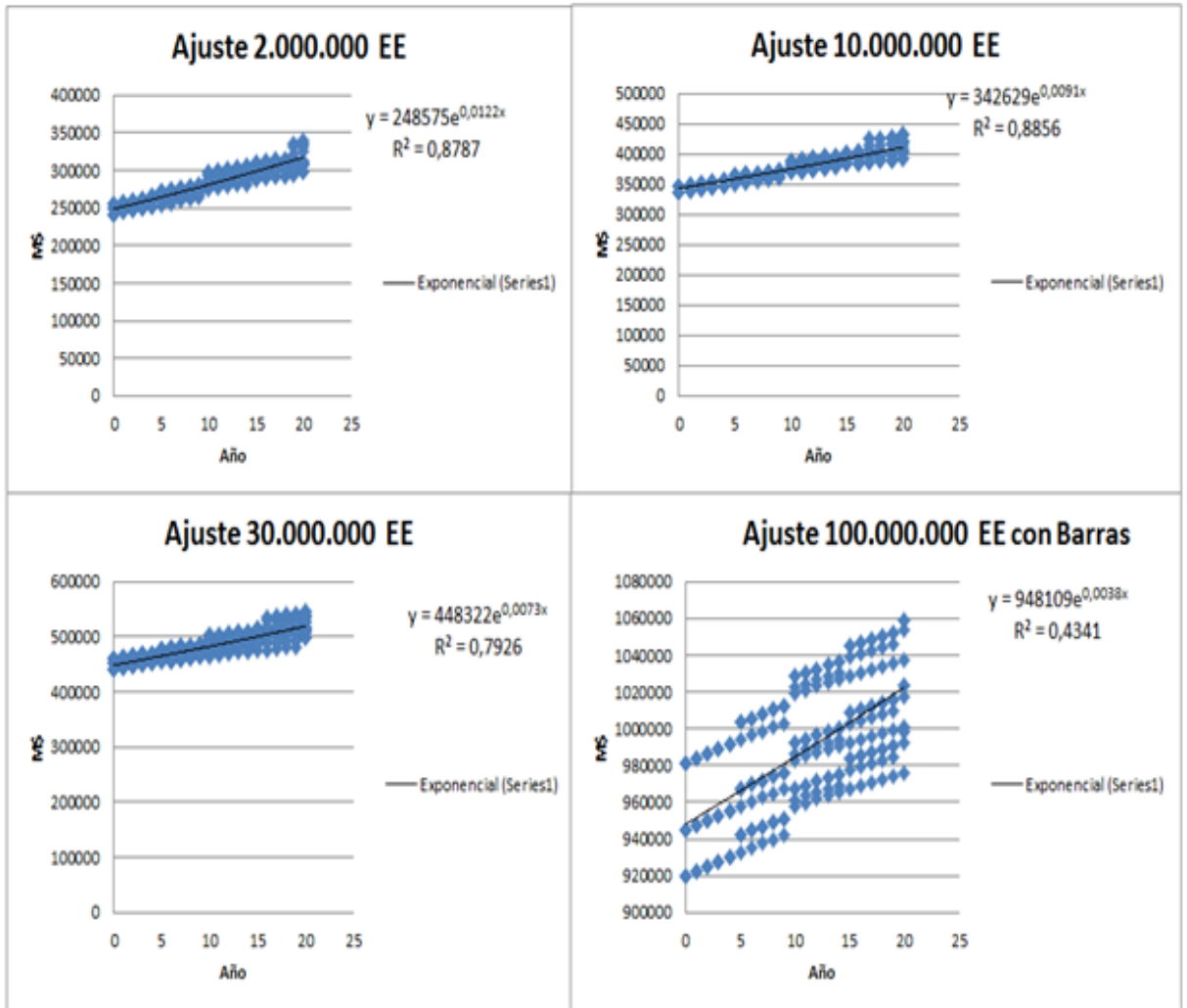


D.2.2 Ajuste para diseño por MEPDG

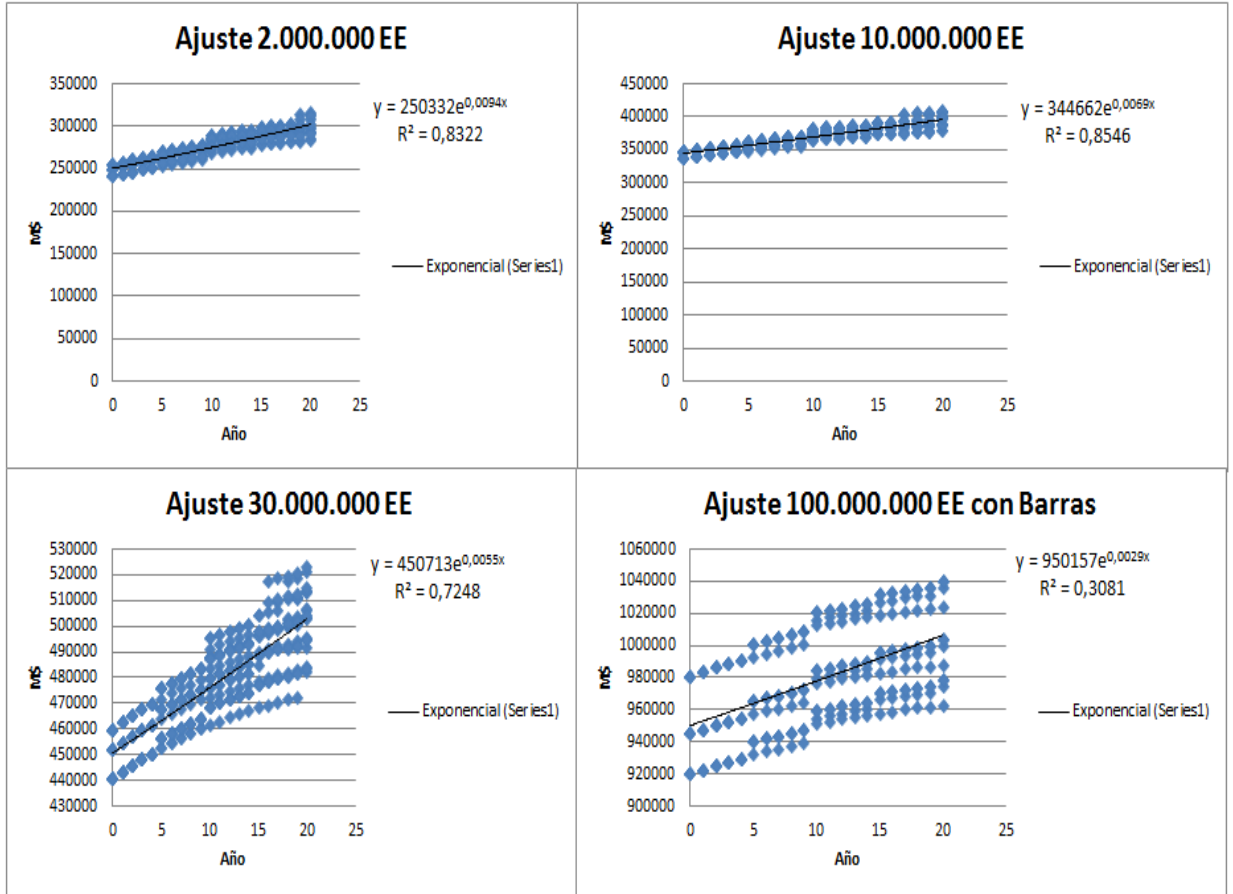
Tasa de Descuento Real de 0%



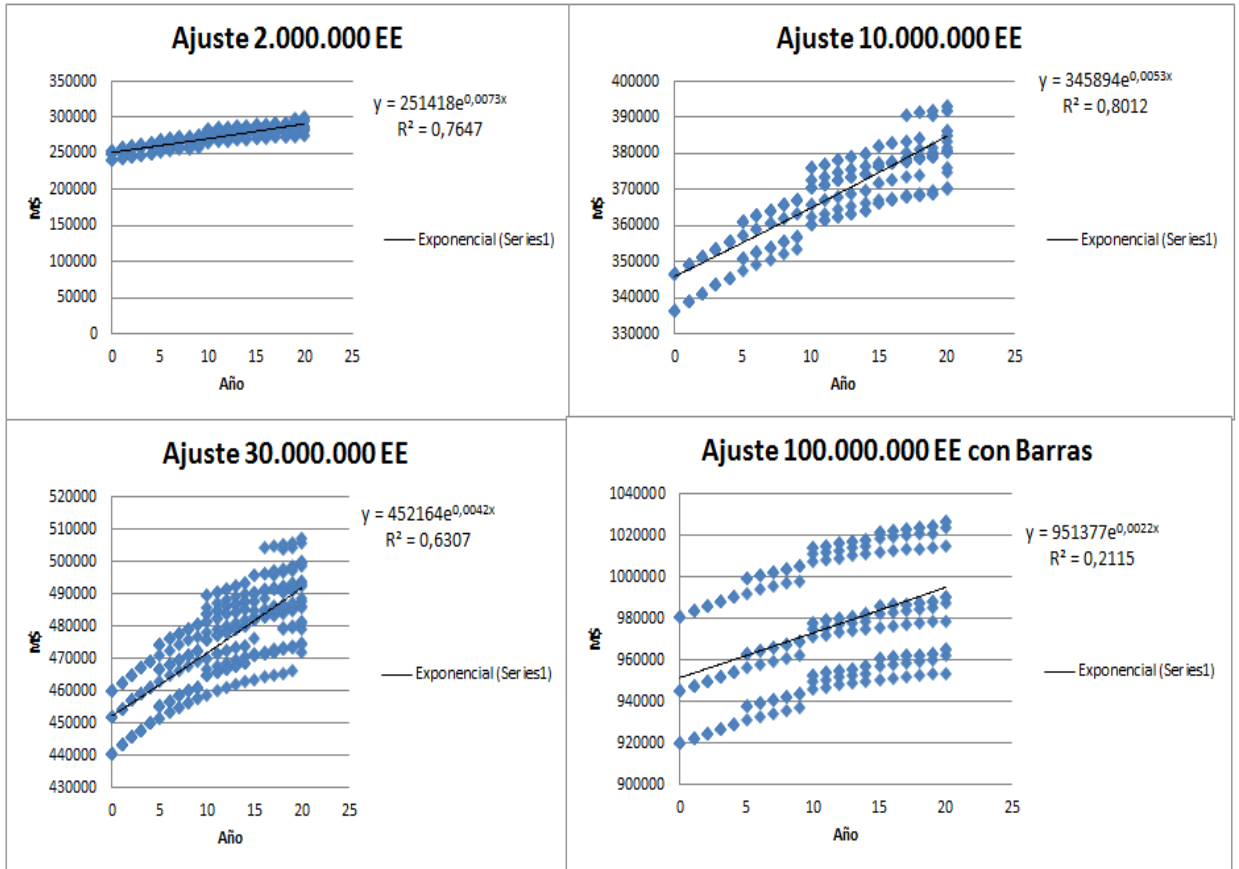
Tasa de Descuento Real de 3%



Tasa de Descuento Real de 6%

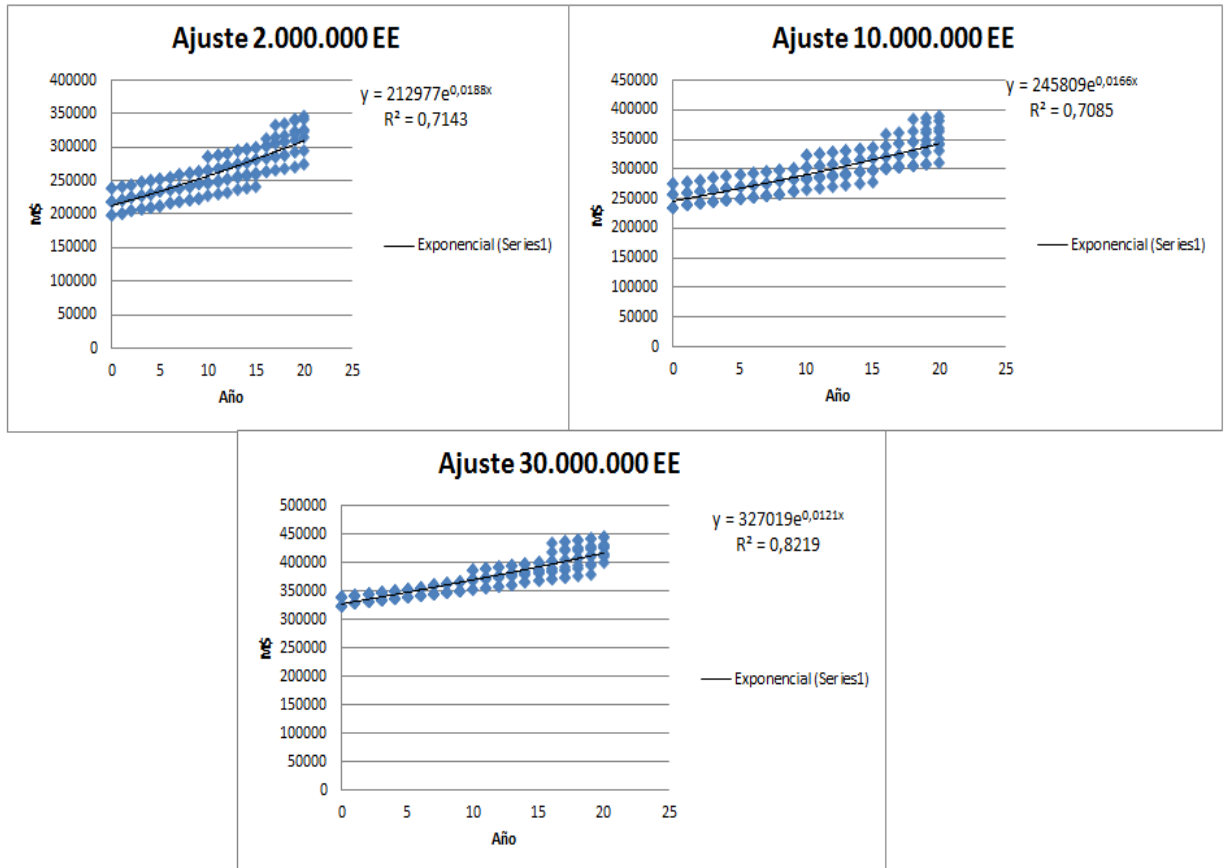


Tasa de Descuento Real de 9%

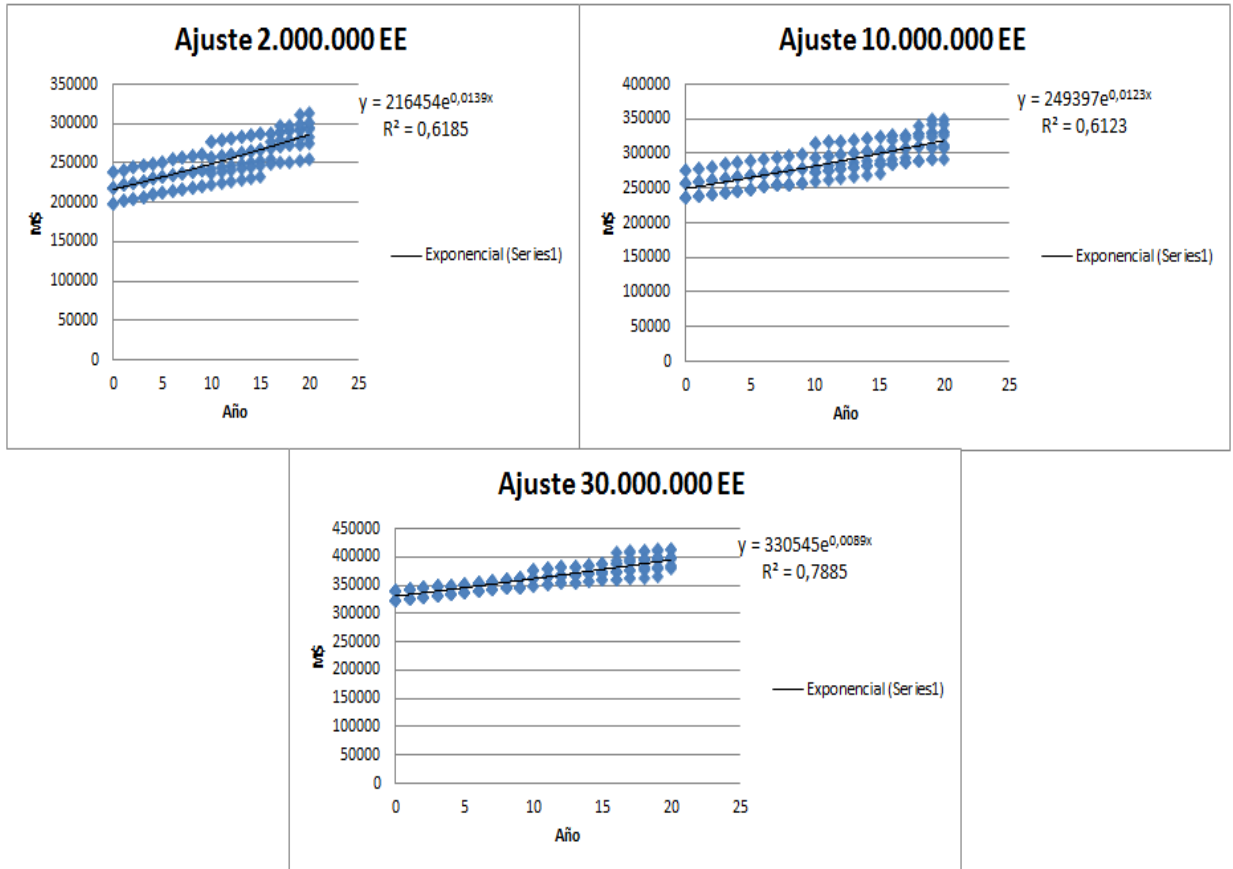


D.2.3 Ajuste para diseño por OPTIPAVE

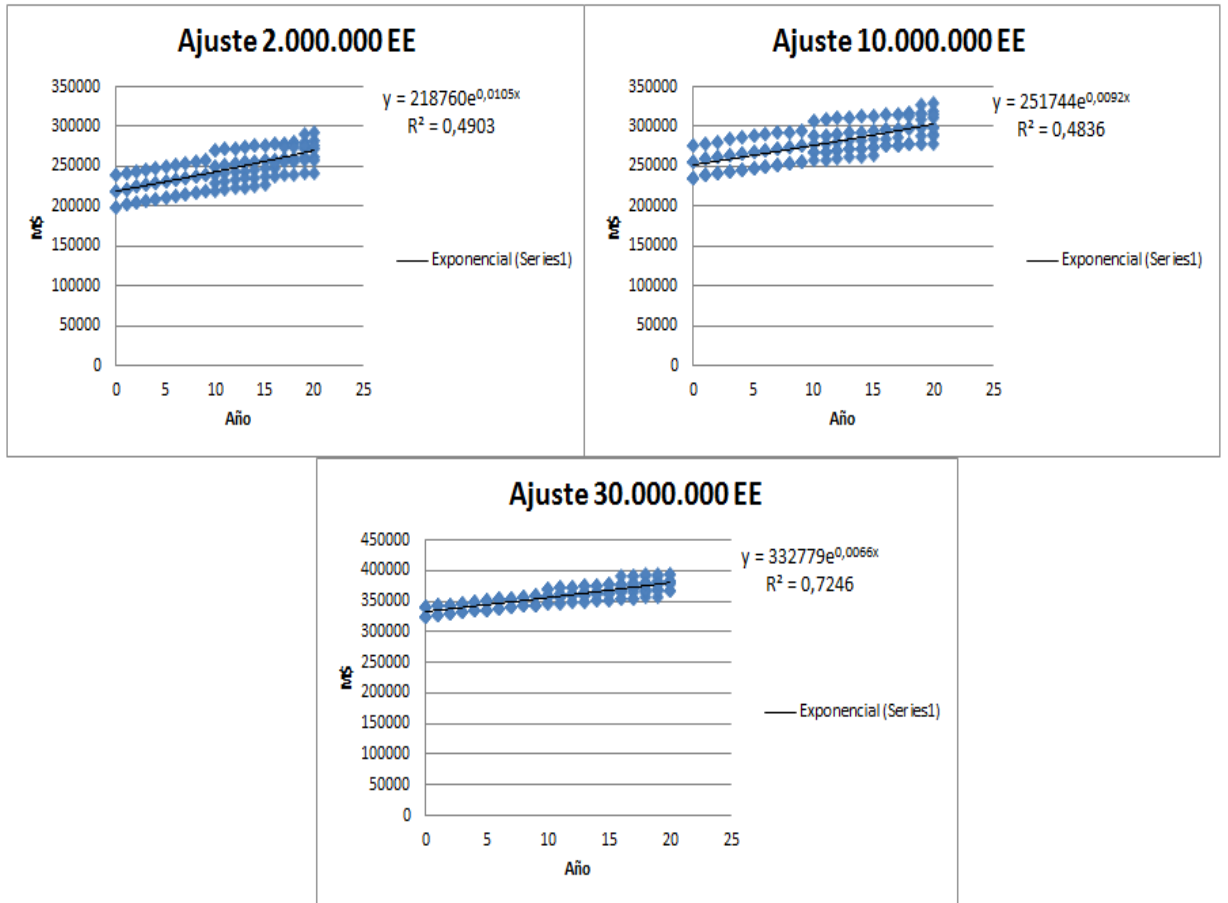
Tasa de Descuento Real de 0%



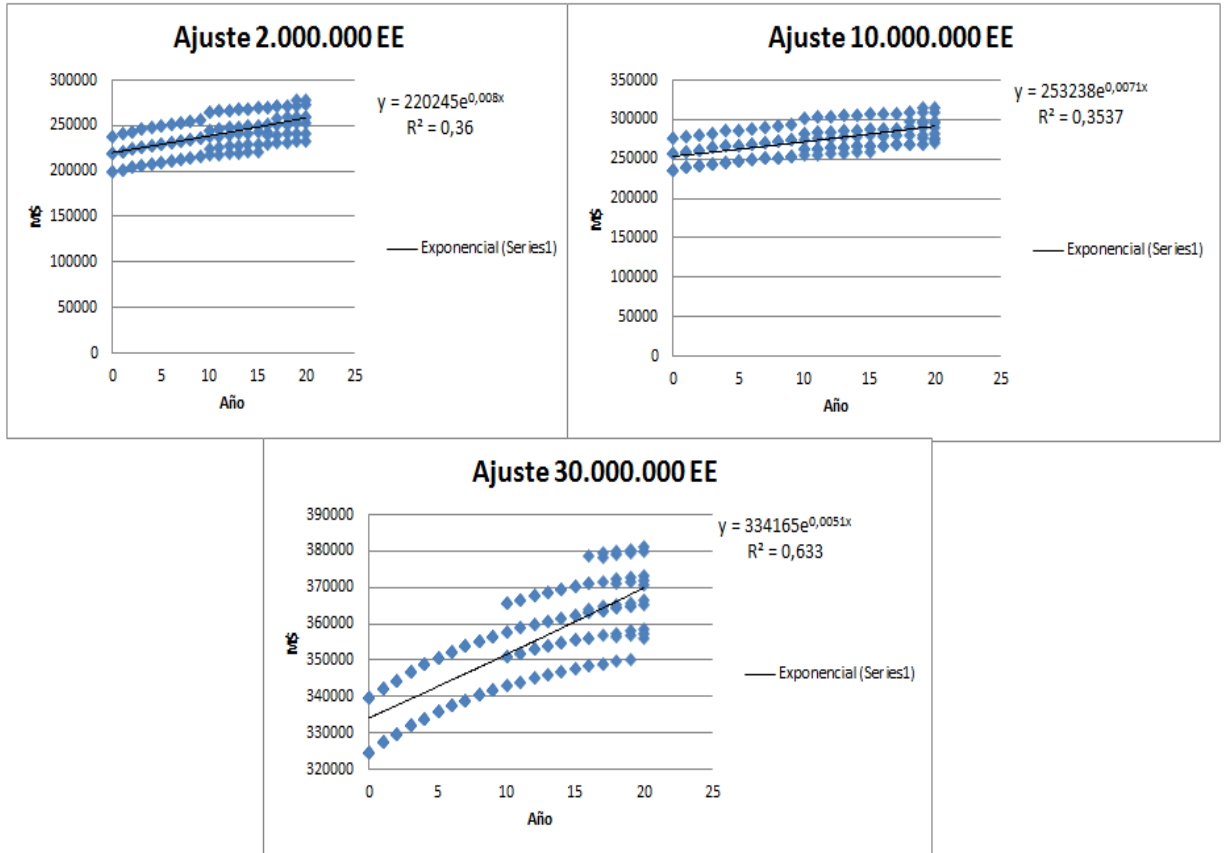
Tasa de Descuento Real de 3%



Tasa de Descuento Real de 6%



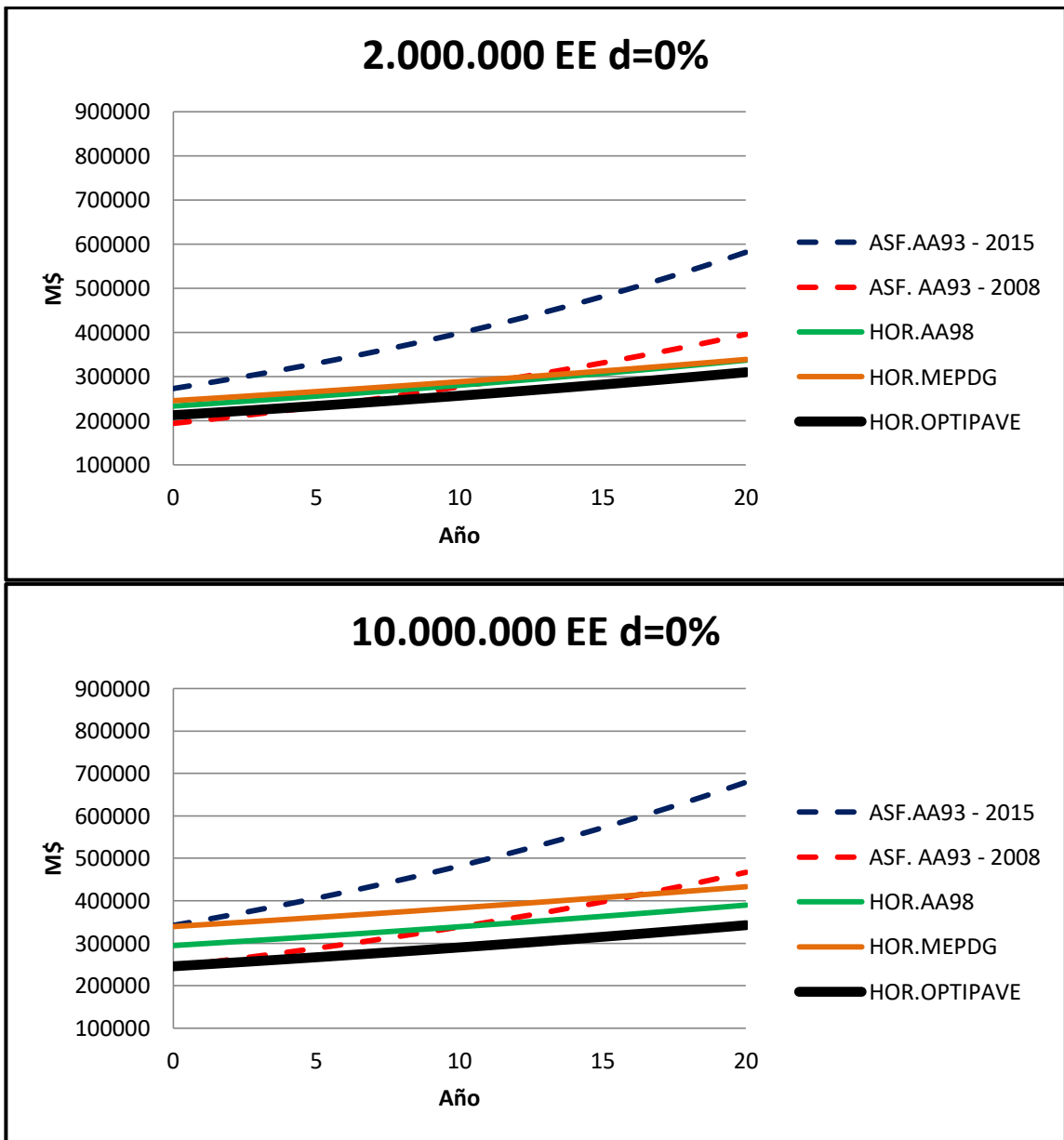
Tasa de Descuento Real de 9%

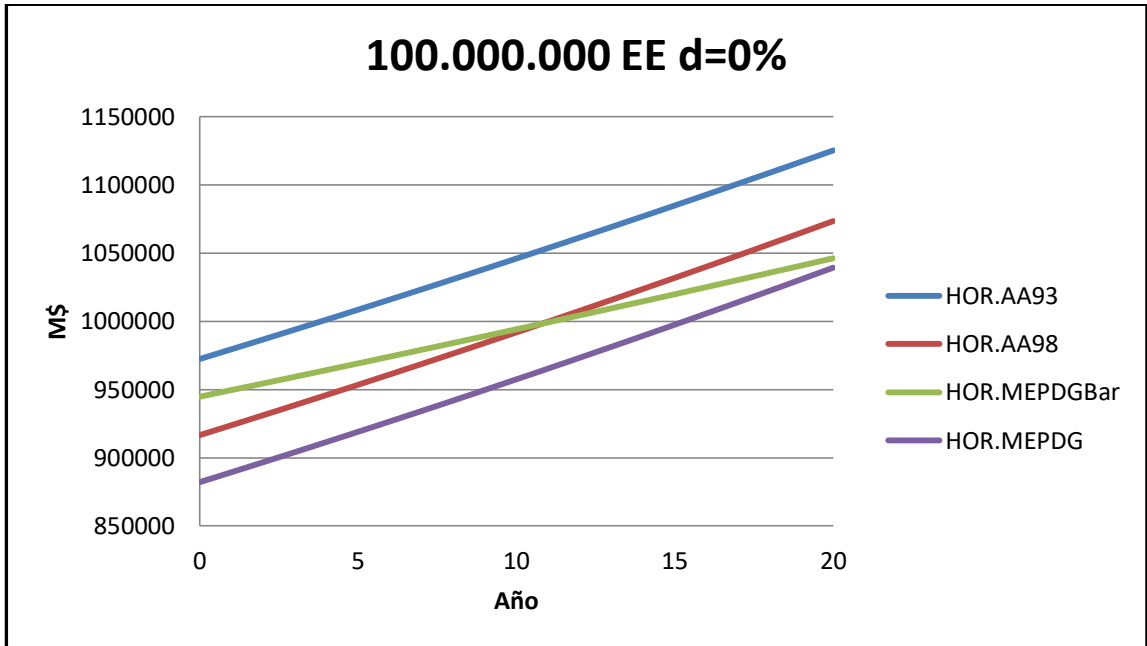
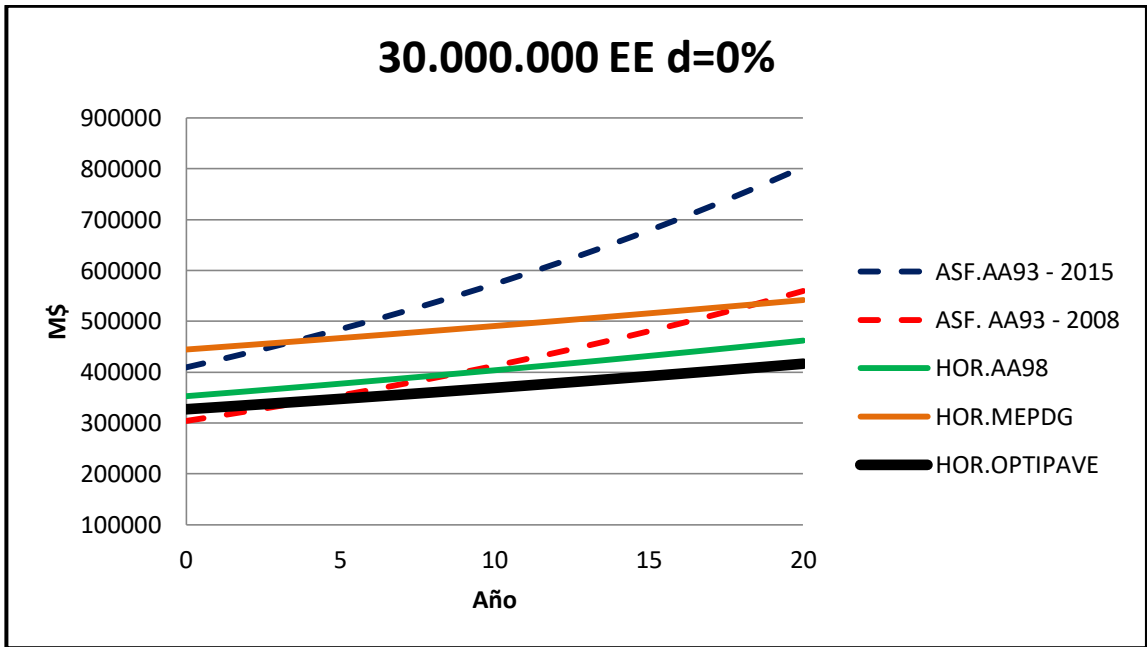


**ANEXO E: COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE
ACUERDO AL VPN Y DISCRETIZANDO SEGÚN LA TASA DE
DESCUENTO REAL UTILIZADA**

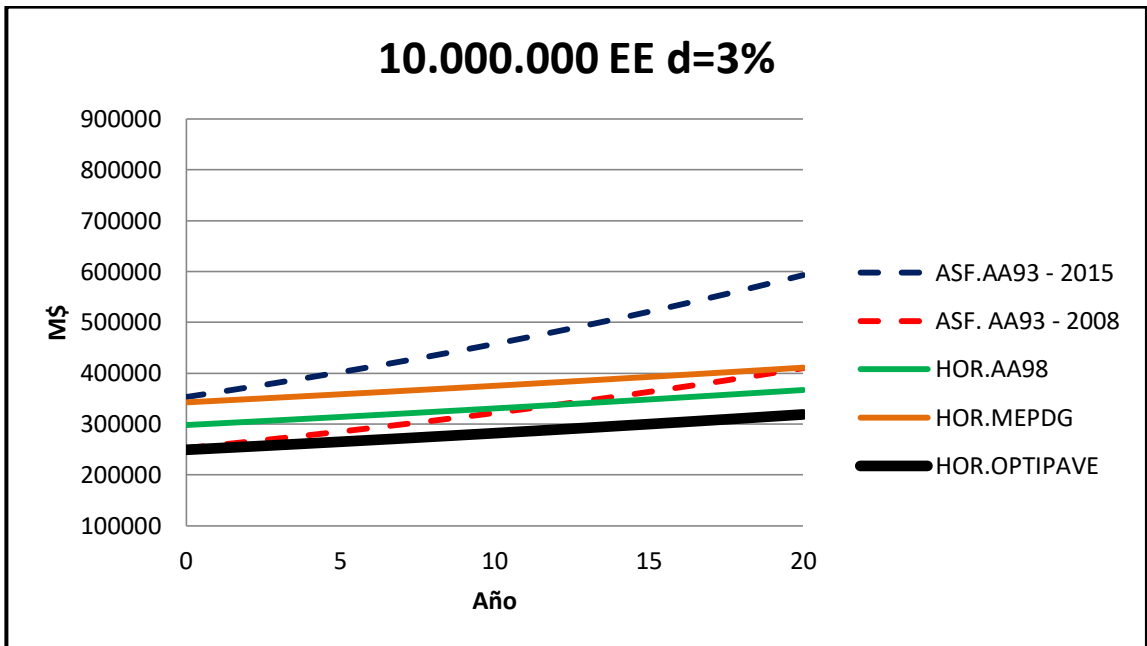
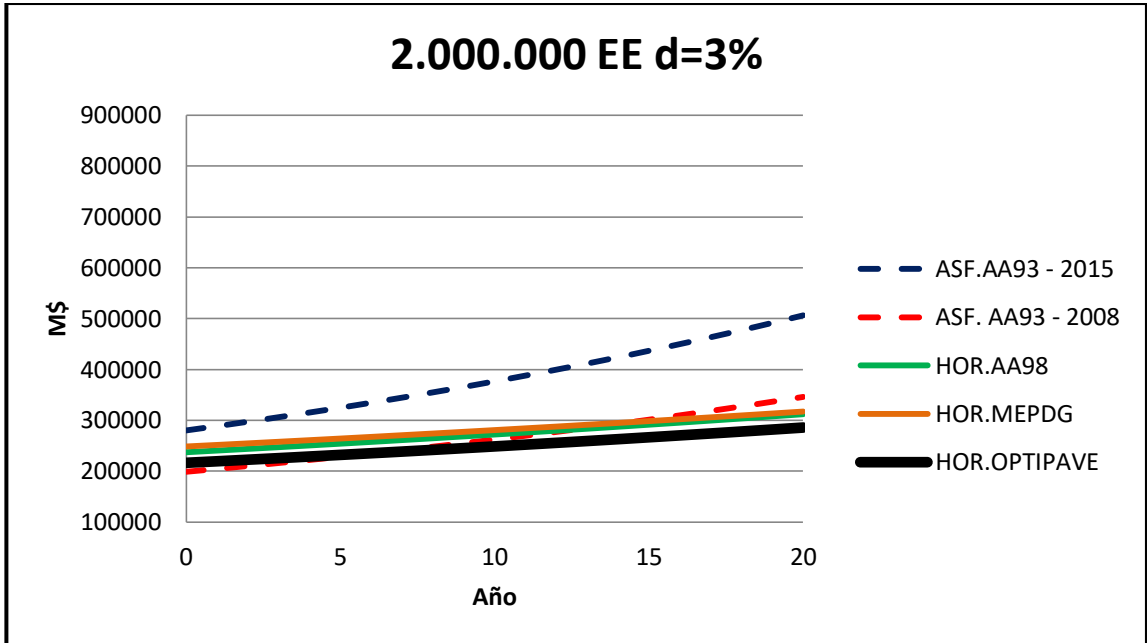
Los gráficos mostrados en el presente anexo, a excepción del volumen de tránsito de 100.000.000 E.E., involucra a los diseños por MEPDG sin fallas durante los 20 años.

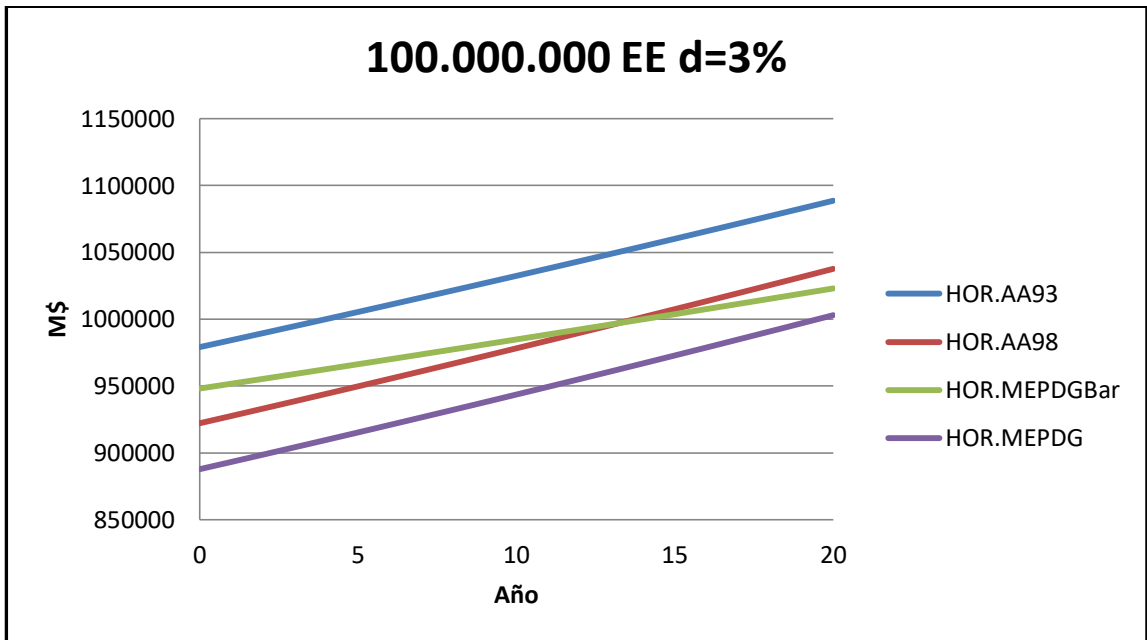
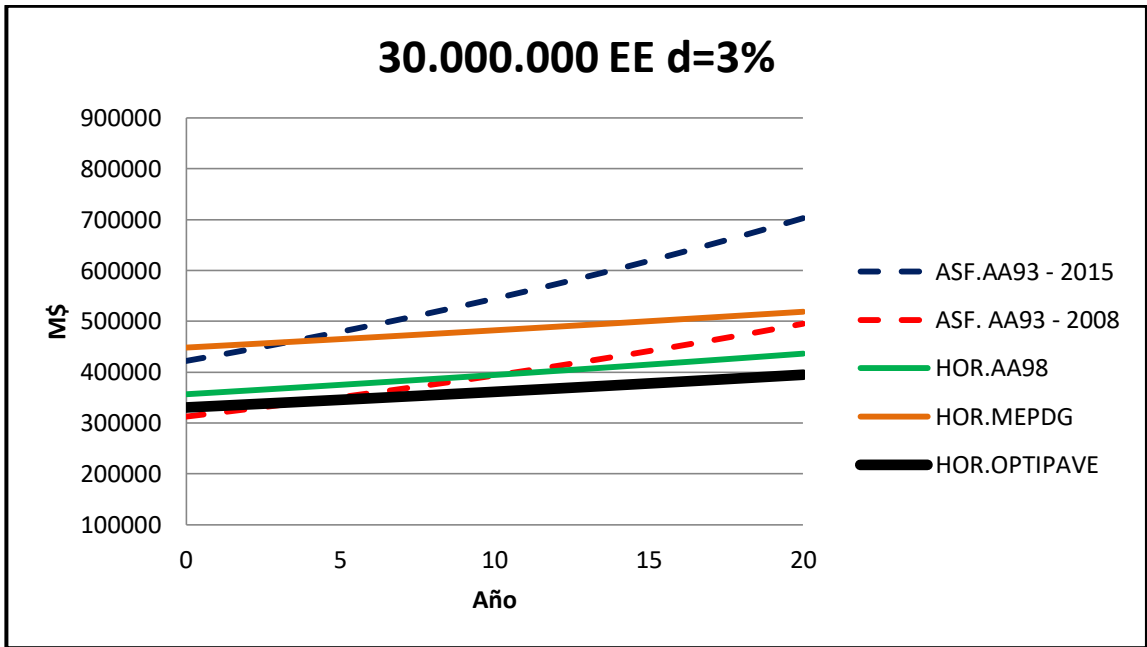
E.1 VPN con Tasa de Descuento Real del 0%



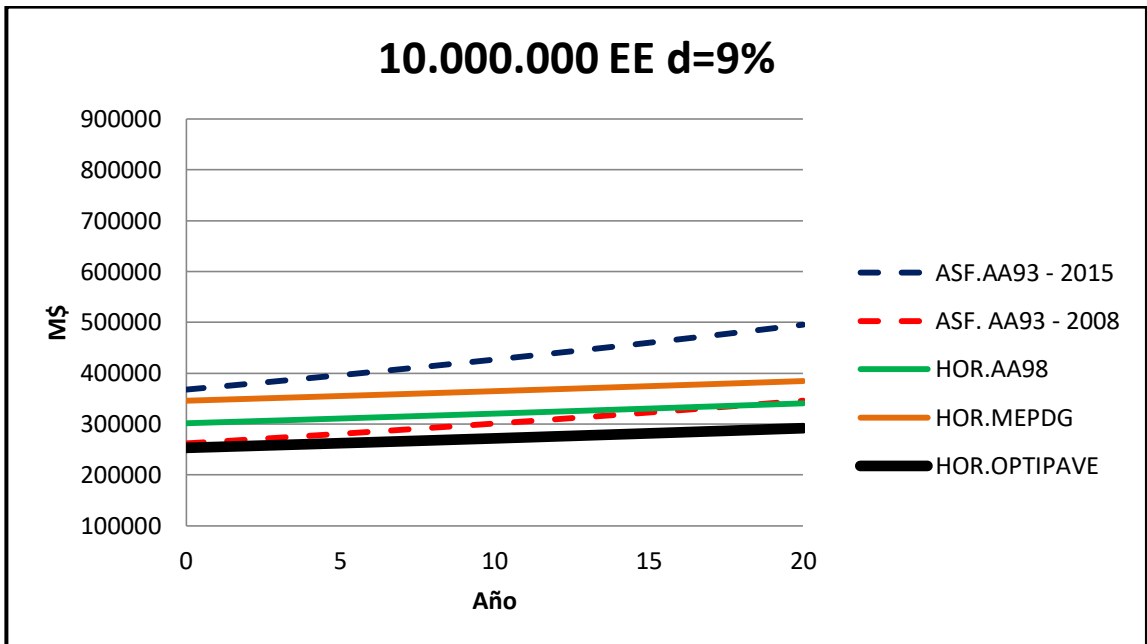
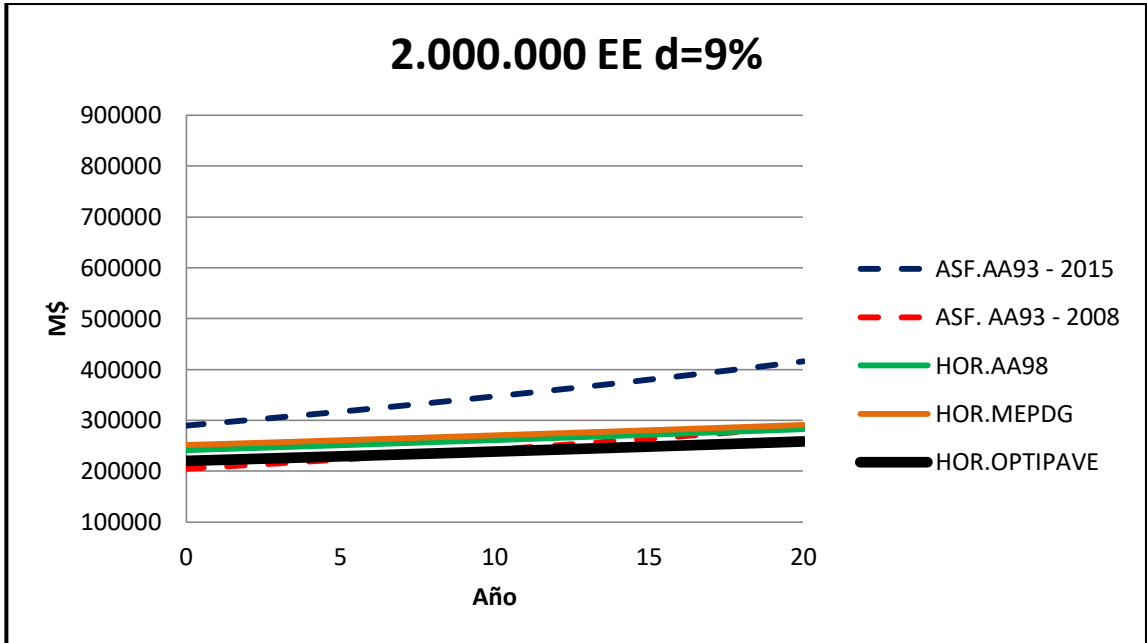


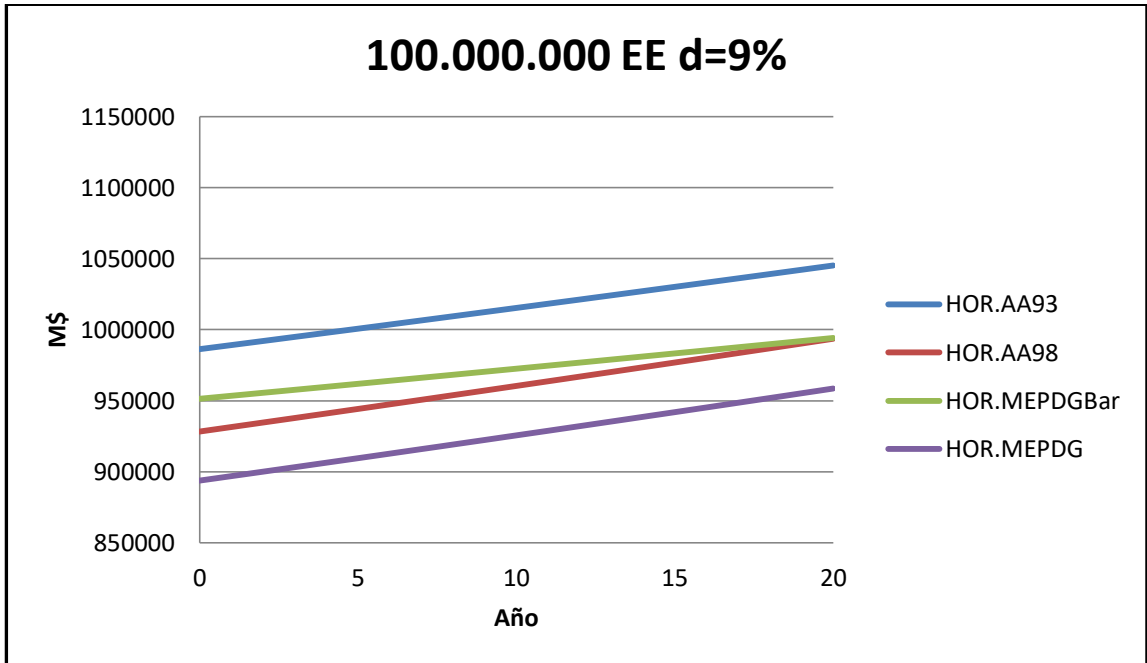
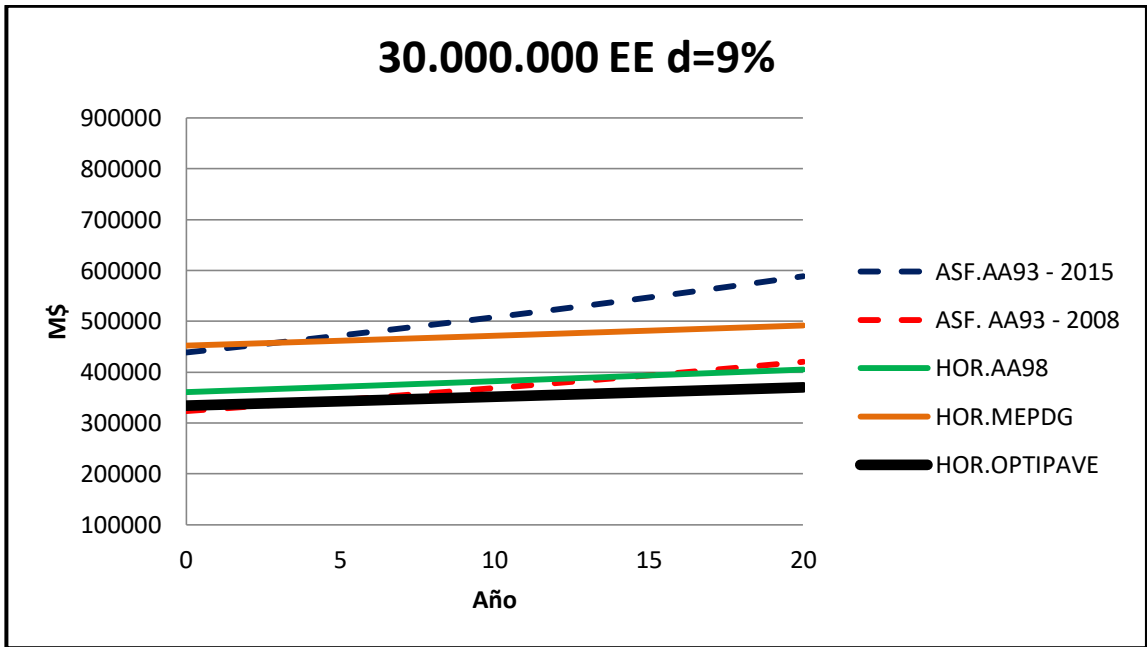
E.2 VPN con Tasa de Descuento Real del 3%





E.3 VPN con Tasa de Descuento Real del 9%





ANEXO F: TIPOS DE TRÁFICO SEGÚN OPTIPAVE

Tipo de Tráfico:

Clasificación de la Federal Highway Administration, en función del tipo de vehículos que transitan por el pavimento y que van en numeración desde 1 hasta 17. El criterio de selección del grupo a utilizar se muestra en la siguientes tablas:

Uso del Pavimento	Grupo de Clasificación Recomendado
Arterias Principales (Rutas Inter-regionales)	1,2,3,4,5,8,11,13
Arterias Principales (Rutas Interregionales incluyendo autopistas urbanas)	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,14,16
Arterias Menores	4,6,8,9,10,11,12,15,16,17
Colectoras Mayores	6,9,12,14,15,17
Colectoras Menores	9,12,14,17
Calles Locales y de Servicio	9,12,14,18

Pocentaje de Flujo de Buses	Tipo de Camiones		Grupo TTC
	Múltiples Remolques	Remolque Simple y de una unidad	
Nulo a Bajo (<2%)	Relativamente alto número de camiones con múltiples remolques (>10%)	Predominio de remolque simple	5
		Alto porcentaje de camiones de remolque simple, pero con algunos camiones de una unidad	8
		Tráfico de camiones mixto, con alto número de camiones con remolque simple	11
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	13
		Predominio de camiones de una unidad	16
	Número moderado de camiones con múltiples remolques (2 a 10%)	Predominio de remolque simple	3
		Tráfico de camiones mixto, con alto porcentaje de camiones con remolque simple	7
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual porcentaje de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	10
		Predominio de camiones de una unidad	15
		Bajo a Moderado (entre 2 y 25%)	Bajo a Nulo (<2%)
Predominio de remolque simple con bajo número de camiones de una unidad	2		
Predominio de remolque simple con bajo a moderado número de camiones de una unidad	4		
Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones con remolque simple	6		
Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	9		
Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones de una unidad	12		
Predominio de camiones de una unidad	14		
Ruta con alto tráfico de buses (>25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	17

ANEXO G: SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS EN EL DISEÑO DE OPTIPAVE

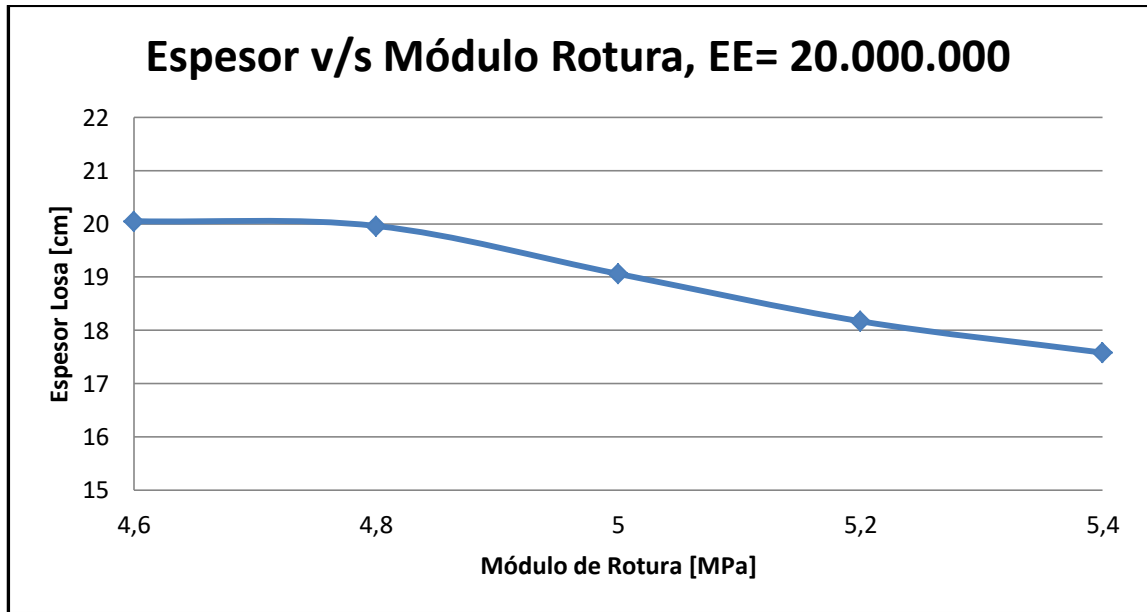


Gráfico G-1 Sensibilidad del Diseño al Módulo de Rotura
 Fuente: Curso de Manejo y Aplicación de OPTIPAVE (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile)

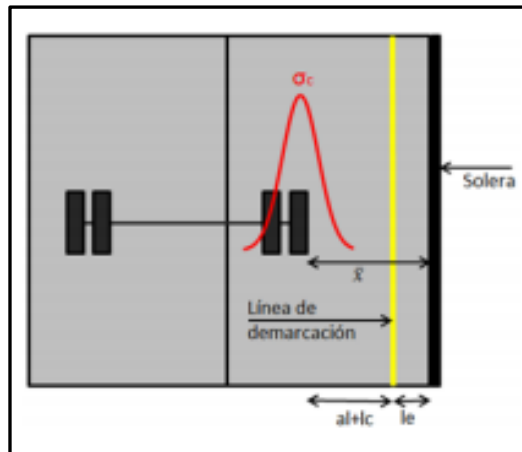
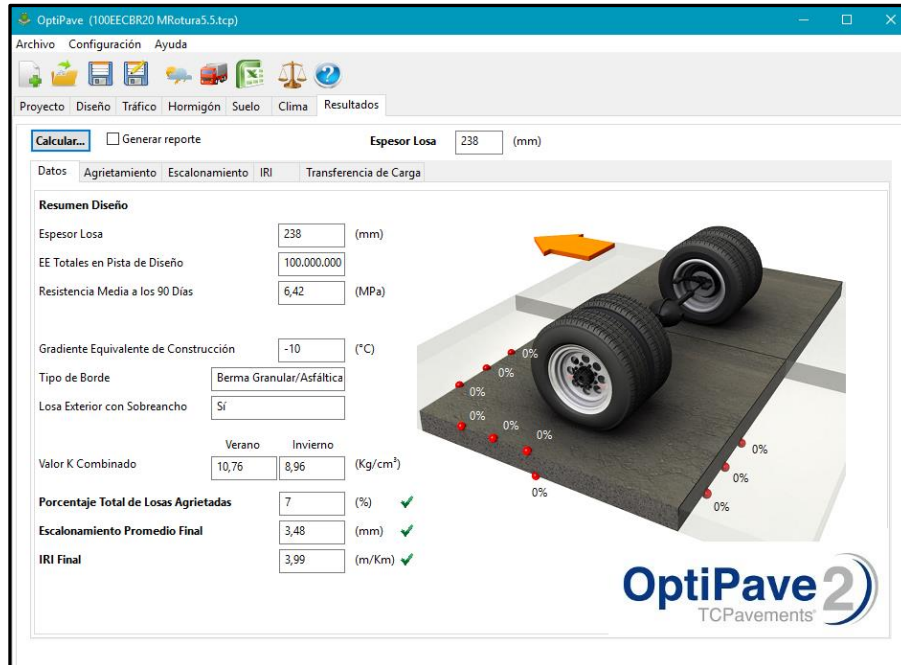


Figura G-1 Efecto de Soleras y Sobrancho
 Fuente: Manual de OPTIPAVE

En la Figura G-1, se observa que al utilizar losas con sobrancho o soleras en el borde, aumenta de forma significativa la distancia en que los vehículos se desplazan con respecto al borde del pavimento, disminuyendo significativamente los esfuerzos de borde del

pavimento y es necesario aclarar que según Westergaard siempre en el borde se obtiene el mayor esfuerzo.

Según se observa en la Figura G-2, el diseño de un pavimento de losas cortas para 100.000.000 EE, es posible de lograr con un módulo de rotura de 5,5 MPa, uso de sobrecancho de losa y barras de transferencia de carga.



**Figura G-2 Hipótesis de Diseño por OPTIPAVE para 100.000.000 E.E.
Fuente: Elaboración Propia**

ANEXO H: RANGOS TÍPICOS DE DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS Y SUS CONSERVACIONES

Tabla H-1 Rango Típico del Desempeño de los Pavimentos y las Diversas medidas de Conservación
Fuente: “Análisis del costo del ciclo de vida: Una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas en pavimentación” (ACPA, 2012, p.27)

Tratamiento de conservación/rehabilitación	Periodo de desempeño esperado (años)
Reconstrucción	
Reconstrucción con pavimento de asfalto	8 – 25
Reconstrucción con pavimento de hormigón	20 – 40
Conservación/rehabilitación de pavimentos de asfalto:	
Sobrecarpeta asfáltica estructural sobre pavimentos asfálticos	6 – 17
Sobrecapa de hormigón estructural sobre pavimentos asfálticos	15 – 40
Reciclado superficial sin sobrecapa	3 – 8
Sobrecarpeta de asfalto no estructural sobre pavimento de asfalto	3 – 8
Sobrecapa de hormigón no estructural sobre pavimento de asfalto	5 – 15
Reparación de baches con asfalto sin sobrecapa	4 – 8
Conservación/rehabilitación de pavimentos de hormigón:	
Sobrecarpeta asfáltica estructural sobre pavimentos de hormigón	8 – 20
Sobrecapa de hormigón sobre losas de hormigón fisuradas	15 – 40
Sobrecapa de hormigón no adherida sobre pavimentos de hormigón	15 – 40
Sobrecarpeta asfáltica no estructural sobre pavimentos de hormigón	1 – 8
Sobrecapa de hormigón adherida sobre pavimentos de hormigón	15 – 30
Restauración sin sobrecapa	5 – 15
Cepillado de la superficie de hormigón	8 – 20
Conservación/rehabilitación de pavimento compuesto:	
Sobrecarpeta asfáltica estructural sobre pavimento compuesto	8 – 20
Sobrecapa de hormigón sobre losas de hormigón fisurado	15 – 40
Sobrecapa de hormigón no adherida sobre pavimento compuesto	15 – 40
Reciclado superficial sin sobrecapa	3 – 8
Sobrecarpeta asfáltica no estructural sobre pavimento compuesto	3 – 8
Sobrecapa de hormigón no estructural sobre pavimento compuesto	5 – 15

ANEXO I: AÑO DEL CEPILLADO DEL PAVIMENTO DE HORMIGÓN TRADICIONAL

Tabla I-1 Costos Futuros Tipo de un Pavimento de Hormigón Tradicional sometido a 30.000.000 EE
Fuente: Elaboración Propia

Año	Tipo de Trabajo	Descripción del Trabajo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (M\$)	Costo Total (M\$)
1	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
2	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
3	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
4	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
5	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
5	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,699	5398
6	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
7	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
8	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
9	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
10	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
10	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,699	5398
11	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
12	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
13	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
14	Conservación	Cepillado [6 mm]	7000	m2	4,220	29540
14	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
15	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,699	5398
15	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
16	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
17	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
18	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
19	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
20	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	2000	m	2,699	5398
20	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838

Tabla I-2 Costos Futuros Tipo de un Pavimento de Hormigón Tradicional sometido a 100.000.000 EE
Fuente: Elaboración Propia

Año	Tipo de Trabajo	Descripción del Trabajo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (M\$)	Costo Total (M\$)
1	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
2	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
3	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
4	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
5	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
5	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	4000	m	2,699	10797
6	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
7	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
8	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
9	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
10	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
10	Conservación	Reemplazo Drenes	1	km	18576,500	18577
11	Conservación	Cepillado [6 mm]	14000	m2	4,220	59080
11	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
12	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
13	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
14	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
15	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	4000	m	2,699	10797
15	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
16	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
17	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
18	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
19	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838
20	Conservación	Sellado de Juntas Asfalto	4000	m	2,699	10797
20	Mantenimiento	Rutinario	1	km	2837,900	2838

Las Tablas I-1 e I-2, se presentan los resultados de las conservaciones a realizar en los pavimentos rígidos diseñados de acuerdo al método AASHTO 98. Para los 30.000.000 EE, el espesor resultante es de 25 [cm] en promedio, y para los 100.000.000 EE el espesor promedio es de 33 [cm]. Recuerde que la calibración de los modelos de deterioros de los pavimentos de hormigón sin barras de transferencia, en HDM-4, fue realizado imitando o equiparando los deterioros de los primeros nueve diseños obtenidos por MEPDG. Por ello, note que los espesores obtenidos por el diseño AASHTO 98 arrojan cepillados durante el año 14 y 11, respectivamente. Se puede concluir que los diseños por MEPDG, considerando un cepillado al año 10, resultarán en espesores menores a los pavimentos diseñados por AASHTO 98.

ANEXO J: INTERPOLACIÓN ENTRE EL AÑO DEL CEPILLADO Y EL ESPESOR DE LA LOSA

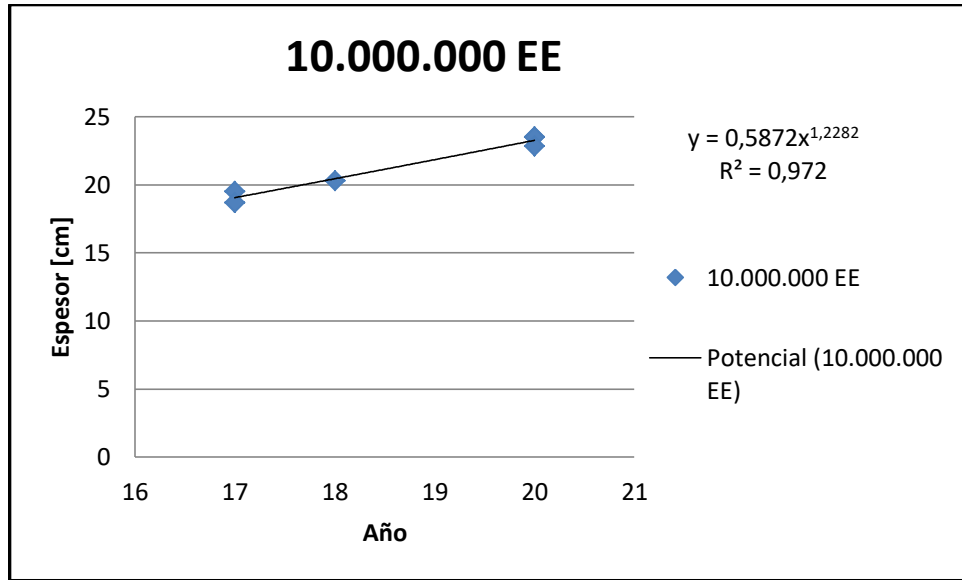


Gráfico J-1 Interpolación Año del Cepillado y Espesor de Losa para 10.000.000 E.E.

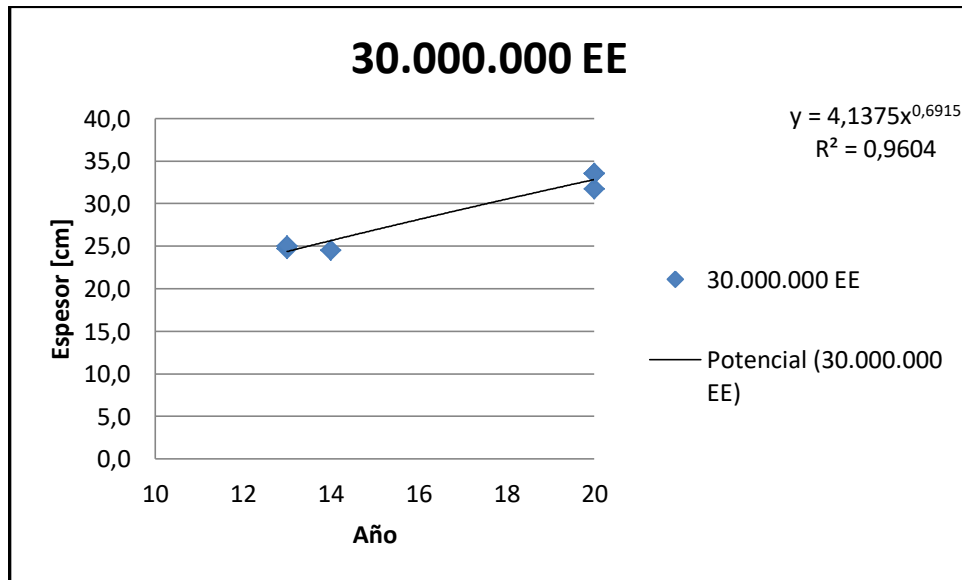


Gráfico J-2 Interpolación Año del Cepillado y Espesor de Losa para 30.000.000 E.E.

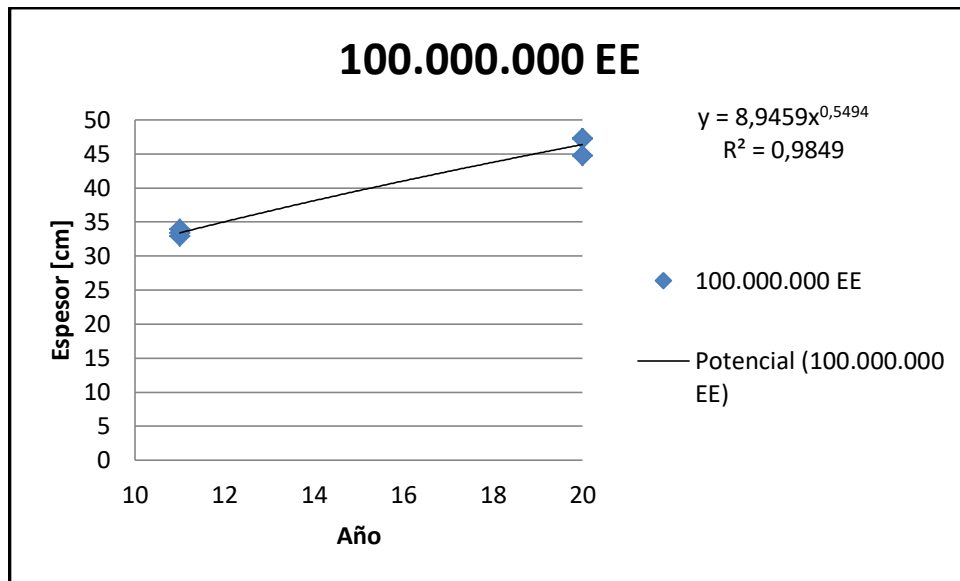


Gráfico J-3 Interpolación Año del Cepillado y Espesor de Losa para 100.000.000 E.E.

La interpolación es válida, porque el ajuste de las curvas de deterioros de AASHTO 98, fueron realizadas de acuerdo a los factores de calibración obtenidas para los diseños realizadas por MEDPG. Por consiguiente, es posible de estimar el espesor para el cual los pavimentos de hormigón diseñados por MEDPG deberán ser cepillados, al año 10 o 17, según sea el caso.