

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE**



**ANALISIS TÉCNICO – ECONÓMICO PARA LA APLICACIÓN DE
PAVIMENTOS DELGADOS EN LOSAS CORTAS EN LA
CARRETERA EL COBRE DE LA DIVISIÓN EL TENIENTE DE
CODELCO**

Memoria de Titulación presentada por
CRISTOBAL FELIPE JORQUERA ROJAS

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
OMAR TOVAR OGALDE

diciembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haber llegado a mi vida, darme la fuerza y acompañarme siempre en mi camino.

A mis padres Adriana y Rafael, por su cariño y amor incondicionales, por siempre haber creído en mí. Por su paciencia y gran apoyo durante esta etapa y a lo largo de toda mi vida. Llegar aquí no hubiera sido posible sin ellos.

A mi hermana Carolina, por su cariño y amor, por sus consejos y por acompañarme durante toda mi vida.

A mi novia Perla, por acompañarme, darme ánimo y fuerza durante toda esta etapa. Por su cariño, amor y buenos deseos.

A mi tutor Omar Tovar Ogalde, por darme esta gran oportunidad, por su paciencia, su entera disposición y gran ayuda durante el desarrollo de esta memoria.

Al personal de la Unidad Operación Carretera: don Luis Vergara, Walter Blemith, Miguel Díaz, Rocío Uribe, Néstor Ramírez, Adolfo Lara y José Aránguiz,

Al personal de hormigones Xtreme Mining DET, en especial a Humberto Cortés, por su disposición, apoyo y enorme contribución en este trabajo.

A mis amigos Marcelo Zamorano, Leonel Herrera, Cristian Cornejo y Érica Leiva, por su ayuda y por haber hecho más agradable mi estadía en la División El Teniente.

RESUMEN

La Ruta H-25, conocida como Carretera El Cobre (CEC), es actualmente la única vía que conecta la ciudad de Rancagua con el área alta de la División El Teniente (DET) de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO). Las actividades de mantención en la CEC consisten en el fresado y recapado asfáltico de 5 a 7 cm de espesor, los cuales se ven seriamente deteriorados al cabo de 5 años aproximadamente. Por esta razón, en la búsqueda soluciones de mantención más económicas y durables, Codelco DET ha solicitado un estudio de factibilidad técnico-económica acerca de la aplicación de los Pavimentos de Hormigón con Losas Cortas en la CEC.

Se realizó una comparación de los costos del ciclo de vida entre pavimentos nuevos y rehabilitados (recapados) de hormigón con losas cortas y asfalto en una zona de estudio dentro de la CEC, considerando costos iniciales de construcción y costos futuros de mantención para un periodo de análisis de 40 años. Los diseños de losas cortas se realizaron con el software OptiPave2, mientras que los de asfalto se realizaron con la guía AASHTO 2008, Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), utilizando un ligante asfáltico especificado por desempeño (Performance Grade, PG) PG 64-28 en la carpeta de rodado. Adicionalmente, se realizó una comparación de costos iniciales entre losas cortas y pavimentos de hormigón tradicionales diseñados con el método AASHTO 98.

Los resultados indican que, teóricamente, un recapado de losas cortas presenta un ahorro en el costo del ciclo de vida de 57% respecto de un recapado de asfalto de 15 cm de espesor, y de 10,7% con respecto a una reconstrucción de asfalto. Además, el costo de construcción inicial presentó un ahorro de 10,1% con respecto de esta última alternativa. Estos resultados son solo teóricos, debido a que no se cuenta con antecedentes acerca del desempeño ni de los requerimientos de mantenimiento en el largo plazo de las losas cortas en Chile. Por otro lado, para los diseños de asfalto se debió considerar un ligante PG 70-28, con el cual los deterioros en el asfalto disminuirían significativamente. Además, actualmente existen materiales asfálticos de alto desempeño, con vidas útiles muy superiores a los asfaltos convencionales considerados en este trabajo, los que están siendo utilizado en las carreteras concesionadas sometidas a altos volúmenes de tránsito. Utilizando estos materiales, se obtendrían diseños de asfalto más competitivos con los pavimentos de losas cortas.

Por otro lado, se determinó que los costos iniciales de pavimentos nuevos de losas cortas y pavimentos de hormigón tradicionales diseñados con AASHTO 98 son comparables. Sin embargo, el método AASHTO 98 está obsoleto y no calibrado en el país. Actualmente se dispone de la MEPDG calibrada para Chile, con la cual se obtienen diseños de pavimentos de hormigón tradicionales con espesores optimizados y, por lo tanto, más competitivos con las losas cortas.

Finalmente, se construyó un tramo de 100 m con losas cortas en el km 41 de la CEC. En base a la experiencia en obra, se concluye que el hormigón no fue el adecuado para el pavimento, debido al tamaño máximo nominal bajo de los áridos y el elevado contenido de cemento de la mezcla, lo cual provocó algunas fisuras por retracción en el hormigón fresco.

Palabras clave: CODELCO, División El Teniente, DET, Carretera El Cobre, CEC, diseño de pavimentos, pavimentos de hormigón, ASHTO 2008, MEPDG, losas cortas, OptiPave2, Performance Grade, PG, ciclo de vida, recapado.

ABSTRACT

Route H-25, known as Carretera El Cobre (CEC), is currently the only road that connects the city of Rancagua with the high area of the El Teniente Division (DET) of the National Copper Corporation of Chile (CODELCO). The maintenance activities in the CEC consist of 5 to 7 cm thick asphalt milling and recoating, which are seriously deteriorated after approximately 5 years. For this reason, in the search for more economical and durable maintenance solutions, Codelco DET has requested a technical-economic feasibility study about the application of concrete pavements with short slabs in the CEC.

A comparison was made of the life cycle costs between new and rehabilitated pavements (overlays) of concrete with short slabs and asphalt in a study area within the CEC, considering initial construction costs and future maintenance costs for a period of analysis of 40 years. The designs of short slabs were made with the OptiPave2 software, while the asphalt ones were made with the AASHTO 2008 guide, Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), using an asphalt binder specified by performance (Performance Grade, PG) PG 64-28 in the rolling layer. Additionally, a comparison of initial costs between short slabs and traditional concrete pavements designed with the AASHTO 98 method was made.

The results indicate that, theoretically, a short slabs overlay presents a saving in the life cycle costs of 57% with respect to an 15 cm thick asphalt overlay, and of 10.7% with respect to an asphalt reconstruction. In addition, the initial construction cost presented a saving of 10.1% with respect to this last alternative. These results are only theoretical, because there is no background on the performance or maintenance requirements in the long term of the short slabs in Chile. On the other hand, for asphalt designs a PG 70-28 binder should be considered, with which the deteriorations in the asphalt would decrease significantly. In addition, there are currently high-performance asphalt materials, with useful lives far superior to the conventional asphalts considered in this work, which are being used on concessioned roads subject to high traffic volumes. Using these materials, more competitive asphalt designs would be obtained with the paving of short slabs.

On the other hand, it was determined that the initial costs of paving of short slabs and traditional concrete pavements designed with AASHTO 98 are comparable. However, the AASHTO 98 method is obsolete and not calibrated in the country. Currently, the MEPDG calibrated for Chile is available, with which designs of traditional concrete pavements are obtained with optimized thicknesses and, therefore, more competitive with short slabs.

Finally, a 100 m section with short slabs was built at km 41 of the CEC. Based on the work experience, it is concluded that the concrete was not suitable for the pavement, due to the low nominal maximum size of the aggregates and the high cement content of the mixture, which caused some cracks due to shrinkage in the fresh concrete.

Keywords: CODELCO, El Teniente Division, DET, Carretera El Cobre, CEC, pavement design, concrete pavements, AASHTO 2008, MEPDG, short slabs, OptiPave2, Performance Grade, PG, life cycle, overlay.

GLOSARIO

AASHTO	: American Association of State Highway Transportation and Officials.
ACPA	: American Concrete Pavement Association.
CAE	: Costo Anual Equivalente
CBR	: California Bearing Ratio (Ensayo de Razón de Soporte de California)
CEC	: Carretera El Cobre.
CRCP	: Continuously Reinforced Concrete Pavements (Pavimentos de hormigón continuamente reforzados, sin juntas)
DET	: División El Teniente.
EE	: Ejes Equivalentes.
FEE	: Factor de Ejes Equivalentes.
FHWA	: Federal Highway Administration.
FWD	: Falling Weight Deflectometer (Deflectómetro de Impacto).
INE	: Instituto Nacional de Estadísticas.
IPC	: Índice de Precios al Consumidor.
IPP	: Índice de Precios al Productor.
IRI	: International Roughness Index (Índice de Rugosidad Internacional).
JPCP	Jointed Plain Concrete Pavements (Pavimentos de hormigón con juntas simples, con o sin barras de traspaso de carga)
JRCP	Jointed Reinforced Concrete Pavements (Pavimentos de hormigón con acero de refuerzo, con juntas y barras de traspaso de cargas).
MC	: Manual de Carreteras
MEPDG	: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, AASHTO 2008.
MOP	: Ministerio de Obras Públicas
	: National Cooperative Highway Research Program
NE	: Número Estructural
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program.
PCA	: Portland Cement Association.
PCC	: Portland Cement Concrete (pavimentos de concreto de cemento Portland).
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement (pavimento asfáltico recuperado).
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement
TCP	: Thin Concrete Pavements.
TMAPA	: Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (°C).
TMDA	: Tránsito Medio Diario Anual.
TMDAC	: Tránsito Medio Diario Anual de Camiones.
TMMA	: Temperatura Media Mensual del Aire (°C).
UOC	: Unidad Operación Carretera, de la División El Teniente.
VPN	: Valor Presente Neto.

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes Generales.....	1
1.2. Objetivos del Estudio.....	2
1.3. Alcances de la Memoria.....	3
1.4. Metodología de Trabajo	4
1.5. Estructura de la Memoria	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Pavimentos de Hormigón Tradicionales	8
2.1.1. Características Generales.....	8
2.1.2. Juntas.....	9
2.1.3. Desempeño y Tipos de Deterioro	9
2.1.4. Tensiones y Deformaciones – Soluciones Analíticas.....	15
2.1.5. Métodos de Diseño.....	20
2.2. Pavimentos de Hormigón con Losas Cortas.....	21
2.2.1. Modelación del Suelo	22
2.2.2. Modificaciones de Diseño	22
2.2.3. Desempeño de los Pavimentos de Losas Cortas.....	23
2.3. Recapados de Hormigón.....	24
2.3.1. Tipos de Capas de Refuerzo con Hormigón.....	24
2.3.2. Experiencia Internacional – Estado de Colorado	26
2.3.3. Otros Proyectos.....	27
2.4. Métodos de Diseño de Pavimentos del Manual de Carreteras 2017	28
2.4.1. Métodos AASHTO de 1993 y 1998.....	28
2.4.2. Parámetros Generales de Diseño de Pavimentos Flexibles	28
2.4.3. Ecuación de Diseño de Pavimentos Flexibles	33
2.4.4. Parámetros Generales de Diseño de Pavimentos Rígidos.....	34
2.4.5. Ecuación de Diseño de Pavimentos Rígidos – Método AASHTO de 1998	35
2.5. Software OptiPave2 de Diseño de Pavimentos con Losas Cortas	36
2.5.1. Mecanismos de Falla Considerados.....	36
2.5.2. Ecuaciones de Predicción de Deterioros	37
2.5.3. Parámetros de Diseño del Software	44
2.6. Diseño de Pavimentos de Asfalto – Software de la MEPDG	45
2.6.1. Visión General de la MEPDG	45
2.6.2. Niveles Jerárquicos de Datos de Entrada.....	45
2.6.3. Criterios de Desempeño y Confiabilidad.....	46
2.6.4. Ecuaciones de Deterioro Para Pavimentos Flexibles y Recapados de Asfalto	47
2.7. Especificación de Ligantes Asfálticos SUPERPAVE.....	50
2.7.1. Grados de Desempeño.....	50
2.7.2. Confiabilidad	52
2.7.3. Zonificación SuperPave	52
2.8. Análisis del Costo del Ciclo de Vida de Alternativas	53
2.8.1. Periodo de Análisis Recomendado	54
2.8.2. Valor Residual.....	54

CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO.....	56
3.1. Introducción.....	56
3.2. Carretera El Cobre (CEC).....	56
3.2.1. Tramos de la CEC.....	56
3.3. Zonificación Climática.....	58
3.4. Zona Escogida – Pista de Prueba.....	60
3.4.1. Condición Estructural Existente – Inspección Visual.....	61
3.4.2. Capas del Pavimento	61
3.5. Estimación del Nivel de Tránsito.....	62
3.5.1. Transito Medio Diario Anual (TMDA).....	62
3.5.2. Tasa de Crecimiento	64
3.5.3. Calculo de Repeticiones de Carga.....	65
3.6. Información Meteorológica	65
3.6.1. Temperaturas Medias Mensuales	66
3.6.2. Registros de Precipitaciones	67
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE PAVIMENTOS	69
4.1. Introducción.....	69
4.2. Parámetros de Diseño Generales.....	70
4.2.1. Vida de Diseño.....	70
4.2.2. Subrasante	70
4.2.3. Tránsito	70
4.2.4. Tipo de Tráfico.....	70
4.2.5. Umbrales de Deterioro y Confiabilidad.....	70
4.3. Parámetros de Diseño de la MEPDG	71
4.3.1. Parámetros Generales de Tránsito	71
4.3.2. Parámetros Generales de la Mezcla Asfáltica	72
4.3.3. Caracterización del Clima.....	73
4.3.4. Caracterización de Capas Granulares	73
4.3.5. Espectro de Carga Utilizado	74
4.3.6. Mezclas Asfálticas – Granulometría Áridos Pétreos	74
4.4. Diseños de Pavimentos de Losas Cortas en Pista de Prueba	75
4.4.1. Parámetros por Defecto OptiPave2.....	75
4.4.2. Parámetros de Diseño Específicos OptiPave2	76
4.4.3. Análisis de Zonas Climáticas.....	77
4.4.4. Análisis para Contenido de Fibra en el Hormigón	79
4.4.5. Resultados de Diseño.....	81
4.5. Diseño en Hormigón Método MC 2017 (AASHTO 98) en Pista de Prueba.....	81
4.5.1. Parámetros de Diseño.....	82
4.5.2. Resultados de Diseño.....	82
4.6. Diseño en Asfalto Método MC 2017 en Pista de Prueba	83
4.6.1. Parámetros de Diseño.....	83
4.6.2. Resultados de Diseño.....	84
4.7. Diseño de Asfalto MC 2017 – Análisis con la MEPDG	84
4.7.1. Velocidad de Circulación.....	84
4.7.2. Ligantes Asfálticos Considerados – Parámetros Volumétricos de Mezcla	84

4.7.3. Resultados de Desempeño.....	86
4.8. Diseño de Pavimento de Asfalto en Pista de Prueba Mediante la MEPDG.....	87
4.8.1. Parámetros de diseño.....	87
4.8.2. Resultados de Diseño.....	88
4.9. Diseño de Rehabilitaciones de Asfalto en Pista Principal	88
4.9.1. Estructura Existente – Parámetros de Entrada MEPDG	88
4.9.2. Alternativas de Mantenimiento Propuestas.....	89
4.9.3. Análisis MEPDG – Determinación de Periodos de Mantenimiento.....	91
4.10. Recapado con Losas Cortas de Hormigón en Pista Principal.....	93
4.10.1. Parámetros de Diseño y Consideraciones.....	93
4.10.2. Espesor de Hormigón Adoptado.....	94
4.10.3. Evaluación del Desempeño en el Tiempo	95
4.11. Reconstrucción con Losas Cortas de Hormigón en Pista Principal	98
4.11.1. Parámetros de Diseño.....	98
4.11.2. Espesor de Hormigón Adoptado.....	98
4.11.3. Evaluación del Desempeño en el Tiempo	99
4.12. Reconstrucción en Hormigón – Solución Tradicional (AASHTO 98).....	101
4.12.1. Parámetros de Diseño.....	101
4.12.2. Espesor de Hormigón Adoptado.....	101
4.12.3. Serviciabilidad en el Tiempo.....	102
CAPÍTULO 5. EXPERIENCIA EN OBRA	105
5.1. Introducción.....	105
5.2. Diseño con OptiPave2	105
5.2.1. Características Geométricas.....	105
5.2.2. Parámetros de Diseño.....	106
5.2.3. Espesor de las Losas.....	106
5.3. Actividades Realizadas.....	107
5.3.1. Remoción del Pavimento Asfáltico Existente	107
5.3.2. Preparación del Terreno	109
5.3.3. Preparación de la Subrasante.....	110
5.3.4. Pavimentación.....	111
5.4. Resultados	117
5.5. Principales Inconvenientes Observados	119
5.5.1. Hormigonado	119
5.5.2. Protección y Curado.....	121
5.5.3. Cortes en el pavimento.....	121
5.5.4. Junta de Construcción.....	121
5.5.5. Imprevistos.....	122
5.6. Recursos Utilizados.....	122
5.6.1. Personal	122
5.6.2. Materiales	122
5.6.3. Herramientas.....	123
5.6.4. Equipos	123
5.7. Costo del Proyecto	123
5.8. Ensayos de Hormigón en Laboratorio	125

5.8.1. Características del Hormigón	125
5.8.2. Resultados.....	125
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE COSTOS	127
6.1. Introducción.....	127
6.2. Costos Iniciales Diseños en Pista de Prueba	127
6.2.1. Diseños Analizados	127
6.2.2. Itemizado Alternativas.....	128
6.2.3. Resumen de Costos Iniciales de Construcción.....	131
6.3. Costos Iniciales Alternativas de Rehabilitación en Pista Principal	132
6.3.1. Resumen de Costos Iniciales	133
6.4. Costos del Ciclo de Vida de las Alternativas en la Pista Principal	137
6.4.1. Proyección del Índice de Precios al Consumidor (IPC)	137
6.4.2. Proyección del Índice de Precios al Productor para Mezclas Bituminosas (IPP).....	138
6.4.3. Costos Ciclo de Vida de Alternativas en Pista Principal	140
6.4.4. Valor Residual.....	144
6.4.5. Comentarios.....	145
6.5. Análisis de Sensibilidad – Precio Máximo de Colocación.....	146
6.6. Análisis Comparativo de Tiempos de Ejecución Asfalto/Hormigón.....	146
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	149
REFERENCIAS.....	156
ANEXO A. Parámetros de Diseño	158
A.1. Parámetros de Diseño Software OptiPave2.....	158
A.2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del MC de 2017 – Variables de Diseño	169
A.3. Método de Diseño de Pavimentos Rígidos del MC de 2017 – Tensiones de Borde y Verificación de Escalonamiento.....	172
ANEXO B. ESTIMACIONES EN ZONA DE ESTUDIO.....	177
ANEXO C. PARÁMETROS MEPDG.....	188
C.1. Caracterización del Tránsito de la FHWA.....	188
C.2. Especificaciones Agregados Pétreos.....	190
ANEXO D. INFORMES Y CERTIFICADOS.....	192
ANEXO E. COSTOS KM 41	206
E.1. Costos Pavimentación km 41	206
E.2. Rendimientos	207
E.3. Costos Partidas – Pista de Prueba	207
E.4. Costos Partidas – Pista Principal.....	212

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Vida de diseño según Clasificación de la Ruta (MC-V3).....	30
Tabla 2-2: Pesos Máximos por Tipo de Eje.	30
Tabla 2-3: Pavimentos Flexibles – Valores de Confiabilidad, Zr y S0 (MC-V3).....	32
Tabla 2-4: Pavimentos Rígidos – Valores de Confiabilidad, Zr y S0 (MC-V3).....	34
Tabla 2-5: Resistencia a la Flexotracción Recomendada en Pavimentos de Hormigón (MC-V3) ...	35
Tabla 2-6: Criterios de Desempeño de la MEPDG – Pavimentos Flexibles (AASHTO, 2008).....	46
Tabla 2-7: Valores recomendados de Confiabilidad de la MEPDG (AASHTO, 2008).....	46
Tabla 2-8: Ligantes Superpave – Grados de Desempeño PG (MC-V8).....	51
Tabla 3-1: Estructura del Pavimento Existente en Pista de Prueba.....	62
Tabla 3-2: Evaluación Estructural km 41 a km 42 (APSA, 2011).....	62
Tabla 3-3: TMDA ingreso DET 2016 Control Maitenes.	63
Tabla 3-4: Personal Transportado a cada Sector de la DET.....	63
Tabla 3-5: Parque Vehicular de Camiones DET año 2017.....	63
Tabla 3-6: TMDA en la Zona de Estudio (km 41) – Dirección Sewell.	64
Tabla 3-7: Clasificación de Vehículos en la Zona de Estudio, según clasificación FHWA.....	65
Tabla 3-8: Ejes Equivalentes Acumulados Pista de Prueba y Pista Principal Adyacente.	65
Tabla 3-9: Horas al Año con Temperaturas menores a 0°C, año 2011	67
Tabla 3-10: Precipitaciones Anuales y Días con precipitación Estación Barahona.....	67
Tabla 4-1: Umbrales de Deterioro Máximos Admisibles para Pavimentos Flexibles y Rígidos.....	71
Tabla 4-2: Parámetros de la MEPDG por Defecto – Configuración de Ejes.	71
Tabla 4-3: Parámetros MEPDG por Defecto – N° de Ejes Promedio por Tipo de Vehículo.	72
Tabla 4-4: Parámetros MEPDG por Defecto – Propiedades Mezclas Asfálticas.	72
Tabla 4-5: Parámetros MEPDG – Caracterización de Bases y Subbases.....	74
Tabla 4-6: Parámetros de Diseño MEPDG – Granulometría Mezclas Asfálticas.	74
Tabla 4-7: Parámetros de Diseño Utilizados por Defecto en OptiPave2.	75
Tabla 4-8: Pista de Prueba – Parámetros de Diseño Específicos OptiPave2.....	76
Tabla 4-9: Deterioros Diseños OptiPave2 año 20 – Análisis de Climas.	77
Tabla 4-10: Deterioros Diseños OptiPave2 año 20 – Análisis de Uso de Fibra.	79
Tabla 4-11: Diseño Pista de Prueba – Método MC 2017 – AASHTO 98.....	82
Tabla 4-12: Parámetros de Diseño Asfalto Pista de Prueba – Método MC 2017.....	83
Tabla 4-13: Parámetros MEPDG – Características Volumétricas Mezclas Asfálticas.	85
Tabla 4-14: Diseño MC 2017 - Resultados de Desempeño de la MEPDG.....	86
Tabla 4-15: Resumen Mantenciones Asfalto en Pista Principal – Alternativas 1 a 4.....	91
Tabla 4-16: Recapado de Losas Cortas en Pista Principal – Parámetros de Tránsito.	93
Tabla 4-17: Recapado Losas Cortas en Pista Principal – Desempeño según OptiPave2.	98
Tabla 4-18: Reconstrucción con Losas Cortas Pista Principal – Desempeño según OptiPave2.	101

Tabla 5-1.- Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Frecuencia Camiones Mixer 5 de Dic.	113
Tabla 5-2.- Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Frecuencia Camiones Mixer 6 de Dic.	113
Tabla 5-3.- Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Resumen de Costos.....	124
Tabla 5-4.- Ensayos de Laboratorio - Resistencia Compresión y Flexotracción.	126
Tabla 6-1.- Análisis de Costos – Resumen Dimensiones de Diseños en Pista de Prueba.	128
Tabla 6-2.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 1: Diseño en Asfalto con la MEPDG.....	129
Tabla 6-3.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 2: Losas Cortas H50 Ejecutado.	129
Tabla 6-4.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 3: Losas Cortas HF5 Proyectado.	130
Tabla 6-5.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 5: Diseño MC 2017 Hormigón HF 5.0.	130
Tabla 6-6.- Ahorro de Costos Iniciales entre Alternativas de Pavimentos en Pista de Prueba.....	132
Tabla 6-7.- Costos Rehabilitación Alternativa 1 – Recapado Asfalto e = 100 mm.	133
Tabla 6-8.- Costos Rehabilitación Alternativa 2 – Recapado Asfalto e = 150 mm.	134
Tabla 6-9.- Costos Rehabilitación Alternativa 3 – Recapado Asfalto e = 180 mm.	134
Tabla 6-10.- Costos Rehabilitación Alternativa 4 – Reconstrucción Asfalto.	134
Tabla 6-11.- Costos Rehabilitación Alternativa 5 – Recapado Losas Cortas No Adherido.	135
Tabla 6-12.- Costos Rehabilitación Alternativa 6 – Reconstrucción Ho. con Losas Cortas.	135
Tabla 6-13.- Costos Rehabilitación Alternativa 7 – Reconstrucción Ho. Diseño AASHTO 98.....	136
Tabla 6-14.- Resumen Costos Ciclo de Vida Rehabilitaciones en Pista Principal.	142
Tabla 6-15.- Costos en Pista Principal – Ahorro entre Alternativas de Pavimentación.	143
Tabla 6-16.- Estimación Valor Residual – Costo Estimado de Capas de Pavimento.	145
Tabla 6-17.- Estimación Tiempos de Ejecución - Reconstrucción en Asfalto.	147
Tabla 6-18.- Estimación Tiempos de Ejecución – Reconstrucción con Losas Cortas.	147
Tabla A-1: Tipos de Borde del Pavimento considerados en OptiPave2	159
Tabla A-2: Valores recomendados de IRI inicial (MC-V7)	160
Tabla A-3: Máximo de Losas Agrietadas según la Importancia de la Vía (MINVU, 2016).....	160
Tabla A-4: Valores de Confiabilidad Recomendados para Tipos de Deterioro en OptiPave2 (TCPavements, 2014).....	161
Tabla A-5: Valores recomendados de Distribución Lateral del Tráfico en OptiPave2 (TCPavements, 2014).	162
Tabla A-6: Factores de Resistencia a la Erosión de Capas bajo el Pavimento	166
Tabla A-6: Factores de Resistencia a la Erosión de Capas bajo el Pavimento (MINVU, 2016).	168
Tabla A-7: Gradiente Equivalente de Construcción para Distintas Condiciones Climáticas (TCPavements, 2014).....	168
Tabla A-11: Coeficientes de Drenaje para Bases – Regiones V y VI (MC-V3).....	169
Tabla A-12: Coeficientes Estructurales para Capas de Pavimento Asfáltico (MC-V3).....	170
Tabla A-12: Pavimentos de Hormigón AASHTO 98 - Factor de ajuste por tipo de berma (MC-V3).	174
Tabla A-13: Coeficientes de Drenaje AASHTO modificado (MC-V3).....	175

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Pavimento de Hormigón (JPCP) con o sin Barras de Traspaso de Carga (Delatte, 2007).	9
Figura 2-2: Pavimentos de Hormigón - Agrietamiento de Esquina (Delatte, 2007).	11
Figura 2-3: Pavimentos de Hormigón – Agrietamiento Longitudinales (Delatte, 2007).	11
Figura 2-4: Pavimentos de Hormigón-Agrietamiento Transversales (Delatte, 2007).	12
Figura 2-5: Pavimentos de Hormigón-Desprendimiento en las Juntas (Delatte, 2007).	13
Figura 2-6: Pavimentos de Hormigón - Agrietamiento por Retracción (Delatte, 2007).	13
Figura 2-7: Pavimentos de Hormigón-Escalamiento (Delatte, 2007).	14
Figura 2-8: Pavimentos de Hormigón-Escalamiento de Juntas Transversales (Delatte, 2007). ...	15
Figura 2-9: Alabeo por Temperatura y Humedad en Losas de Hormigón (Mack, 2009).	16
Figura 2-10: Factor de Corrección por Esfuerzo de Alabeo (Delatte, 2007).	17
Figura 2-11: Carga en Losas de Hormigón: Esquina, Interior y Borde (Delatte, 2007).	18
Figura 2-12: Losas Tradicionales vs Losas Cortas Cargadas Mecánica y Térmicamente (Covarrubias V. J. , 2012).	21
Figura 2-13: Capas de Refuerzo con Hormigón (Fick & Harrington, 2014).	25
Figura 2-14: Whitetopping Adherido Neosho, Misuri (1999) al año 2012 (Chang, 2017).	27
Figura 2-15: Whitetopping Adherido SH 121, Wadsworth Boulevard. Denver, Colorado (2011) al año 2012 (Chang, 2017).	27
Figura 2-16: Diagrama de Flujo del funcionamiento de OptiPave2 (TCPavements, 2014).	38
Figura 2-17: Diagrama de Flujo del Modelo de Escalonamiento y Transferencia de Carga (TCPavements, 2014).	41
Figura 2-18: Zonificación Superpave para Chile, 98% de Confiabilidad (Delgadillo et al, 2016)...	53
Figura 3-1: Carretera El Cobre Presidente Eduardo Frei Montalva.	57
Figura 3-2: Clasificación Climática de Köppen para Chile (Rioseco & Tesser, 2006).	59
Figura 3-3: Zona de Estudio y Pista Auxiliar de Tránsito Lento (Pista de Prueba).	60
Figura 3-4: Pista de Prueba – Condición Existente.	61
Figura 3-5: Simulación Congestión Vial en la CEC, Periodo 2011 – 2022.	64
Figura 3-6: Temperaturas Medias Mensuales Estación Barahona.	66
Figura 4-1: Temperaturas Estación Barahona y Estación Virtual de la MEPDG.	73
Figura 4-2: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Losas Agrietadas según Clima.	78
Figura 4-3: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Escalonamiento Prom. según Clima.	78
Figura 4-4: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – IRI según Clima.	79
Figura 4-5: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Agrietamiento según Uso de Fibra.	80
Figura 4-6: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Escalonamiento según Uso de Fibra.	80
Figura 4-7: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – IRI según Uso de Fibra.	80
Figura 4-8: Diseño Pavimento de Losas Cortas de Hormigón en Pista de Prueba.	81
Figura 4-9: Diseño Hormigón Pista de Prueba MC 2017 – Espesor Capas.	83

Figura 4-10: Diseño Asfalto Método MC 2017 Pista de Prueba – Espesor Capas.	84
Figura 4-11: Diseño MC 2017 con Asfalto Pen 60-70 – Ahuellamiento y Grietas por Fatiga.....	87
Figura 4-12: Diseño MC 2017 con Asfalto PG 64-28 – Ahuellamiento y Grietas por Fatiga.....	87
Figura 4-13: Diseño Asfalto MEPDG en Pista de Prueba – Espesor Capas.....	88
Figura 4-14: Estructura de Asfalto Existente en Pista Principal (km 41).....	89
Figura 4-15: Mantenimiento en Asfalto Pista Principal – Alternativas 1 y 2.....	90
Figura 4-16: Mantenimiento en Asfalto Pista Principal – Alternativas 3 y 4.....	90
Figura 4-17: Resultados MEPDG Pista Principal – Alternativa 2: Recapado 150 mm	93
Figura 4-18: Diseño Pista Principal OptiPave2 – Parámetros del Suelo.	94
Figura 4-19: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – Esquema Pavimento.	95
Figura 4-20: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – Agrietamiento vs Tiempo.	96
Figura 4-21: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – Escalonamiento vs Tiempo.....	97
Figura 4-22: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – IRI vs Tiempo.	97
Figura 4-23: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – Esquema Pavimento.	99
Figura 4-24: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – Agrietamiento vs Tiempo.	99
Figura 4-25: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – Escalonamiento vs Tiempo. ..	100
Figura 4-26: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – IRI vs Tiempo.	100
Figura 4-27: Reconstrucción Hormigón AASHTO 98 Pista Principal – Esquema Pavimento.	102
Figura 4-28: Reconstrucción AASHTO 98 Pista Principal – Evolución Serviciabilidad.	103
Figura 4-29: Reconstrucción Hormigón AASHTO 98 Pista Principal – Evolución IRI.....	103
Figura 5-1: Pavimento de Losas Cortas en Pista de Prueba – Esquema en Planta.	105
Figura 5-2: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Cortes de Asfalto Existente.	107
Figura 5-3: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Retiro de Asfalto Existente.	108
Figura 5-4: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Franja de Asfalto de Mayor Espesor.	109
Figura 5-5: Inconvenientes Pavimentación con Losas Cortas – Berma Asfáltica Antigua.....	110
Figura 5-6: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Preparación de la Subrasante	111
Figura 5-7: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Organización Personal de Colocación.....	112
Figura 5-8: Pavimentación con Losas Cortas en km 41 - Colocación Hormigón.....	112
Figura 5-9: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Terminación.	114
Figura 5-10: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Textura Superficial.	115
Figura 5-11: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Aplicación Membrana de Curado.	116
Figura 5-12: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Junta de Construcción.	116
Figura 5-13: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Cortes Transversales (izquierda) y Longitudinales (derecha) del Pavimento.	117
Figura 5-14: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Pavimento Terminado.	118
Figura 5-15: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Cepillado de la Superficie.	118
Figura 5-16: Inconvenientes Pavimentación km 41 - Junta Fría por Retraso de Camión Mixer.	119
Figura 5-17: Inconvenientes Pavimentación km 41 – Problemas de Vibrado del Hormigón.....	120

Figura 5-18: Inconvenientes Pavimentación km 41 – Accidente Martes 6 de diciembre.	122
Figura 5-19: Pavimentación Hormigón en Losas Cortas km 41 – Costos (con cepillado).....	124
Figura 5-20: Pavimentación Hormigón en Losas Cortas km 41 – Costos (sin cepillado).....	124
Figura 5-21: Ensayos de Hormigón en Laboratorio – Compresión Cilíndrica y Flexotracción.	126
Figura 6-1: Pista de Prueba km 41 – Resumen Costos Iniciales Alternativas.	131
Figura 6-2: Rehabilitaciones Pista Principal - Costos Iniciales.	137
Figura 6-3: Serie de Valores Mensuales IPC Periodo 2010 – 2018.....	138
Figura 6-4: Pitch Asfáltico Periodo 2014 – 2016.	139
Figura 6-5: Variación IPP Mezclas Bituminosas Dic. 2016 – Mar. 2018.	140
Figura 6-6: Costos Ciclo de Vida – Recapado de Losas Cortas vs Recapados Asfalto.	141
Figura 6-7: Costos Ciclo de Vida – Recapado de Losas Cortas vs Pavimentos Nuevos.....	141
Figura 6-8: Alternativas de Pavimentación en Pista Principal – VPN en 40 Años.....	142
Figura 6-9: Alternativas de Pavimentación en Pista Principal – CAE en 40 años.....	143
Figura A-1: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Tipo de Pavimento	158
Figura A-2: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Tráfico	161
Figura A-3: Distribución Lateral típica del Tránsito de un Pavimento de Hormigón (TCPavements, 2014).	162
Figura A-4: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Hormigón.....	163
Figura A-5: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Hormigón.....	165
Figura A-6: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Clima	167
Figura A-7: Ábaco de obtención de NE mínimo de Asfalto, TMAPA 14°C (MC-V3).....	171

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

Uno de los mejores periodos de desarrollo de los pavimentos de hormigón en Chile corresponde a la década de 1980, en la cual hubo avances a nivel mundial en esta materia y que llevaron al país a construir cerca del 80% de la red vial a base de hormigón (EMB, 2009).

Los pavimentos de hormigón presentan numerosas ventajas, entre las cuales destacan su resistencia, durabilidad, mejor iluminación, seguridad vial, rigidez y estabilidad a lo largo del tiempo. Sin embargo, su uso se fue descartando poco a poco debido a que el asfalto era mejor evaluado en términos económicos. Sin embargo, estas evaluaciones se sustentaban en una comparación de costos iniciales, y no consideraban los costos del ciclo de vida de las alternativas del pavimento, las cuales, para el caso de hormigón, se reducen prácticamente a cero a lo largo de su vida útil.

Los métodos de diseño de pavimentos adoptados en Chile por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través del Manual de Carreteras, se basan principalmente en los métodos de diseño desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en Estados Unidos, con algunas adaptaciones a las condiciones nacionales. Para pavimentos de asfalto se adopta el método de diseño AASHTO de 1993 (Guide for the Design of Pavement Structures), mientras que para pavimentos de hormigón se considera el método AASHTO en su versión de 1998 (Supplement to the AASHTO Guide for the Design of Pavements). Estos métodos de diseño se basaban en ecuaciones empíricas de desempeño, determinadas en base a los resultados obtenidos de análisis en circuitos de prueba construidos entre 1958 y 1960 en Illinois, Estados Unidos. Sin embargo, en la década de 1980 la AASHTO reconoció la necesidad de incorporar principios de teoría mecanicista en los métodos de diseño de pavimentos, incorporando metodologías que relacionen las respuestas mecánicas del pavimento con el deterioro de este a lo largo de su vida útil.

Para satisfacer esta necesidad, la AASHTO, en conjunto con la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y la Federal Highway Administration (FHWA), patrocinaron el desarrollo de un método empírico-mecanicista de diseño de pavimentos, bajo los proyectos de la NCHRP 1-37A, 1-40A, 1-40B, y 1-40D. Los resultados de esta investigación dieron origen a la Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), publicada en el año 2008 y que actualmente es la herramienta de diseño empírico mecanicista de pavimentos más avanzada (AASHTO, 2008). En los últimos años se realizaron diversos proyectos y memorias de título en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) en el marco de la implementación de esta guía de diseño en Chile. Actualmente, la MEPDG se encuentra calibrada para el diseño de pavimentos de hormigón tradicionales en el país. Su implementación se llevó a cabo durante entre los años 2011 y 2014 bajo el proyecto Innova – Chile Corfo 11BPC-10220 (Delgadillo et al, 2014).

En forma paralela, dentro de la UTFSM se han desarrollado diversas investigaciones referentes al desarrollo e implementación del sistema de especificación de mezclas asfálticas SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) en Chile, un sistema más avanzado que la clasificación de ligantes asfálticos por grado de viscosidad utilizada actualmente en el país. El sistema Superpave se basa en el desempeño del ligante asfáltico, de acuerdo a las temperaturas esperadas en

la zona del proyecto. Incluye nuevos ensayos que buscan predecir el comportamiento del ligante para deterioros característicos de la mezcla asfáltica, tales como agrietamiento por fatiga, ahuellamiento y agrietamiento térmico.

Finalmente, en materia de pavimentos de hormigón, con el fin de reducir los efectos de interacción de cargas de tránsito y tensiones de alabeo de losas, se propuso una nueva metodología de diseño de losas optimizadas de hormigón (en adelante losas cortas), definiendo la geometría según el tráfico de camiones esperado. En este enfoque de diseño, el tamaño de las losas se elige de tal manera que cada losa sea cargada por un solo set de ruedas por eje de camión, reduciendo los esfuerzos de tracción en las losas y las tensiones de alabeo debido a la menor dimensión de estas (Covarrubias V., 2012). Este método de diseño fue validado en base a resultados de desempeño de circuitos de prueba en Illinois, Estados Unidos, y al desarrollo de un modelo de elementos finitos para el análisis de tensiones, los cuales sirvieron para el desarrollo y calibración del software de diseño de pavimentos de hormigón de losas cortas OptiPave. Este software ha estado sujeto a mejoras en el tiempo, por lo que actualmente se cuenta con su versión actualizada OptiPave2 (TCPavements, 2014). A la fecha se han llevado a cabo 167 proyectos de pavimentación con losas cortas en Chile, entre los que se tiene proyectos urbanos, estacionamientos, caminos de bajo tránsito, carreteras, entre otros. Dentro de los proyectos de mayor envergadura se encuentra la repavimentación de la ruta 60-Ch Camino La Pólvara ejecutada en 2016, la cual consistió en la rehabilitación de esta ruta con una capa de refuerzo (o recapado) no adherida de 23 cm de hormigón con fibra sobre el pavimento asfáltico existente (Del Río & Covarrubias V., 2016).

A la luz de estos antecedentes, y considerando el estado avanzado de deterioro en la CEC, los presupuestos anuales cada vez más limitados disponibles para la mantención vial de esta ruta, el impacto en el flujo vehicular que genera la ejecución de actividades de mantenimiento debido a la calzada única bidireccional que compone esta ruta, en este trabajo se realizará un análisis técnico económico acerca de la aplicación de los pavimentos de hormigón de losas cortas dentro de la CEC.

1.2. Objetivos del Estudio

Objetivo General

Determinar la factibilidad de emplear pavimentos de hormigón con losas cortas en la Carretera El Cobre como alternativa de conservación, mantención y/o rehabilitación de pavimentos de mejor desempeño y durabilidad, y menor costo en el tiempo, dadas las características del sector y los materiales disponibles.

Objetivos Específicos

Estudiar el comportamiento de ligantes asfálticos especificados por viscosidad y por desempeño ante distintos tipos de deterioro, mediante el uso de la MEPDG, determinando la mezcla de mejor desempeño.

Generar estructuras de pavimentos nuevos de asfalto diseñados con la MEPDG y pavimentos de hormigón con losas cortas con el software OptiPave2 equivalentes en términos de tránsito.

Presentar soluciones de pavimentos nuevos y rehabilitados en asfalto y hormigón en losas cortas sobre el asfalto existente en un tramo específico de la CEC, con los softwares de diseño mencionados anteriormente.

Comparar en términos económicos todas las alternativas de asfalto y de hormigón obtenidas, evaluando tanto los costos iniciales como costos futuros de mantenimiento de cada alternativa presentada.

Presentar diseños de pavimentos de hormigón tradicionales y realizar una comparación económica con diseños de pavimentos de hormigón mediante AASHTO 2008 y con losas cortas.

Evaluar la factibilidad técnica de aplicación de los pavimentos de losas cortas en función de las características de los hormigones suministrados en la DET, tiempos de ejecución y terminación final, mediante la construcción de un tramo de prueba en la CEC.

1.3. Alcances de la Memoria

La presente memoria de título se enfoca en realizar un análisis de factibilidad técnico económica de aplicación de los pavimentos de hormigón con losas cortas dentro de la CEC, principal ruta que conecta la ciudad de Rancagua con las instalaciones ubicadas en el área alta de la DET de Codelco. Dicho análisis consiste principalmente en una comparación directa de costos, tanto de inversión inicial como costos, entre alternativas de hormigón TCP y alternativas de asfalto, para soluciones de pavimentos nuevos y rehabilitados.

Como punto de partida se ha seleccionado una zona de estudio específica dentro del área alta de la División, ubicada entre los kilómetros 41 y 42 de la carretera. Dentro de este tramo se encuentra ubicada una pista de tránsito lento de camiones, denominada en este trabajo como Pista de Prueba. Para efectos de este estudio, se realizarán diseños de pavimentos nuevos en la pista de prueba y en la pista principal adyacente, con dirección hacia las zonas más altas de la DET. Adicionalmente realizaron diseños de rehabilitaciones en la pista principal, a modo de presentar un escenario real de mantenimiento y determinar los costos involucrados en función de la predicción del desempeño del pavimento. Para seleccionar los parámetros de entrada necesarios para los diseños de pavimentos, se realizó un levantamiento de información relativa al nivel de tránsito, variables climáticas y condiciones existentes del pavimento dentro de la zona de estudio, en base a información, antecedentes y estudios disponibles dentro de la DET.

Los diseños de pavimentos asfálticos nuevos y rehabilitados se realizaron con el software MEPDG de la AASHTO de 2008 (versión 2.3), método empírico-mecanicista actualmente en proceso de implementación en Chile. Para el diseño de pavimentos nuevos de asfalto, se comenzó con un diseño preliminar en la pista de prueba, realizado con el método descrito en el Manual de Carreteras edición 2017 (MOP, 2017), basado en su mayoría en el método AASHTO de 1993. Este diseño fue

analizado con la MEPDG utilizando mezclas asfálticas con asfaltos tradicionales y mezclas asfálticas con asfaltos Superpave.

Los diseños de pavimentos de hormigón con losas cortas se realizaron mediante el software empírico-mecanicista OptiPave2.

La rehabilitación considerada en el ciclo de vida de pavimentos asfálticos corresponde al fresado y recapado de parte del espesor del asfalto existente, mientras que, para pavimentos de hormigón, se ha considerado el cepillado de la superficie del pavimento.

Para el análisis económico, se han considerado antecedentes de precios de materiales, maquinaria y mano de obra dentro de la DET a diciembre de 2017, junto con otros antecedentes de precios y tarifas históricos extraídos de bases técnicas de proyectos de pavimentación ya ejecutados en el país. Para el análisis de costos a largo plazo se ha tenido presente la variación histórica del Índice de Precios al Consumidor (IPC) e Índice de Precios al Productor (IPP) para mezclas bituminosas, los cuales están disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

Finalmente se describe la experiencia recopilada en obra durante la construcción de un tramo de 100 metros de pavimento de hormigón con losas cortas en la pista de prueba dentro de la zona de estudio, la cual fue diseñada previamente con el software OptiPave2, incorporando en el diseño las variables de clima, nivel de tránsito, características de soporte de la subrasante y del hormigón suministrado para la obra. La evaluación del desempeño en el tiempo para esta pista, vale decir, el seguimiento y medición de deterioros tales como porcentaje de losas agrietadas (longitudinales, transversales y de esquina), mediciones de escalonamiento y regularidad superficial (IRI), quedan fuera del alcance de este trabajo.

1.4. Metodología de Trabajo

La metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos enunciados se describe a continuación:

- Revisión bibliográfica de estudios, manuales, y textos relacionados con las principales características de pavimentos de hormigón y de asfalto, métodos de diseño de pavimentos de la MEPDG y software OptiPave2, criterios de selección de variables de entrada, procedimientos de evaluación económica, etc. Realizar en paralelo una recopilación de antecedentes relevantes disponibles en la DET, tales como estudios de tránsito, listado de precios actualizado, informes y/o certificados de mezclas asfálticas e información de variables climáticas de las estaciones meteorológicas existentes en el área alta de la División.
- Elección de una Zona de Estudio dentro de la CEC y posterior determinación de parámetros climáticos, estimación del tránsito y caracterización de capas granulares y asfálticas de los pavimentos en dicha zona en dicha zona.
- Diseño de pavimentos nuevos de asfalto y hormigón en la pista de prueba, utilizando la información recolectada en el punto anterior como datos de entrada, utilizando estos datos en los softwares de diseño de la MEPDG y OptiPave2.

- Diseño de rehabilitaciones sobre el pavimento existente, considerando el estado actual de este último y considerando algunas variables de diseño utilizadas en el punto anterior, tales como por ejemplo el clima de la zona.
- Estimación de Costos de construcción inicial de los diseños de pavimentos nuevos y rehabilitados obtenidos con los métodos de diseño respectivos, a través de un análisis de precios unitarios, considerando antecedentes y listas de precios vigentes de materiales, maquinaria, mano de obra, entre otros, de las distintas empresas contratistas que prestan servicios dentro del área alta de la DET.
- Estimación de fechas y costos futuros para los diseños de rehabilitaciones sobre el pavimento asfáltico existente, en base a la predicción de los deterioros de cada tipo de pavimento utilizados por cada software, y a la proyección futura de las variaciones del Índice de Precios al Consumidor (IPC), e Índice de Precios de Materiales e Insumos de Construcción (IPMIC) disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

1.5. Estructura de la Memoria

El desarrollo de este estudio se organiza en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción, antecedentes generales, alcances de la memoria y metodología de este estudio.
- Capítulo 2: Revisión bibliográfica acerca de los principales tópicos utilizados en el desarrollo de esta memoria: pavimentos de hormigón tradicionales, pavimentos de hormigón con losas cortas, método de diseño MEPDG para pavimentos de asfalto, software OptiPave2 de diseño de pavimentos de hormigón con losas cortas, y métodos de diseño de pavimentos descritos en el Manual de Carreteras de 2017.
- Capítulo 3: Descripción de las características generales de la Carretera El Cobre, tramos y características climáticas. Posteriormente se realiza una descripción de la Zona de Estudio elegida dentro de la CEC para el diseño de pavimentos presentados en este trabajo, para finalmente presentar los criterios, procedimientos y resultados de la estimación del tránsito, obtención de variables climáticas y condiciones de soporte del suelo y capas granulares del sector elegido.
- Capítulo 4: Se presentan resultados de los distintos diseños de pavimentos nuevos y rehabilitados de hormigón con losas cortas y asfalto realizados con los métodos de diseño OptiPave2 y MEPDG, junto a los parámetros de diseño utilizados en cada método. Para pavimentos asfálticos se presenta además la evaluación del comportamiento de un diseño según el método descrito en el MC de 2017, evaluando ligantes asfálticos especificados por viscosidad y por desempeño (Superpave). Para el diseño de pavimentos de losas cortas, se

analizaron diseños utilizando tres tipos de clima que ofrece el programa, y se analizó el desempeño del pavimento para mezclas de hormigón con y sin fibra.

- Capítulo 5: Se describe la experiencia en terreno durante la construcción de un tramo de prueba de pavimento de hormigón con losas de geometría optimizada: materiales utilizados, procedimiento constructivo y principales inconvenientes observados durante la obra.
- Capítulo 6: Se presenta en análisis comparativo de costos entre las alternativas de asfalto y hormigón, junto con el análisis de precios unitarios asociado. Se presenta además el análisis estadístico de índices de variación de precios utilizados y los valores adoptados para el cálculo de costos futuros de mantenimiento asociados a las alternativas de rehabilitación. La evaluación económica de las alternativas de rehabilitación para cada alternativa se presenta en términos de Valor Presente Neto (VPN) y Costo Anual Equivalente (CAE).
- Capítulo 7: Conclusiones y comentarios acerca del estudio realizado.
- Referencias
- Glosario
- *Anexo A:* Se organiza en tres secciones. La sección A.1 Contiene una descripción de cada uno de los parámetros de diseño utilizados en el software OptiPave2 y valores recomendados en la sección ayuda del programa, empleados durante la investigación. La sección A.2 contiene algunos parámetros y procedimientos específicos del método de diseño de pavimentos de asfalto descrito en el volumen 3 del Manual de Carreteras edición 2017 (MC-V3). Finalmente, en la sección A.3 se describen algunos parámetros y procedimientos relativos al método de diseño de pavimentos rígidos criterios descrito en el mismo manual, junto con algunas ecuaciones de obtención de tensiones de borde de las losas y métodos de verificación de escalonamiento.
- *Anexo B:* Describe en detalle el procedimiento llevado a cabo para la estimación de la cantidad de repeticiones de carga considerado en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos presentados en este trabajo: Modelos de vehículos pesados considerados, fuentes de información, determinación de factores de equivalencia de carga utilizados, entre otros.
- *Anexo C:* Contiene especificaciones utilizadas en para el diseño de pavimentos de asfalto utilizando el software de la MEPDG.
- *Anexo D:* Contiene certificados e informes de ensayos realizados en laboratorio y en terreno, durante el desarrollo de esta memoria de título.
- *Anexo E:* Contiene el detalle de los costos de las partidas relevantes consideradas para el análisis económico y comparación entre alternativas de pavimentos presentada en este

trabajo, considerando rendimientos calculados en terreno y de bibliografía relacionada (Ibañez, 2010).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Pavimentos de Hormigón Tradicionales

Los pavimentos de hormigón se construyen utilizando hormigón de Cemento Portland (Portland Cement Concrete, o PCC). Este tipo de pavimentos también se conoce como pavimentos rígidos, debido a la gran rigidez que ofrecen las losas de hormigón, las cuales permiten distribuir las cargas de tráfico en un área más extensa, disminuyendo las tensiones que se transmiten hacia el terreno (subrasante) o hacia las capas inferiores.

Existen tres tipos de pavimentos de hormigón:

- Pavimentos de hormigón con juntas simples con o sin elementos de traspaso de carga (Jointed Plain Concrete Pavements, o JPCP).
- Pavimentos de hormigón con malla de refuerzo, juntas espaciadas y elementos de traspaso de carga (Jointed Reinforced Concrete Pavements, o JRCP)
- Pavimentos de hormigón continuamente reforzados (Continuously Reinforced Concrete Pavements, o CRCP).

La diferencia entre un pavimento JPCP y JRCP en el uso de acero de refuerzo en este último, además de una mayor distancia entre las juntas. Mientras que en los JPCP esta distancia oscila típicamente entre 3,6 y 6 m, en los JRCP es de entre 7,5 y 9 m. Con respecto a los pavimentos CRCP, estos tienen mayor cantidad de acero de refuerzo en relación a los JRCP, y se construyen sin juntas, pues el acero se encarga de mantener adecuadamente unidas las grietas que se generan.

Los métodos de diseño utilizados en Chile se orientan principalmente al diseño de pavimentos de hormigón con juntas simples (JPCP) sin barras de traspaso de cargas, los cuales son de uso común en el país, especialmente en zonas urbanas.

Por estas razones, a partir de este punto, los pavimentos de hormigón tradicionales que se describen en esta sección harán referencia única y exclusivamente a los pavimentos de hormigón con juntas simples (JPCP).

2.1.1. Características Generales

Los pavimentos de hormigón con juntas simples (JPCP) son usados con frecuencia debido a que son económicos en comparación a los JRCP y CRCP, ya que no consideran acero de refuerzo. El esquema típico de un pavimento de hormigón con juntas simples se muestra en la Figura 2-1. Como se observa en esta figura, los pavimentos de hormigón consideran sólo una capa granular subyacente de base o subbase, a diferencia de los pavimentos asfálticos (flexibles), que consideran comúnmente el uso de dos capas granulares (base y subbase). En los pavimentos de hormigón, las cargas de tránsito se distribuyen en un área más extensa a través de las losas de hormigón debido a que estas son muy rígidas, por lo cual disminuyen las tensiones transmitidas hacia el terreno de fundación (subrasante) o a las capas inferiores.

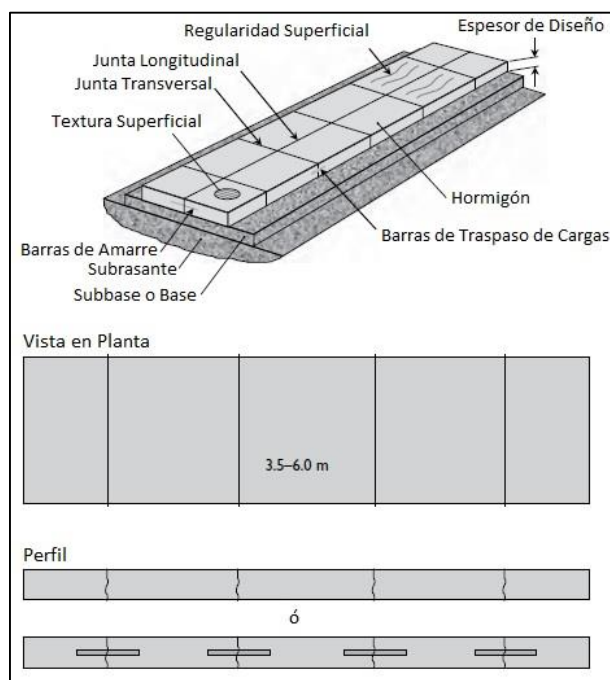


Figura 2-1: Pavimento de Hormigón (JPCP) con o sin Barras de Traspaso de Carga (Delatte, 2007).

2.1.2. Juntas

Como se observa en la Figura 2-1, los pavimentos de hormigón se construyen en losas delimitadas por juntas longitudinales y transversales, las cuales son, respectivamente, paralelas y perpendiculares al eje del camino. En pavimentos de hormigón JPCP, las juntas transversales están espaciadas a una distancia típica que oscila entre 3,5 y 6 m (Delatte, 2007). El objetivo principal de las juntas controlar el agrietamiento originado debido a tensiones de tracción y flexión en las losas de concreto causadas durante la hidratación del cemento y debido a las cargas de tráfico y el medio ambiente.

Una junta sometida a esfuerzos típicamente presenta fallas y/o desprendimiento. La deficiencia en las juntas con frecuencia conduce a más problemas como roturas en las esquinas, explosiones y grietas. Tales grietas pueden comenzar a funcionar como juntas y desarrollar deterioros similares. El desempeño de las juntas de contracción transversales se relaciona con tres factores principales: el espaciamiento de las juntas, la transferencia de la carga a través de la junta, la forma de la junta y las propiedades del sello (FHWA, 1990).

2.1.3. Desempeño y Tipos de Deterioro

La ingeniería de pavimentos de hormigón consiste en la selección del diseño, los materiales a emplear y las prácticas adoptadas durante la construcción a modo de garantizar un desempeño satisfactorio durante la vida de diseño adoptada para el pavimento.

Los principales problemas de desempeño de pavimentos de hormigón con juntas simples (JPCP), incluyen (Delatte, 2007):

- Suavidad inicial del pavimento, que es una función de las prácticas de construcción.
- Espesor adecuado del pavimento, para evitar el agrietamiento en la mitad de la losa.
- Limitar el espaciamiento entre las juntas, también para evitar el agrietamiento en la mitad de la losa, y
- Diseño, detalle y construcción adecuados de las juntas.

Los usuarios de pavimentos son sensibles a su desempeño funcional (regularidad superficial y resistencia al deslizamiento) más que al desempeño estructural. Los pavimentos, como regla general, desarrollan esfuerzos gradualmente con el tiempo bajo cargas de tránsito y efectos ambientales.

A continuación, se muestran algunos tipos de fallas comunes en pavimentos de hormigón, los cuales están expuestos en un manual de identificaciones de deterioros en pavimentos desarrollado por la Federal Highway Administration (FHWA) como parte del programa Long Term Pavement Performance (LTTP) (Miller & Bellinger, 2003).

2.1.3.1. Agrietamiento de Losas

Las grietas en el pavimento de hormigón pueden generarse debido al paso de una sobrecarga de una sola vez o a cargas de fatiga repetidas. A continuación, se describen algunos tipos de grietas que comúnmente se presentan en los pavimentos de hormigón: agrietamiento de esquina, agrietamiento longitudinal y agrietamiento transversal.

- **Grietas de Esquina**

Consiste en el agrietamiento de una pieza triangular de hormigón en la losa (Figura 2-2), de entre 0,3m a la mitad del ancho de la losa (Miller & Bellinger, 2003). La ocurrencia del agrietamiento de esquina es más probable en losas más largas, ya que, si se alabea, pueden quedar sin soporte y romperse con el paso de carga de vehículos pesados.

Este agrietamiento se debe generalmente a las repeticiones de carga combinadas con una pérdida de soporte, mala transferencia de carga y tensiones térmicas o deformaciones por humedad (Huang, 2004).

- **Grietas Longitudinales**

Corresponden a grietas predominantemente paralelas al eje central de la calzada (Figura 2-3). Estas grietas se generan por una combinación de repeticiones de carga pesada, pérdida de soporte del terreno de fundación y tensiones de curvatura y deformación, o bien por una construcción inadecuada de las juntas longitudinales (Huang, 2004).

Si las grietas longitudinales aparecen en zonas que no coinciden con las huellas de los vehículos, y no producen fallas apreciables, el efecto negativo en el desempeño del pavimento puede no ser significativo.



Figura 2-2: Pavimentos de Hormigón - Agrietamiento de Esquina (Delatte, 2007).



Figura 2-3: Pavimentos de Hormigón – Agrietamiento Longitudinales (Delatte, 2007).

- **Grietas Transversales**

Las grietas transversales son aquellas cuya orientación es predominantemente trasversal al eje de la calzada (Figura 2-4). Corresponden a una medida clave en el desempeño de los pavimentos JPCP, ya que una vez que ocurre la falla, el deterioro conduce a una irregularidad superficial severa.

Las grietas transversales generalmente se generan por una combinación de repeticiones de carga pesada y tensiones debido a gradientes de temperatura, gradientes de humedad y contracción por secado (Huang, 2004) .



Figura 2-4: Pavimentos de Hormigón-Agrietamiento Transversales (Delatte, 2007).

2.1.3.2. Deterioros en las Juntas

El deterioro de juntas se presenta comúnmente en pavimentos JPCP y JRCP, y se clasifica en deterioros en el sello de juntas y desprendimiento de hormigón en las juntas.

- **Daño en el Sello de Juntas**

El objetivo del sello de las juntas es evitar el ingreso de material compresible y agua en las juntas, los cuales pueden conducir a una concentración de esfuerzos al interior de ellas cuando las juntas del pavimento se cierran, causando que parte del hormigón se desprenda. Daños típicos en el sello de juntas incluyen extrusión (afloramiento del sello en la junta), endurecimiento, pérdida de adherencia, intrusión del material extraño, crecimiento de malezas en la junta, entre otros (Miller & Bellinger, 2003). Este tipo de deterioro requiere de actividades de mantención de limpieza y resellado de las juntas.

- **Desprendimiento en las Juntas**

Deterioro de juntas que consiste en el desprendimiento de parte del borde de la losa, a menos de 0,3 m de la cara de la junta. Esto ocurre generalmente a causa de materiales incompresibles que crean concentraciones de tensión en una junta que se cierra debido a la expansión de la losa o cargas de tránsito. El desprendimiento también puede generarse debido al diseño y/o construcción inadecuados de los dispositivos de transferencia de carga. En la Figura 2-5 se muestra el desprendimiento del hormigón en la junta.



Figura 2-5: Pavimentos de Hormigón-Desprendimiento en las Juntas (Delatte, 2007).

2.1.3.3. Deterioros Superficiales

A diferencia de los deterioros por agrietamiento, los deterioros superficiales en general no están relacionados con el diseño del pavimento, sino a una mala selección de materiales y/o procedimientos constructivos.

- **Agrietamiento por Retracción (Map Cracking)**

Consiste en una serie de grietas originadas sólo en la superficie superior de las losas. Las grietas más grandes se orientan en sentido longitudinal, interconectándose con grietas de menor espesor orientadas en forma transversal o aleatoria.

Estas grietas se originan debido a un acabado excesivo del hormigón (Huang, 2004). Según lo señalado en el Catalogo de Deterioros de Pavimentos de la Dirección de Vialidad, otras causas posibles son el curado inapropiado del hormigón, exceso de agua durante el alisado de la superficie y, en zonas de climas fríos, acción del clima o de productos químicos cuando el hormigón está mal construido. El agrietamiento por retracción se muestra en la Figura 2-6.



Figura 2-6: Pavimentos de Hormigón - Agrietamiento por Retracción (Delatte, 2007).

- **Escalamiento**

El escalamiento es un tipo de deterioro en la superficie de rodado de la losa de hormigón, normalmente de 3 a 13 mm, que puede ocurrir en cualquier lugar sobre el pavimento (Miller & Bellinger, 2003). El escalamiento puede progresar a partir del agrietamiento por retracción. También puede ocurrir con la aplicación de sales de deshielo, por acción del tránsito, construcción inadecuada, ciclos hielo/deshielo, o por acero de refuerzo cerca de la superficie (Huang, 2004). El escalamiento se muestra en la Figura 2-7.



Figura 2-7: Pavimentos de Hormigón-Escalamiento (Delatte, 2007).

2.1.3.4. Otros Deterioros

- **Escalonamiento de Juntas y Grietas (Faulting)**

El escalonamiento de juntas corresponde al desnivel entre dos superficies de pavimento separadas por una junta o grieta. Estas fallas no se observan a simple vista. Sin embargo, son percibidas fácilmente por los usuarios de la ruta. El esquema de escalonamiento se muestra en la Figura 2-8. La falla es causada en parte por una acumulación de material suelto debajo de la losa posterior cerca de la junta o grieta, o por una depresión de la losa principal. La acumulación de materiales erosionados o infiltrados es causada por el bombeo debido a cargas pesadas (Huang, 2004).

El alabeo de las losas cerca de la junta o grieta, debido a los gradientes de humedad y temperatura contribuyen a la condición de bombeo. La falta de transferencia de carga también contribuye significativamente al escalonamiento.



Figura 2-8: Pavimentos de Hormigón-Escalonamiento de Juntas Transversales (Delatte, 2007).

- **Bombeo de Finos (Pumping)**

Corresponde a la expulsión de una mezcla de material fino y agua a través de juntas o grietas, causadas por la deflexión de las losas bajo el paso de las cargas. A medida que se expulsa el agua, esta transporta partículas de grava, arena, arcilla o limo, resultando en una pérdida progresiva del soporte del pavimento. La acumulación de material de base o subrasante en la superficie del pavimento, cerca de las juntas y grietas, es evidencia de bombeo (Huang, 2004).

2.1.4. Tensiones y Deformaciones – Soluciones Analíticas

Las tensiones en los pavimentos rígidos se deben a los efectos ambientales y las cargas de tráfico. Las tensiones debidas a las cargas de tráfico determinan la vida de fatiga del pavimento, mientras que los efectos ambientales debidos al alabeo por temperatura y humedad determinan el espaciado máximo de las juntas para el pavimento. Las tensiones son resistidas por la resistencia a la flexión del hormigón (Delatte, 2007).

2.1.4.1. Tensiones por efectos de Temperatura y Humedad (Alabeo)

Un fenómeno importante a considerar en el diseño y construcción en pavimentos de hormigón, que es responsable de la aparición de distintas fallas a lo largo de su vida útil, corresponde a las deformaciones que experimentan las losas de hormigón tanto por efectos de temperatura (curling) como por efectos de humedad (warping), las cuales generan esfuerzos de tracción y compresión en el espesor. Estas deformaciones se conocen como alabeo.

- **Alabeo por Temperatura (Curling)**

Durante el día, cuando la temperatura en la superficie superior de las losas es mayor que en la superficie inferior, esta tiende a expandirse con respecto al eje neutro, curvando las losas con las puntas hacia abajo debido al gradiente de temperatura entre ambas superficies. Sin embargo, este efecto se ve contrarrestado por la acción del peso propio de las losas, que tiende a contraer la superficie superior y a expandir la superficie inferior, reduciendo el alabeo (Huang, 2004).

Ocurre lo contrario durante la noche, cuando la temperatura en la superficie superior es menor en comparación a la superficie inferior. Debido a esto las losas se curvan con las puntas hacia arriba.

- **Alabeo por Humedad (Warping)**

El curvado de las losas también ocurre por gradientes de humedad, especialmente durante el secado del hormigón. La pérdida de humedad no es uniforme en la losa, sino que es mayor en la superficie, lo cual genera una mayor retracción de la mezcla que en el fondo de la losa, lo que genera esfuerzos y deformaciones debido a gradientes de humedad.

En la Figura 2-9 se muestra un esquema del alabeo por temperatura y humedad en las losas de hormigón.

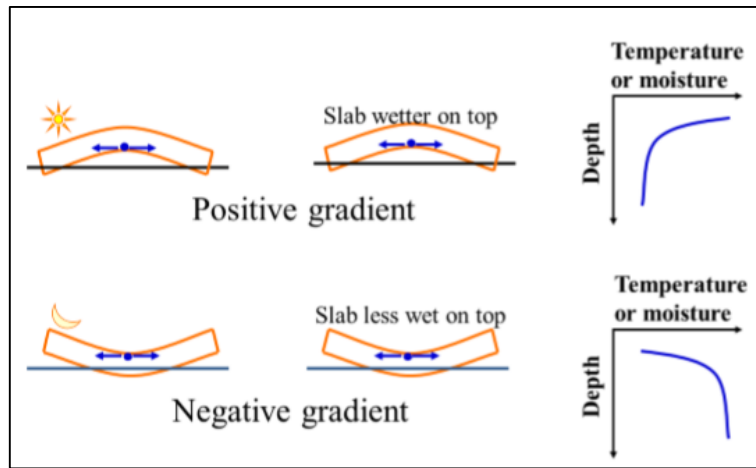


Figura 2-9: Alabeo por Temperatura y Humedad en Losas de Hormigón (Mack, 2009).

Las tensiones en el pavimento debido a alabeos por temperatura y/o humedad dependen de la razón entre el largo de la losa “L” y el radio de rigidez relativa ℓ . Este último se define según la ecuación 2.1 (Westergaard, 1926):

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{ED^3}{12(1 - \nu^2)k}} \quad (2.1)$$

con:

ℓ : Radio de Rigidez Relativa (m).

- E : Módulo de Elasticidad del Hormigón (MPa).
 D : Espesor de la Losa (m).
 v : Módulo de Poisson del hormigón, generalmente se adopta un valor de 0,15.
 k : Módulo de Reacción de la Subrasante (MPa/m)

La tensión de borde en la losa debido a la curvatura por temperatura queda definida por la ecuación 2.2.

$$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta_t}{2(1 - v^2)} \quad (2.2)$$

donde:

- σ : Tensión de borde en la losa debido a curvatura por temperatura (MPa)
 α_t : Coeficiente de expansión térmica del hormigón (1/°C)
 Δ_t : Diferencia de temperatura entre superficies superior e inferior de la losa (°C).
 C : Factor de corrección para losa finita

El factor de corrección C en la ecuación 2.2 se determina en función de la proporción entre el largo de la losa L y el radio de rigidez relativa ℓ (ec. 2.1), según el grafico desarrollado por Bradbury (1938), mostrado en la Figura 2-10.

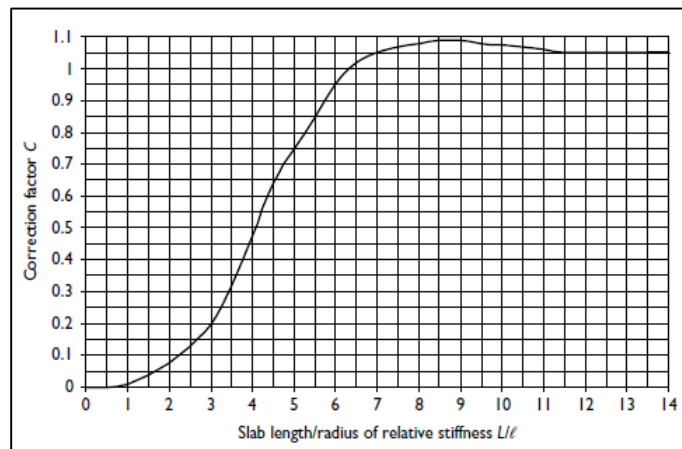


Figura 2-10: Factor de Corrección por Esfuerzo de Alabeo (Delatte, 2007).

Al inspeccionar las ecuaciones 2.1 y 2.2, se observa que mientras mayor sea el módulo de reacción de la subrasante k (fundación más rígida), se obtiene un menor valor del radio de rigidez relativa y, con ello, una proporción mayor entre L/ℓ , por lo que aumentan los esfuerzos de borde debido a deformaciones de alabeo. Por otro lado, un mayor valor de k requerirá un menor espesor del pavimento, reduciendo aún más el valor de ℓ . El uso de bases mejoradas de mayor rigidez, y el uso de pavimentos más delgados sin un espaciamiento de juntas correspondiente, conducirá a un aumento de tensiones en la parte central de la losa debido a efectos de alabeo térmico y de humedad (Delatte, 2007).

2.1.4.2. Tensiones debido a Cargas de Tránsito

En esta sección se exponen algunas soluciones analíticas que han sido desarrolladas para cargas de tránsito aplicadas en tres ubicaciones particulares de la losa: carga de esquina, carga de borde y carga en el centro (Figura 2-11).

Los esfuerzos de esquina se asocian con roturas de esquina, mientras que los esfuerzos en el interior y en el borde de la losa se asocian al agrietamiento transversal en la mitad de la losa. Las tensiones dependen de la carga aplicada y la configuración de la carga, el espesor de la losa, el módulo de la reacción de la subrasante k y el radio de rigidez relativa ℓ .

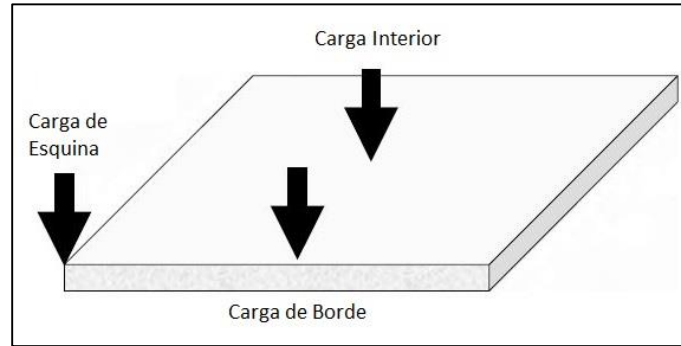


Figura 2-11: Carga en Losas de Hormigón: Esquina, Interior y Borde (Delatte, 2007).

- **Esfuerzos debido a Cargas de Esquina**

La ecuación más simple y más antigua para el esfuerzo por carga de esquina fue desarrollada por Goldbeck (1919) y Older (1924). Esta ecuación asume condiciones conservadoras (carga en la esquina y módulo de reacción $k = 0$). Está desarrollada en base a la ecuación estándar de esfuerzo debido a curvatura $\sigma = Mc/I$. El plano de falla se asume a una distancia x desde el borde, y forma una grieta de largo $2x$. por lo tanto, si D es el espesor de la losa, $c = D/2$, e $I = bh^3/12 = (2x)D^3/12$, el momento de flexión para el voladizo es Px . De esta forma, el agrietamiento de esquina resultante es:

$$\sigma_c = \frac{Mc}{I} = \frac{Px(D/2)}{(2x)D^3/12} = \frac{3P}{D^2} \quad (2.3)$$

Esta ecuación es conservadora, debido a que en la practica la carga se distribuye en un área bajo la rueda. Además, es poco probable que la losa no posea soporte inferior.

La ecuación 2.3 fue mejorada por Westergaard (1926) y posteriormente por Ioannides et al (1985) (ec 2.4):

$$\sigma_c = \frac{3P}{D^2} \left[1 - \left(\frac{c}{\ell} \right)^{0.72} \right] = \frac{3P}{D^2} \left[1 - \left(\frac{1.772a}{\ell} \right)^{0.72} \right] \quad (2.4)$$

donde:

c : Longitud de un lado del área de contacto cuadrada

a : Radio de un círculo con la misma área de contacto

Si además se considera la presión de inflado de los neumáticos, “p”, la carga aplicada al pavimento, P, puede expresarse como sigue:

$$P = p * \pi * a^2 \quad \text{o} \quad a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (2.5)$$

- **Esfuerzos por Cargas de Borde**

Los esfuerzos debido a cargas en los bordes de la losa son críticos, debido a que son mucho mayores que los esfuerzos por carga en el interior de la losa. Westergaard desarrolló varias ecuaciones para el agrietamiento de borde. La ecuación 2.6 corresponde a la ecuación final proporcionada por Ioannides (1985), para una carga de área de contacto circular. Esta ecuación asume un módulo de Poisson del hormigón igual a 0.15.

$$\sigma_e = \frac{0.803P}{D^2} \left[4 \log \left(\frac{\ell}{a} \right) + 0.666 \left(\frac{a}{\ell} \right) - 0.034 \right] \quad (2.6)$$

- **Esfuerzos por Cargas de Interiores**

El esfuerzo en la losa debido a una carga interior se muestra en la ecuación 2.7 (Westergaard, 1926) . Esta ecuación, al igual que la ecuación 2.5, asume un valor del módulo de Poisson de 0.15:

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{D^2} \left[4 \log \left(\frac{\ell}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (2.7)$$

donde:

$$b = \begin{cases} a & \text{si } a \geq 1.724D \\ \sqrt{1.6a^2 + D^2} & \text{si en otro caso} \end{cases} \quad (2.8)$$

2.1.4.3. Tensiones combinadas de por alabeo y cargas de tránsito

Las tensiones por deformaciones de alabeo por temperatura y/o humedad, y las tensiones debido a las cargas de tráfico, se presentan en forma simultánea en el pavimento, afectando su desempeño. Dado que la vida útil de la losa se basa en la fatiga, la cantidad de ciclos o inversiones de tensiones es importante.

En Chile, se realizaron mediciones para diferentes climas (seco, húmedo frío y caluroso) muestran que las losas de hormigón tradicionales están todo el tiempo alabeadas (con las esquinas hacia arriba), y se produce de forma importante durante la construcción del pavimento. La magnitud

del alabeo es tan grande que las variaciones de humedad y temperatura no logran contrarrestar esto, y si lo logran, será por muy poco tiempo en el día (Covarrubias T. & Covarrubias V., 2007). Combinando los efectos del alabeo con el efecto de las cargas de tránsito, se producen esfuerzos de tracción en las losas, cuyo valor máximo se encuentra en la fibra superior.

Las juntas y el acero de refuerzo (en pavimentos JRCP) se utilizan para atender las tensiones de deformación. La filosofía de pavimentos JPCP consiste en garantizar un espaciamiento de juntas lo suficientemente corto como para reducir las tensiones de alabeo.

2.1.4.4. Deflexión de las Losas

Las deflexiones en las losas debido a cargas de esquina, borde e interior, se determinan mediante las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 respectivamente. Westergaard (1926) y Ioannides et al. (1985), se de las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 respectivamente.

Westergaard (1926) y Ioannides et al (1985) desarrollaron ecuaciones para obtener las deflexiones debido a cargas de rueda en la esquina (Δ_c), borde (Δ_e) e interior (Δ_i) de las losas, las cuales se muestran en las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11 respectivamente.

$$\Delta_c = \frac{P}{k\ell^2} \left[1.205 - 0.69 \left(\frac{c}{\ell} \right) \right] = \frac{P}{k\ell^2} \left[1.205 - 0.69 \left(\frac{1.722a}{\ell} \right) \right] \quad (2.9)$$

$$\Delta_e = \frac{0.431P}{k\ell^2} \left[1 - 0.82 \left(\frac{a}{\ell} \right) \right] \quad (2.10)$$

$$\Delta_i = \frac{P}{8k\ell^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2\ell} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{\ell} \right)^2 \right\} \quad (2.11)$$

2.1.5. Métodos de Diseño

A medida que aumenta el espesor del pavimento de hormigón, este puede soportar más cargas, debido a que se reducen las tensiones de flexión y aumenta la vida de fatiga del pavimento. Existen principalmente dos tipos de métodos de diseño para determinar el espesor adecuado de pavimentos de hormigón, los cuales se diferencian en el enfoque de diseño. Estos pueden ser empíricos o mecanicistas (Delatte, 2007).

- **Métodos Empíricos**

Los métodos empíricos a modelos que han sido desarrollados únicamente a partir de datos recolectados mediante observación en terreno, en pavimentos construidos en pistas de prueba en lugares con características climáticas específicas. Por esta razón resulta extremadamente difícil aplicarlos en otras zonas con condiciones climáticas distintas y/o utilizando materiales diferentes a los que se utilizaron en el lugar donde se desarrolló el modelo. Un ejemplo de este tipo de método de diseño de pavimentos corresponde al método AASHTO de 1993 para pavimentos flexibles y rígidos, desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials.

- **Métodos Mecanicistas**

Los métodos mecanicistas, por el contrario, son métodos exclusivamente analíticos, que se basan en el hecho de que un pavimento puede ser modelado por un sistema multicapas. Estos métodos permiten calcular de forma muy precisa tensiones, y deformaciones y deflexiones debido a cargas de tránsito en cualquier parte de la estructura. No obstante, el comportamiento del pavimento también depende de otros factores que no pueden ser modelados en forma precisa, por lo que se recurre a estimarlos mediante correlaciones empíricas, denominadas modelos de fatiga, con las que se pueden establecer límites de tolerancia.

Debido a que ambos tipos de métodos de diseño poseen ciertas debilidades, actualmente se tiende a la convergencia entre ambos métodos. Así, para adaptar los modelos empíricos a lugares diferentes al lugar donde se creó el modelo, se utilizan relaciones analíticas, al menos para ciertos parámetros. De la misma forma, debido a las limitaciones de métodos mecanicistas, se ha llevado a complementar estos modelos mediante relaciones empíricas.

2.2. Pavimentos de Hormigón con Losas Cortas

Tal como se adelantó en el Capítulo 1, un diseño de hormigón con losas cortas consiste en reemplazar las losas tradicionales de hormigón (AASHTO), usualmente de 3,5 a 4 m de largo y 3,7 de ancho (ancho de pista), por losas más pequeñas que distribuyen la carga de tránsito de manera inteligente. El largo de estas losas pequeñas está comprendido varía entre 1,2 y 2,4 m. El concepto fundamental de diseño consiste en que cada losa sea cargada en todo momento por un solo set de ruedas por eje, con lo cual disminuyen las tensiones en las losas y por ende el agrietamiento producto del efecto combinado entre las cargas de tránsito pesado y el alabeo producido en las losas. Esto se puede observar en la Figura 2-12.

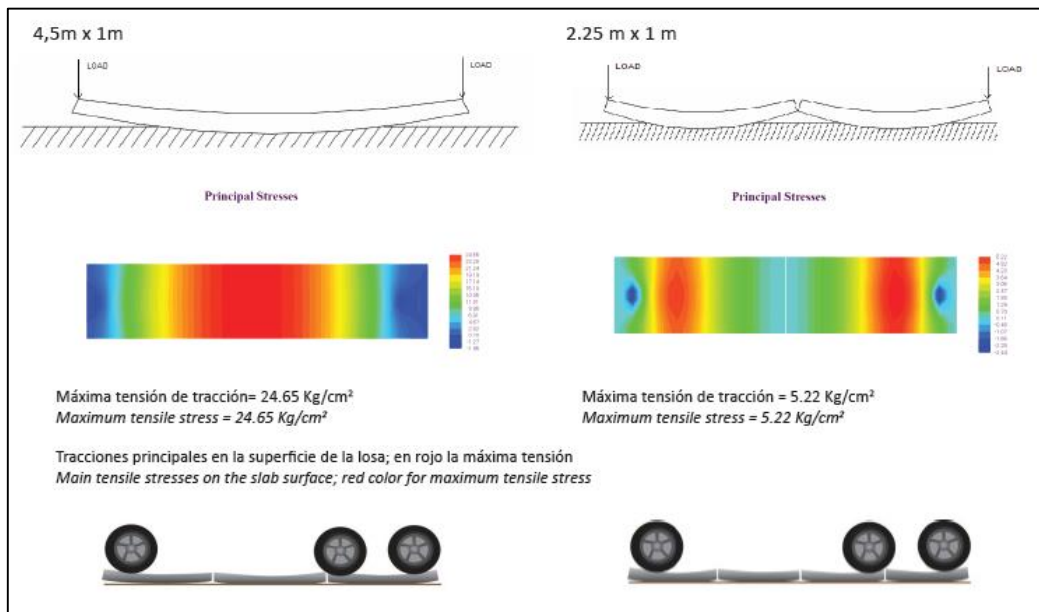


Figura 2-12: Losas Tradicionales vs Losas Cortas Cargadas Mecánica y Térmicamente (Covarrubias V., 2012).

Los pavimentos de hormigón de losas cortas, pueden ser empleados tanto en proyectos de pavimentos nuevos y reconstrucción de pavimentos, como en rehabilitaciones de pavimentos existentes de asfalto, hormigón, o pavimentos compuestos.

2.2.1. Modelación del Suelo

Un aspecto importante de los pavimentos de losas cortas es la modelación del suelo. Para disminuir las tensiones por punzonamiento, se recomienda utilizar bases blandas, con una capacidad de soporte CBR entre 20 y 50%, para mejorar el apoyo de las losas en el suelo y disminuir el voladizo de los extremos producto de alabeos.

2.2.2. Modificaciones de Diseño

Debido a que se trabaja con losas de dimensiones más pequeñas, se deben considerar algunas modificaciones en el diseño, a fin de que el pavimento logre un buen comportamiento durante la vida de diseño:

- Un diseño de pavimento de losas cortas considera una mayor cantidad de cortes de juntas. Por ejemplo, para un pavimento de losas cortas de 1,75x1,75m con berma de hormigón, se tiene una cantidad de cortes aproximada de 4500 m lineales por km en una pista, en tanto que un diseño de hormigón tradicional de losas de 3,5 m posee una cantidad aproximada de cortes de 1230 m lineales por km en una pista. Debido a esto, el diseño no contempla el sello de juntas, de modo que, para impedir el ingreso de material incompresible a la junta, se limita el espesor del corte, utilizando una hoja de sierra delgada de ancho igual o inferior a 2,5 mm.
- Debido a la mayor cantidad de juntas de contracción sin sellar, es necesario utilizar una base granular que sea menos susceptible al agua y que reduzca al mínimo la posibilidad de bombeo y por ende escalonamiento. Para lograr esto, se debe limitar la cantidad de material fino de la base que pasa por el tamiz #200 (indicar abertura del tamiz en mm) a un 8%.
- Debe contemplarse el uso de una malla geotextil que actúe como capa de separación entre la subrasante y la base, a fin de que a esta última no ingrese material fino desde la subrasante.
- Debido a la gran cantidad de cortes de sierra, el diseño estándar de este tipo de pavimentos no considera el uso de barras de amarre ni elementos de traspaso de carga, por lo que la transferencia de carga desde una losa cargada a las losas vecinas se realiza principalmente por el roce de agregados en la junta. Considerar barras de traspaso en las juntas no es recomendable y es costoso. Sin embargo, se debe utilizar barras de traspaso de carga en las juntas de construcción. Para pavimentos de más de 15 cm de espesor, se deben utilizar barras de 25 mm de diámetro y 35 cm de longitud, espaciadas a una distancia de 30 cm. Para losas de menos de 15 cm de espesor, las barras deberán ser planas (barras en forma de diamante), pudiendo utilizarse también barras de acero estriadas de 10 mm de diámetro y 65 cm de longitud, colocadas a una separación de 50 cm (MINVU, 2016).

- Con el fin de evitar el desplazamiento lateral de las losas, estas deben estar sujetas en el borde longitudinal ya sea con una berma de hormigón o estacas (pines) de acero verticales. Para este último caso, el Código de Especificaciones y Normas para Obras de Pavimentación vigente (MINVU, 2016) recomienda emplear dos estacas de acero por losa, de 12 mm de diámetro y 30 cm de longitud, enterradas en el borde exterior del pavimento, en la base y tocando la losa para afianzarla. También se puede considerar el uso de fibras estructurales en el hormigón.

El diseño de pavimentos de hormigón con losas cortas permite obtener una reducción en el espesor de las losas entre 4 y 10 cm con respecto a pavimentos de hormigón diseñados con métodos tradicionales tales como AASHTO 98, reduciendo el costo de construcción en aproximadamente un 20% del costo inicial (Covarrubias V., 2012). No obstante, estos niveles de ahorro podrían verse reducidos considerando un diseño de pavimento tradicional con la MEPDG calibrada para Chile (Delgadillo et al., 2014).

Considerando lo anterior, se tiene que, en principio, el aumento costos asociados a las modificaciones de diseño tales como mayor longitud de corte de juntas, instalación de geotextil, entre otros, se ven compensados por un ahorro en la cantidad de hormigón utilizado en la pavimentación.

Con respecto al corte de juntas, actualmente existen sistemas de corte en estado fresco de hormigón (Valverde, 2013). Debido al estado fresco de la mezcla, se obtienen de corte considerablemente más altos, del orden de 2 a 7 m lineales por minuto (120 a 420 m por hora), en comparación a cortadoras de hormigón endurecido que ofrecen rendimientos mucho más bajos (del orden de 20 m lineales por hora). Considerando la mayor cantidad de juntas en pavimentos de losas cortas, resulta conveniente emplear la tecnología SoffCut, a fin de reducir los tiempos de ejecución de cortes.

2.2.3. Desempeño de los Pavimentos de Losas Cortas

A la fecha, no existe experiencia acerca del desempeño de estos pavimentos en el largo plazo. Sin embargo, las modificaciones de diseño atacan la pérdida de serviciabilidad y rugosidad superficial.

Debido a las dimensiones menores de las losas, disminuye el alabeo, por lo que las diferencias de altura entre los bordes y el centro de las losas es menor, logrando superficies más planas y contribuyendo a la regularidad superficial. Por otro lado, se tiene el doble de juntas en las losas cortas, las que además no suelen sellarse y tampoco usan barras de traspaso de carga, lo que tiene un efecto negativo en el deterioro de juntas, escalonamiento y la regularidad superficial en el tiempo.

El diseño de pavimentos con losas cortas contempla bases granulares con una cantidad limitada de finos. Esto provoca que las partículas gruesas estén en contacto entre sí, lo que impide un cambio volumétrico y pérdida de soporte en caso de la remoción de finos en presencia de agua. Esto debería contribuir a controlar el bombeo de finos, lo cual reduciría el escalonamiento.

En base a experiencias con capas de refuerzo de hormigón con losas cortas en circuitos de prueba en Minnesota (Estados Unidos) durante los años 1992 a 2007, se determinó que alejar las

juntas longitudinales de las huellas de tránsito, reduce significativamente el agrietamiento en las esquinas interiores del pavimento (Synder, 2008). Se construyeron 10 circuitos de prueba, de los cuales 2 tenían un espesor de 3 pulgadas (75 mm): uno con losas de 1,2 x 1,2 m, y otro con losas de 1,5 x 1,8 m. El primer circuito, a pesar de tener losas más cortas y, teóricamente, menor alabeo y escalonamiento, presentó significativamente más grietas de esquina respecto del circuito con pistas de 1,5 x 1,8 m.

2.3. Recapados de Hormigón

Las capas de refuerzo de hormigón, conocidas como Whitetopping, corresponden a capas de hormigón colocadas sobre una capa de pavimento existente. Su uso ha experimentado un crecimiento importante en los últimos años, debido a que se ha comprobado la eficacia, sustentabilidad y el buen comportamiento que ofrece este tipo de solución, en términos de durabilidad y bajos costos de mantenimiento.

Según información recolectada por la American Concrete Portland Association (ACPA), en los Estados Unidos, entre 1901 y 2012 se materializaron 1152 proyectos de recapados de hormigón (Fick & Harrington, 2014), muchos de ellos utilizando losas cortas. Entre los años 1980 y 2010 se construyeron cinco veces más recapados por década que los construidos en las seis décadas anteriores. Este crecimiento evidencia que los recapados con hormigón son una buena inversión para las distintas entidades dedicadas a la conservación y rehabilitación mayor de pavimentos, otorgando soluciones sustentables y rentables que permiten una administración de recursos más eficiente.

2.3.1. Tipos de Capas de Refuerzo con Hormigón

Existen dos tipos de soluciones de recapados con hormigón: Los recapados adheridos y los no adheridos (Figura 2-13). Los recapados adheridos se utilizan en su mayoría para mantenciones preventivas y/o rehabilitaciones menores. Los recapados no adheridos pueden ser utilizados tanto para rehabilitaciones menores como mayores. La elección de cada tipo de alternativa de recapado o capa de refuerzo de hormigón depende principalmente de las condiciones del pavimento existente y la forma de considerar el aporte estructural de este. Las capas de refuerzo con hormigón son aplicables en pavimentos de asfalto, de hormigón y pavimentos compuestos.

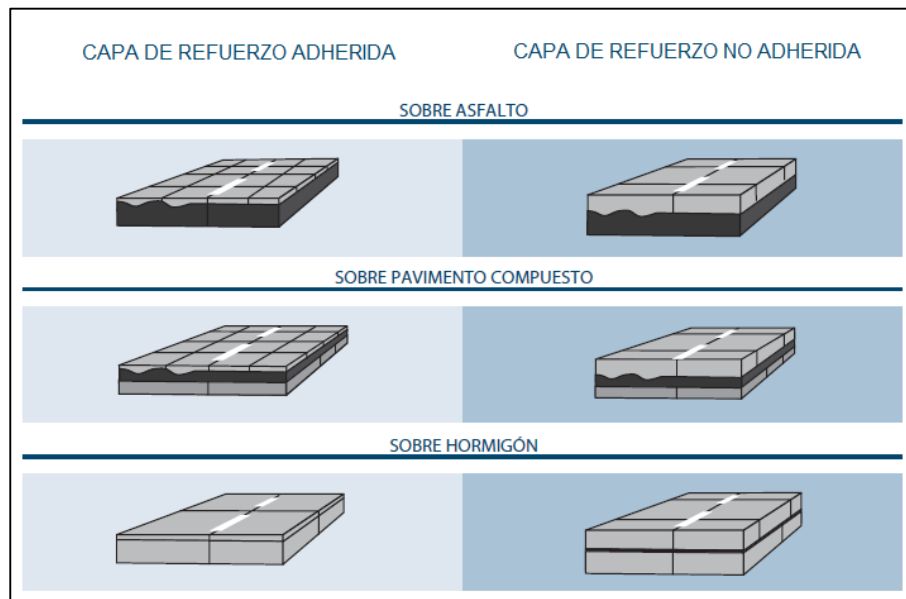


Figura 2-13: Capas de Refuerzo con Hormigón (Fick & Harrington, 2014).

2.3.1.1. Capa de Refuerzo Adherida

El propósito de la capa de refuerzo adherida es agregar capacidad estructural y eliminar deterioros superficiales en pavimentos existentes que presenten una condición buena a regular. Son parte del mantenimiento preventivo del pavimento o rutinario del pavimento, o bien de una rehabilitación menor.

El espesor de las capas adheridas es relativamente bajo: entre 50 y 150 mm. Es importante asegurar la adherencia entre las capas, de manera que la capa de refuerzo y el pavimento existente adheridos entre si se comporten como una sola estructura (monolítica), ya que el pavimento existente continúa soportando la mayor parte de las solicitaciones de tránsito.

Los factores que determinan el comportamiento de este tipo de solución son:

- Integridad estructural del pavimento subyacente.
- Efectividad de la adherencia entre la capa de refuerzo y el pavimento existente.
- Capacidad de las dos capas para desplazarse monolíticamente manteniendo la adherencia.
- Distribución de las juntas.
- Técnicas de curado del refuerzo.

Para asegurar la adherencia entre la capa de refuerzo y el pavimento existente se debe tener en cuenta los desplazamientos que estas experimentan debido a la expansión o contracción del hormigón. Por ejemplo, el coeficiente de expansión térmica del hormigón de la capa de refuerzo debe ser similar o inferior al coeficiente del pavimento existente.

2.3.1.2. Capa de Refuerzo No Adherida

El propósito principal de las capas de refuerzo no adheridas es restaurar la estructural del pavimento existente. Se puede aplicar a pavimentos cuyo estado de deterioro es de moderado a severo. Las capas de refuerzo no adheridas pueden ser técnicas de rehabilitación menores y mayores.

En este tipo de soluciones la adherencia entre la capa de refuerzo y el pavimento existente no es necesaria para alcanzar el comportamiento deseado de la estructura, es decir, el método para determinar el espesor de la capa de refuerzo no considera al pavimento existente como componente estructural de la capa superficial. Por lo tanto, las capas de refuerzo no adheridas se comportan como pavimentos nuevos, en tanto que el pavimento existente proporciona una base estable.

En pavimentos existentes de asfaltos o compuestos, la adherencia parcial o total entre la capa de refuerzo y el pavimento no debería causar problemas, pudiendo incluso ser beneficioso para la estructura, otorgando al sistema una capacidad adicional para soportar cargas. Por lo tanto, para reforzar pavimentos asfálticos o compuestos, las capas de refuerzo no adheridas no se diseñan ni se construyen procurando evitar la adherencia entre las capas.

2.3.2. Experiencia Internacional – Estado de Colorado

El uso de pavimentos de hormigón con losas cortas como recapados sobre el pavimento existente, se llevan a cabo masivamente en Estados Unidos para la rehabilitación de pavimentos asfálticos, de hormigón y compuestos, mucho antes de que se patentaran las losas cortas en Chile.

En el estado de Colorado, se llevó a cabo la construcción del primer recapado asfáltico en junio del año 1990, en la Autopista Estatal 68, al norte de Denver. El Departamento de Transporte de Colorado (Colorado Department of Transportation, CDOT) buscaba una solución económica alternativa a la aplicación repetida de recapados asfálticos de 50 mm cada 8 a 10 años. Para esto, se construyeron dos secciones de prueba de una longitud de 91 m. La primera sección se construyó en losas de 2x2 m con un espesor de losas de 9 cm. La segunda sección se construyó en losas de 3,7 x 4 m, con un espesor de losas de 125 mm. No se realizó mantenimiento previo sobre el asfalto existente, y no se utilizaron barras de traspaso de carga. Después de 3 años de servicio, los paneles de 3,7 x 4m presentaron deterioros en forma de grietas, mientras que la sección con losas de 2x2 m tuvieron buen desempeño, casi sin deterioros. El buen comportamiento de esta sección condujo a una mayor investigación y desarrollo del whitetopping delgado a gran escala (CPTP, 2007).

El CDOT realizó un análisis detallado del costo del ciclo de vida (ver sección 2.8) de los recapados de hormigón para determinar si estos podían justificarse sobre la base del costo. Los resultados mostraron que los recapados de hormigón con losas cortas y asfalto fueron equivalentes (solo 1% más caro un recapado de hormigón). Al considerar los costos del usuario, un recapado de losas cortas de hormigón se convierte en una estrategia de rehabilitación más atractiva, debido a su vida útil más larga y sus bajos requisitos de mantenimiento. Al considerar los costos para los usuarios, el costo del ciclo de vida para la alternativa de hormigón con losas cortas fue un 11% menor respecto a un recapado asfáltico (Lowery, 2005).

2.3.3. Otros Proyectos

A continuación, se muestran algunos ejemplos de proyectos construidos en Estados Unidos. Un proyecto de whitetopping adherido con losas de 1,2 x 1,2 m fue construido en 1999 en Neosho, estado de Misuri (Figura 2-14), con un espesor de losas de 10 a 12,5 cm sobre una carpeta asfáltica existente de 11,5 cm. Al año 2012, el pavimento presentó deterioros en el 2,2% de las losas (Chang, 2017).



Figura 2-14: Whitetopping Adherido Neosho, Misuri (1999) al año 2012 (Chang, 2017).

Otro proyecto de whitetopping adherido fue construido en el año 2001 en Denver, Colorado. Se compone de losas de 1,8 x 1,8 m, con un espesor de 10 cm sobre una carpeta asfáltica existente de 13,5 cm. Luego de 11 años el pavimento no presenta fallas (Figura 2-15).

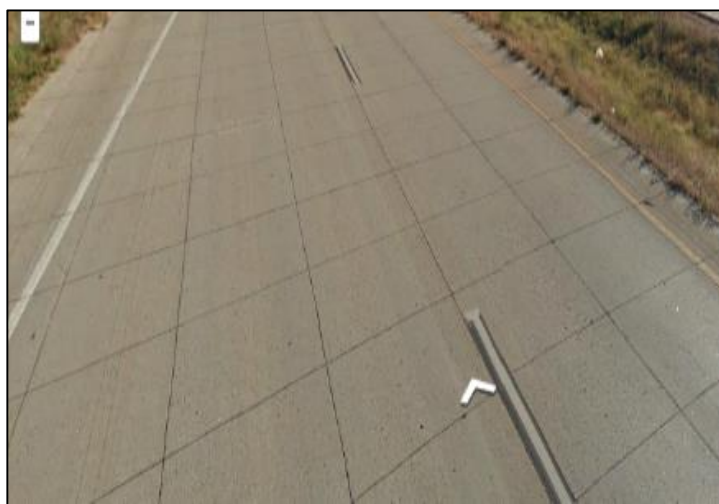


Figura 2-15: Whitetopping Adherido SH 121, Wadsworth Boulevard. Denver, Colorado (2011) al año 2012 (Chang, 2017).

2.4. Métodos de Diseño de Pavimentos del Manual de Carreteras 2017

En esta sección se presenta en forma resumida los métodos de diseño de pavimentos actualmente adoptados por la Dirección de Vialidad, descritos en el Manual de Carreteras edición 2017. Para el diseño de pavimentos flexibles, el método se basa en su mayoría en el método AASHTO de 1993 con algunas modificaciones y adaptaciones a la realidad nacional. Para el diseño de pavimentos rígidos, se adopta el método de diseño AASHTO, pero en su versión de 1998.

2.4.1. Métodos AASHTO de 1993 y 1998

En Chile, durante la década de los 90 se utilizó, para el diseño de pavimentos rígidos el método descrito en la guía AASHTO de 1986, el cual se basa en los resultados obtenidos a partir de un conjunto de circuitos de prueba experimentales construidos en Illinois, Estados Unidos, entre 1958 y 1960. La guía de 1986 fue actualizada en el año 1993 (AASHTO, 1993).

Una evaluación acerca de la aplicación del método AASHTO de 1986 en Chile (Darter, 1991), dio como resultado que este método tiende a sobredimensionar el espesor de las losas de hormigón, debido a que las condiciones climáticas chilenas son mucho menos restrictivas que las condiciones climáticas del lugar donde fue desarrollado el modelo.

El método de diseño de pavimentos de hormigón de la guía AASHTO de 1993 fue actualizado en el año 1998 mediante la publicación del Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures Part II - Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design, Este método es de tipo empírico-mecanicista, y modifica la ecuación original añadiendo nuevos términos a fin de incorporar tensiones críticas en las losas debido a la combinación de cargas de borde y efectos de temperatura. También se añade un método de verificación del escalonamiento en las juntas y agrietamiento de esquina.

2.4.2. Parámetros Generales de Diseño de Pavimentos Flexibles

En esta sección se introducen algunos parámetros de diseño requeridos para el diseño de pavimentos utilizando los métodos de diseño de pavimentos flexibles y rígidos descritos en el Manual de Carreteras de 2017.

2.4.2.1. Índice de Serviciabilidad

Durante la obtención de las ecuaciones de diseño de pavimentos en los circuitos de prueba de la AASHTO hacia fines de la década de los 50, la evaluación de la condición superficial del pavimento a través del Índice de Serviciabilidad Presente (p), el cual consistía en encuestas realizadas a automovilistas, los cuales evaluaban la condición del pavimento en una escala de 0 a 5, adoptando un valor de 5 para un pavimento nuevo en perfectas condiciones, y un valor 0 para un pavimento totalmente deteriorado. De esta forma, el índice de serviciabilidad corresponde a un valor subjetivo, basado en las opiniones de los automovilistas que circularon durante los circuitos de prueba a fines de los años 50.

Las ecuaciones generales de diseño de los métodos AASHTO de 1993 y 1998, incorporan el índice de serviciabilidad inicial (p_i) y el índice de serviciabilidad final (p_f) del pavimento.

2.4.2.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El método más utilizado universalmente para medir el nivel de confort que siente un usuario es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual, a diferencia del índice de serviciabilidad p , evalúa la rugosidad del pavimento de manera objetiva. Definido por Paterson en 1986, el IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad, o irregularidades del camino en un auto de pasajeros típico.

El IRI se define por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas, la cual es la razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia acumulada, producto de la simulación del modelo del cuarto de carro, para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h.

En términos simples, el IRI es un indicador estadístico de la regularidad superficial, que entrega la diferencia entre un perfil longitudinal teórico completamente regular ($IRI=0$), y el perfil longitudinal real, normalmente medido por una huella del camino, por ejemplo, a 600 mm del borde del pavimento.

Existe una relación entre el índice de serviciabilidad (p) y el IRI. Se han realizado numerosos estudios para obtener esta relación, llegando a resultados que no difieren mucho entre sí. En volumen 7 del Manual de Carreteras, se recomienda emplear las siguientes relaciones para relacionar ambos índices, en pavimentos de asfalto y de hormigón (ec. 2.12 y ec. 2.13 respectivamente):

$$\text{- Pavimento de Asfalto} \quad p = 5,85 - 1,68 \cdot IRI^{0,5} \quad (2.12)$$

$$\text{- Pavimento de Hormigón} \quad p = 7,10 - 2,19 \cdot IRI^{0,5} \quad (2.13)$$

2.4.2.3. Tránsito

El tránsito corresponde a uno de los principales factores que influyen en el deterioro del pavimento a lo largo de su vida de servicio. La incidencia del tránsito liviano en el deterioro de pavimentos es casi nula, por lo que suele despreciarse del análisis de carga, quedando únicamente el tránsito pesado (principalmente camiones y buses).

- **Tránsito Medio Diario Anual (TMDA)**

Para la estimación del nivel de tránsito que circulará por el pavimento y con ello el nivel de daño que recibirá la estructura, como punto de partida se requiere conocer el valor del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) actual en la vía, que corresponde al tránsito total de vehículos que circula como promedio diario en un año. Como se mencionó anteriormente, el tránsito liviano suele ser despreciado debido a que su incidencia en el pavimento es prácticamente nula, por lo que queda el TMDA de vehículos pesados, conocido como TMDAC (Tránsito Medio Diario Anual de Camiones).

- **Vida de Diseño**

Para realizar el diseño, se debe seleccionar un periodo de diseño (o vida de diseño), durante el cual se espera que el pavimento se desempeñe adecuadamente cumpliendo ciertos estándares de calidad, vale decir, condición estructural y superficial. En la Tabla 2-1 se muestran el rango de tiempo recomendados en el MC-V3, tanto para pavimentos de hormigón como pavimentos asfálticos, en función del nivel de tránsito y la zona.

Tabla 2-1: Vida de diseño según Clasificación de la Ruta (MC-V3).

Clasificación del Camino	Vida de Diseño
Transito Alto en Zonas Urbanas	10 – 30
Transito Alto en Zonas Rurales	10 – 25
Transito Medio y Bajo	5 – 20

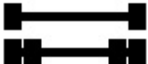
- **Tipos de Ejes**

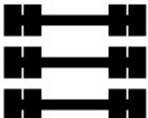
Los vehículos transmiten la carga al pavimento a través de sus ruedas, las cuales conforman el o los ejes del vehículo. Cada extremo de un eje puede estar compuesto de una o varias ruedas. Generalmente los vehículos que componen el tránsito pesado suelen tener, en la parte posterior, uno o un conjunto de ejes cercanos entre sí. En este sentido, se distinguen las siguientes configuraciones de ejes:

- **Eje Simple:** corresponde a un eje cuya distancia entre el centro de la rueda y el centro de la rueda del eje más cercano es superior 2,4 metros.
- **Eje Doble:** conjunto de dos ejes cuya distancia entre los centros de sus ruedas es superior a 1,2 metros e inferior a 2,4 metros.
- **Eje Triple:** Conjunto compuesto por tres ejes cuya distancia entre los centros de las ruedas extremas es superior a 2,4 metros e inferior a 3,6 metros.

En la Tabla 2-2 se muestran los pesos máximos permitidos en Chile por eje según lo especifica el Decreto Supremo N°158 de 1980.

Tabla 2-2: Pesos Máximos por Tipo de Eje.

Tipo de Eje	Tipo de Rodado	Peso Máximo (Ton)	Configuración
Simple	Simple	7	
Simple	Doble	11	
Doble	Simple	14	
Doble	Doble/Simple	16	
Doble	Doble	18	

Triple	Simple	19	
Triple	Doble/Simple	23	
Triple	Doble	25	

- **Eje Equivalente (EE)**

Para la estimación del daño que producirá el tránsito en el pavimento a lo largo de su vida de servicio, los métodos de diseño de pavimentos rígidos y flexibles descritos en el MC-V3 consideran la cantidad total de Ejes Equivalentes (EE) durante dicho periodo.

Un EE corresponde a un eje simple de rueda doble de 80 kN de peso (18 kips), el cual produce un daño de valor 1 en la estructura (AASHTO, 1993). Los diferentes ejes se transforman a ejes equivalentes mediante Factores de Equivalencia de Carga (FEC), los cuales relacionan la cantidad de EE que producen una determinada pérdida de serviciabilidad, con la cantidad de ejes cualquiera necesarios para producir la misma pérdida de serviciabilidad en el pavimento, según la ec. 2.14. En el MC-V3 se presentan valores de factores de equivalencia de carga para ejes de rueda doble, para distintos pesos y tipos de ejes (simples, dobles y triples). Estos factores se presentan en el Anexo B de este trabajo.

$$FEC = \frac{(\text{N}^\circ \text{ de ejes de 80 kN que producen una determinada pérdida de serviciabilidad})}{(\text{N}^\circ \text{ de ejes de X peso que producen la misma pérdida de serviciabilidad})} \quad (2.14)$$

Para la estimación de los factores de equivalencia de carga para ejes simples de rueda simple, como por ejemplo ejes frontales de camiones y buses, se ha utilizado la ec. 2.15 (Evensen, 2008).

$$FEC = \left(\frac{FA}{18 \times 0,552} \right)^{4,15} \quad (2.15)$$

, en donde FA es el peso del eje simple de rueda simple, en kips.

- **Solicitaciones de Diseño**

Finalmente, métodos de diseño de pavimentos flexibles y rígidos descritos en el MC-V3 de 2017, consideran como dato de entrada, la cantidad total de EE acumulados durante el periodo de diseño elegido. Es importante señalar que para la proyección del tránsito futuro es necesario considerar tasas de crecimiento del tránsito representativas de la zona de estudio, en base a la información disponible en la zona.

2.4.2.4. Confiabilidad

Los métodos de diseño de pavimentos descritos en el MC-V3 incorporan el concepto de confiabilidad el diseño. La confiabilidad corresponde a la probabilidad de que el pavimento se comporte de manera esperada durante el periodo de diseño, bajo las condiciones prevalecientes de la zona. De esta forma, la cantidad de EE adoptados en el diseño según el nivel de confiabilidad, está dado según la ec. 2.16:

$$\text{Log EE}_{\text{Diseño}} = \text{Log EE}_{\text{Presupuestados}} - Z_R \cdot S_0 \quad (2.16)$$

donde:

- EE_{Diseño} : Ejes Equivalentes de diseño según nivel de confianza.
 EE_{Presupuestados} : Ejes Equivalentes acumulados durante el periodo de diseño
 Z_R : Coeficiente estadístico según nivel de confianza adoptado.
 S₀ : Desviación normal del error combinado.

El valor de S₀ incluye las varianzas de todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, de las cuales la estimación del tránsito y la variabilidad de los suelos de la subrasante (en términos de capacidad de soporte) tienen una participación preponderante. Valores recomendados para la confiabilidad del diseño, y los valores de Z_r y S₀ se muestran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Pavimentos Flexibles – Valores de Confiabilidad, Z_r y S₀ (MC-V3).

EE Solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Z _R	S ₀ en función del coeficiente de 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 – 1,037	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

*Coeficiente de variación = Desviación Estándar / Promedio.

2.4.2.5. Módulo Resiliente

La resistencia tanto de suelos que componen la subrasante como de capas granulares de base y subbase de pavimentos flexibles, se expresa mediante el valor del Módulo Resiliente (M_R), cuyo valor se obtiene mediante un ensayo Triaxial Cíclico sobre una probeta sometida a una carga pulsante de duración definida, según el procedimiento descrito en la norma AASHTO T-294-92. La realización del ensayo es compleja y a veces resulta poco práctica, debido a la cantidad significativa de tiempo que conlleva su ejecución, además de requerir equipos especializados y personal entrenado.

Por esta razón, el módulo resiliente se suele estimar de manera indirecta, mediante el ensayo de Razón de Soporte de California, conocido como ensayo CBR (California Bearing Ratio). El ensayo consiste en determinar la presión necesaria para hacer penetrar un pistón de 50 mm de diámetro en

una muestra de suelo compactado a humedad óptima dentro de un molde cilíndrico de acero, en una profundidad de 12,7 mm (1/2”) a una velocidad de 1,27 mm/min. El índice CBR corresponde a la razón, expresada en porcentaje, entre dicha presión y la presión necesaria para penetrar el pistón en un material chancado normalizado, al cual se le asigna un valor de 100%. El procedimiento de ensayo se describe en detalle en la sección 8.102.11 del MC-V8, y corresponde a una adaptación de la norma chilena NCh1852.

Para estimar el Módulo Resiliente de la subrasante se pueden emplear las siguientes relaciones recomendadas en el MC-V3 (ecs. 2.17 y 2.18):

$$M_R(\text{MPa}) = 17,6 (\text{CBR})^{0,64} \quad \text{CBR} < 12\% \quad (2.17)$$

$$M_R(\text{MPa}) = 22,1 (\text{CBR})^{0,55} \quad 12\% < \text{CBR} < 80\% \quad (2.18)$$

Para materiales granulares empleados en capas de bases y subbases, se pueden emplear respectivamente las ecs. 2.19 y 2.20, recomendadas en el Código de Normas y Especificaciones Técnicas para Obras de Pavimentación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2016).

$$M_R(\text{kg/cm}^2) = -0,147(\text{CBR})^2 + 29,9(\text{CBR}) + 592 \quad 60 \leq \text{CBR} \leq 80\% \quad (2.19)$$

$$M_R(\text{kg/cm}^2) = -0,152(\text{CBR})^2 + 22,44(\text{CBR}) + 512 \quad 20 \leq \text{CBR} \leq 40\% \quad (2.20)$$

2.4.3. Ecuación de Diseño de Pavimentos Flexibles

El diseño de pavimentos de asfalto según el método descrito en el MC-V3 de 2017, está dado por la ec. 2.21.

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} \cdot 10^{(-16,40 + Z_R \cdot S_0)} \cdot M_R^{2,32} \cdot \left[\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right]^{1/\beta} \quad (2.21)$$

$$\beta = 0,40 + \left[\frac{97,81}{NE + 25,4} \right]^{5,19} \quad (2.22)$$

donde:

EE : Ejes Equivalentes
NE : Número Estructural, mm

$$NE = a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot h_2 + a_3 \cdot m_3 \cdot h_3 \quad (2.23)$$

en que:

- a_1, h_1 : Coeficiente estructural y espesor (mm) de cada una de las capas asfálticas o tratadas que componen el pavimento. Los subíndices 2 y 3 representan las capas granulares no tratadas (base y subbase).
- $m_2 \cdot m_3$: Coeficientes de drenaje de las capas no tratadas.
- Z_R : Coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte.
- S_0 : Desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.
- p_i : Índice de serviciabilidad inicial. Se adopta un valor igual a 4,2.
- p_f : Índice de serviciabilidad final. Se adopta un valor igual a 2,0.
- M_R : Módulo Resiliente de la subrasante (MPa).

Los parámetros relativos al número estructural, coeficientes de drenaje y coeficientes estructurales de las capas granulares y asfálticas, se explican en detalle en el Anexo A (sección A.2).

2.4.4. Parámetros Generales de Diseño de Pavimentos Rígidos

La valorización de los parámetros de tránsito y vida de diseño para el diseño de pavimentos rígidos es la misma que para el diseño de pavimentos flexibles descrita en la sección 2.4.2.

2.4.4.1. Confiabilidad

Valores recomendados para la confiabilidad del diseño, y los valores de Z_r y S_0 se muestran en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Pavimentos Rígidos – Valores de Confiabilidad, Z_r y S_0 (MC-V3).

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

*Coeficiente de variación = Desviación Estándar / Promedio.

2.4.4.2. Resistencia del Hormigón

Para el diseño de pavimentos de hormigón se debe utilizar exclusivamente el valor de la resistencia media de diseño a la flexotracción a 28 días. El valor a adoptar dependerá de las posibilidades que existan en la zona de proyecto para preparar hormigones de calidad. Para zonas con condiciones no restrictivas (de disponibilidad de materiales y/o equipos de preparación), se recomiendan los siguientes valores de resistencia, en función de la importancia de la Vía (Tabla 2-5).

Tabla 2-5: Resistencia a la Flexotracción Recomendada en Pavimentos de Hormigón (MC-V3)

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

2.4.4.3. Módulo de Elasticidad del Hormigón

Para efectos de diseño, se recomienda adoptar un valor del módulo de elasticidad del hormigón igual a 29.000 MPa.

2.4.4.4. Módulo de Reacción de la Subrasante

El parámetro utilizado para caracterizar la capacidad de soporte de los suelos de la subrasante en pavimentos de hormigón corresponde al Módulo de Reacción de la subrasante, k (MPa/m). El MC-V3 recomienda valores para k en función del tipo de suelo y rangos de capacidad de soporte CBR (Tabla 3.604.206.B del MC-V3, pág. 605). Para efectos de este trabajo, se ha utilizado la siguiente relación, en función de la capacidad de soporte CBR (ec. 2.24).

$$k \text{ (MPa/m)} = 69,78 \cdot \log_{10}(\text{CBR}) - 10,16 \quad (2.24)$$

2.4.5. Ecuación de Diseño de Pavimentos Rígidos – Método AASHTO de 1998

El diseño de pavimentos rígidos según el método descrito en el MC-V3 edición 2017 está dado por las siguientes ecuaciones básicas (ecs. 2.25 a 2.28):

$$\log W_{18} = \log R + \frac{G}{F} + (5,065 - 0,03295 p_f^{2,4}) \cdot \left(\log \left(\frac{S_c'}{\sigma_t'} \right) - \log \left(\frac{4,754}{\sigma_t} \right) \right) + Z_R \cdot S_0 \quad (2.25)$$

$$\log R = 5,85 + 7,35 \cdot \log \left(\left(\frac{D}{25,4} \right) + 1 \right) - 4,62 \cdot \log \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right) + 3,38 \cdot \log(L_2) \quad (2.26)$$

$$F = 1,00 + \frac{3,63 \cdot \left(\left(\frac{L_1}{4,45} \right) + L_2 \right)^{5,2}}{\left(\left(\frac{D}{25,4} \right) + 1 \right)^{8,46} \cdot L_2^{3,52}} \quad (2.27)$$

$$G = \log \left(\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right) \quad (2.28)$$

donde:

W_{18}	: Ejes Equivalentes de 80 kN acumulados durante la vida de diseño.
Z_R	: Coeficiente estadístico asociado al Nivel de Confianza.
S_0	: Desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.
D	: Espesor de la Losa (mm)
S_c'	: Resistencia media a la flexotracción del hormigón a los 28 días, con carga en los tercios (MPa).
L_1	: Carga de eje simple, 80 kN.
L_2	: Código de eje simple = 1.
p_i	: Índice de serviciabilidad inicial. Se adopta un valor igual a 4,5.
p_f	: Índice de serviciabilidad final. Se adopta un valor igual a 2,0.
σ_t'	: Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, en MPa, considerando efecto de temperatura.
σ_t	: Tensión de tracción máxima en la losa para una condición de carga de borde, en MPa, considerando efecto de temperatura, en las condiciones de prueba AASHTO.

La valorización de los parámetros σ_t' y σ_t necesarios para la determinación del espesor requerido de la losa, y el método de verificación de escalonamiento del modelo para un diseño con barras de traspaso de carga, se exponen en la sección A.3 del Anexo A.

2.5. Software OptiPave2 de Diseño de Pavimentos con Losas Cortas

OptiPave2 es un software de diseño empírico mecanicista desarrollado especialmente para el diseño de pavimentos de hormigón con losas cortas, que corresponde a la versión 2 del software inicial OptiPave. El método está basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37^a (AASHTO, 2008) y en simulaciones de tensiones realizadas con el software de elementos finitos ISLAB2000. El software fue calibrado gracias a resultados obtenidos en circuitos de prueba construidos en Illinois, y ha predicho de gran forma el desempeño de pavimentos con 7 años de servicio, para diferentes tráficos y en diferentes climas (Covarrubias V., 2012).

2.5.1. Mecanismos de Falla Considerados

Optipave2 considera los siguientes mecanismos de falla en el pavimento.

- Agrietamiento transversal en el tercio central de la losa
- Agrietamiento Longitudinal
- Agrietamiento en la Esquina
- Escalonamiento
- Rugosidad (IRI)

2.5.1.1. Agrietamiento Transversal en el tercio central de la losa.

Corresponde a una grieta transversal originada en el tercio central de la losa producto de la fatiga que se origina en el hormigón. La grieta se origina en la fibra inferior de la losa, en el punto medio de la longitud del borde de la losa.

2.5.1.2. Agrietamiento Longitudinal

Ocurre por tensiones en la fibra inferior de la losa, desarrollándose en sentido longitudinal atravesando todo el largo de la losa. La ubicación con respecto al borde en donde se origina la falla depende de varios factores, entre los que se encuentra el ancho de la losa, la magnitud del alabeo de la losa, la configuración del paso de los vehículos (distancia entre la rueda externa al borde de la losa), entre otros.

2.5.1.3. Agrietamiento de Esquina

El agrietamiento de esquina ocurre en la fibra superior de la losa. La evaluación del agrietamiento de esquina se realiza en diferentes puntos ya que el origen de la falla no siempre ocurre en la misma ubicación. Para la evaluación el agrietamiento de esquina en OptiPave2 se considera el efecto tanto de ejes simples como de ejes dobles.

2.5.1.4. Escalonamiento

Como se explicó en la sección 2.1.3, el escalonamiento en la junta corresponde a una variación de altura de los bordes de dos losas vecinas en una junta de contracción, debido al movimiento del material de la base bajo el pavimento.

2.5.1.5. Rugosidad Superficial

Tal como su nombre lo indica, corresponde a la regularidad superficial del pavimento, la cual incide directamente en la comodidad y el confort del conductor. La regularidad superficial del pavimento en OptiPave2 se mide a través del IRI (ver sección 2.4.2.2).

2.5.2. Ecuaciones de Predicción de Deterioros

En la Figura 2-16., se muestra un diagrama de flujo que resume el funcionamiento del software OptiPave2.

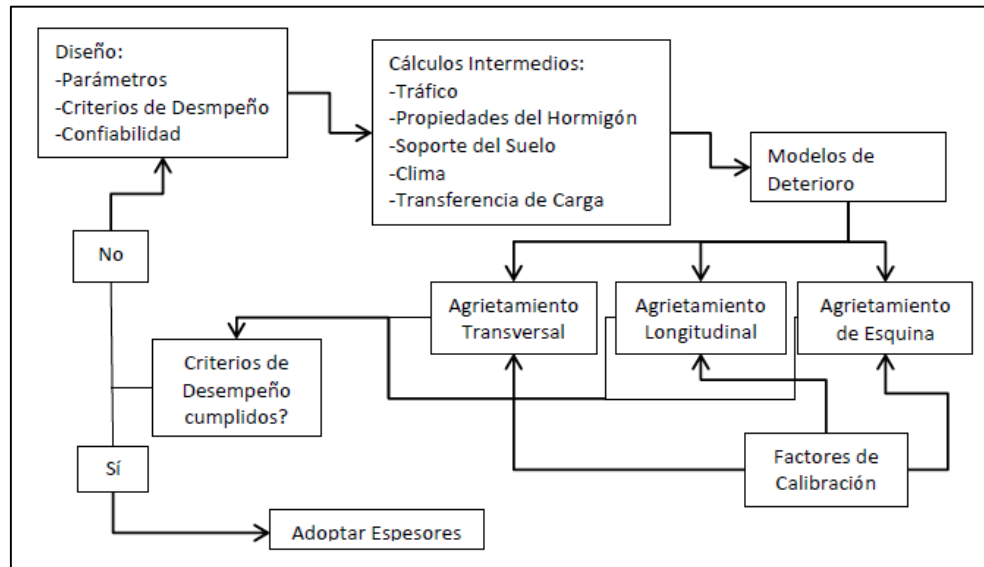


Figura 2-16: Diagrama de Flujo del funcionamiento de OptiPave2 (TCPavements, 2014).

A continuación, se muestra en forma resumida las ecuaciones de deterioro para cada tipo de falla considerado en OptiPave2.

2.5.2.1. Modelo de Agrietamiento

El modelo de agrietamiento está dado por la siguiente ecuación (ec. 229):

$$CRK = \frac{1}{1 + b \cdot FD^a} \quad (2.29)$$

donde:

- CRK : Cantidad pronosticada de agrietamiento de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo (fracción), y
- FD : Daño por fatiga total
- a : factor de calibración: -1,6 para agrietamiento transversal, -1,35 para agrietamiento longitudinal y -1,98 para agrietamiento de esquina.
- b : factor de calibración: 15,75 para agrietamiento transversal, 1,46 para agrietamiento longitudinal y 50 para agrietamiento de esquina.

La expresión general para el cálculo del daño por fatiga total, considerando todos los factores críticos para el agrietamiento transversal en el pavimento, se conoce como hipótesis de Miner, y está dado por la siguiente relación (ec. 2.30)

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l}}{N_{i,j,k,l}} \quad (2.30)$$

donde:

- $n_{i,j,k,l}$: Número de repeticiones de carga aplicadas para la condición i,j,k,l.

- $N_{i,j,k,l}$: Número de repeticiones admisibles para la condición i,j,k,l.
 i Tipo de eje.
 j Nivel de carga..
 k Diferencial de Temperatura.
 l Posición del eje.

El número de repeticiones de carga admisibles para cada condición se obtiene a través de la siguiente ecuación (ec. 2.31):

$$\log(N_{i,j,k,l}) = a \cdot \left(\frac{\sigma_{i,j,k,l}}{MOR \cdot C_1 \cdot C_2} \right)^b \quad (2.31)$$

donde:

- $\sigma_{i,j,k,l}$: Tensión aplicada, para la condición i,j,k,l.
 MOR : Resistencia a la flexotracción final (MPa).
 a Factor de calibración = 2
 b Factor de calibración = -1,22
 C_1 Constante según forma de la fractura (ec. 2.32)
 C_2 Constante que depende de la magnitud de la resistencia residual aportada por la fibra, para hormigones con fibra (ec. 2.33)

$$C_1 = a \cdot h_{pcc}^2 + b \cdot h_{pcc} + c \quad (2.32)$$

- h_{pcc} : Espesor de la losa de hormigón (cm).
 a : factor de calibración: 0,003 para agrietamiento transversal y longitudinal, y 0 para agrietamiento de esquina.
 b : factor de calibración: -0,1475 para agrietamiento transversal y longitudinal, y 0 para agrietamiento de esquina.
 c : factor de calibración: 2,7978 para agrietamiento transversal y longitudinal, y 1 para agrietamiento de esquina.

$$C_2 = 1 + R_{3,e} \quad (2.33)$$

$$R_{3,e} = \frac{f_{150}^{150}}{MOR} \cdot SF \quad (2.34)$$

donde:

- f_{150}^{150} : Resistencia residual de la fibra, obtenida para una deformación de una viga de hormigón con fibra igual a la luz de ensayo/150 (450mm/150 = 3 mm).
 MOR : Resistencia máxima a la flexión (MPa).

SF Factor de calibración: 0,75 para agrietamiento longitudinal y transversal, y 0 para agrietamiento de esquina.

El porcentaje de losas agrietadas, para una confiabilidad del 50% está dado por la siguiente ecuación (ec. 2.35):

$$CRACK = CRK_E + CRK_E + CRK_E - (CRK_E \cdot CRK_L) - (CRK_E \cdot CRK_T) - (CRK_L \cdot CRK_T) + 2 \cdot CRK_E \cdot CRK_L \cdot CRK_T \quad (2.35)$$

con:

CRACK : Total de losas agrietadas, para 50% de confiabilidad.
 CRK_E : % Losas agrietadas en Esquina.
 CRK_L : % Losas agrietadas en Longitudinalmente.
 CRK_T : % Losas agrietadas en Transversalmente.

Luego, la cantidad de losas agrietadas según el nivel de confianza seleccionado está dada por la siguiente ecuación (ecs 2.36 y 2.37):

$$CRACK_m = CRACK + Z_p \cdot STD_{CR} \quad (2.36)$$

$$STD_{CR} = a \cdot CRACK^2 + b \cdot CRACK + c \quad (2.37)$$

donde:

CRACK_m : Total de losas agrietadas, para m% de confiabilidad.
 Z_p : Coeficiente estadístico asociado al Nivel de Confianza m, en una curva de distribución normal.
 a Factor de calibración = 0,00172.
 b Factor de calibración = 0,3447.
 c Factor de calibración = 4,6772.

2.5.2.2. Modelo de Transferencia de Carga

Tanto el modelo de Escalonamiento como el de Transferencia de Carga, usan modelos incrementales por semestre. Luego, el escalonamiento en cada semestre es la suma de escalonamiento del semestre anterior y el incremento del semestre analizado. En la Figura 2-17 se muestra un diagrama de flujo del modelo de escalonamiento y transferencia de carga. Para un semestre m, se obtiene el agrietamiento, escalonamiento y la pérdida acumulada de rigidez de los agregados, la cual produce una pérdida en la transferencia de carga para el período siguiente. Finalmente se obtiene para cada semestre, el IRI promedio, que es función del agrietamiento y escalonamiento del pavimento.

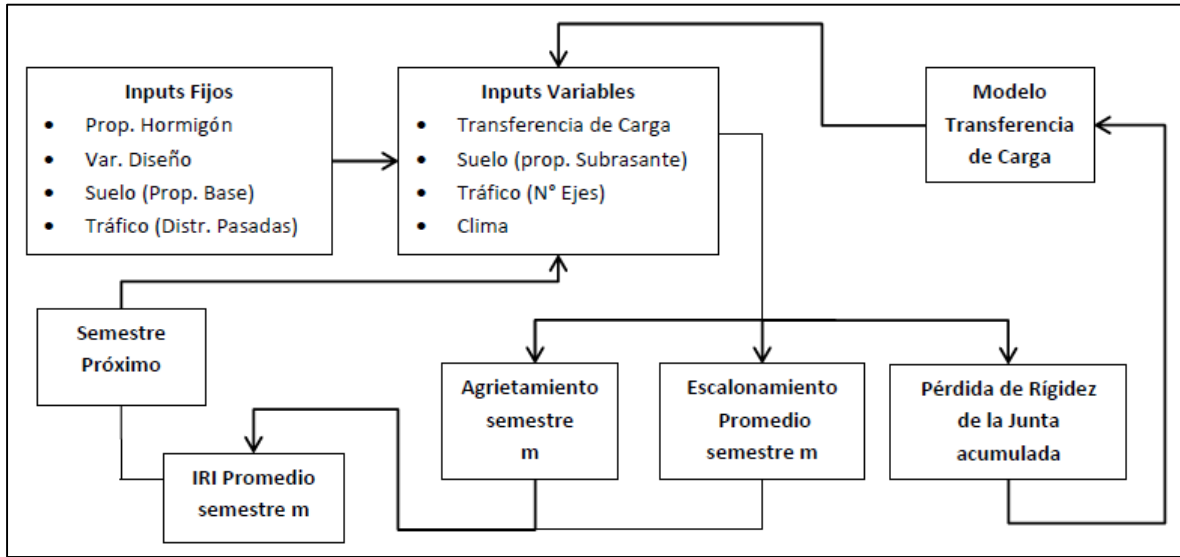


Figura 2-17: Diagrama de Flujo del Modelo de Escalonamiento y Transferencia de Carga (TCPavements, 2014).

Las repeticiones de carga a las que están sometidas las juntas del pavimento, generan un desgaste en el árido, el cual genera a su vez una pérdida de transferencia de carga. El desgaste depende en gran medida de la apertura que tenga la junta. La dureza inicial de los agregados en la junta, en función del espesor de la losa y la apertura de la junta, está dada por la siguiente ecuación (ec 2.38):

$$S = a \cdot (h_{PCC})^b \cdot e^{c \cdot j_w} \quad (2.38)$$

donde:

- S : Dureza inicial de los agregados.
- h_{PCC} : Espesor de la losa.
- j_w : Apertura de la junta.
- a : Factor de calibración = 0,0615.
- b : Factor de calibración = 1,095.
- c : Factor de calibración = -0,0165.
- e : Factor de calibración = -1,98

La pérdida de rigidez de los agregados de los agregados en la junta en un semestre, está dada por la siguiente ecuación (ec. 2.39):

$$\Delta S_i = \frac{a \cdot 10^{-6}}{b + c \cdot \left(\frac{j_w}{h_{PCC}} - d \right)^f} \cdot \left(\frac{\tau_{iA}}{\tau_{ref}} \right) \quad (2.39)$$

donde:

- ΔS_i : Pérdida de rigidez de los agregados para la categoría de peso i .
- τ_{iA} : Esfuerzo de corte en la junta debido a eje tipo A y categoría de peso i . (ec. 2.40)

- τ_{ref} : Esfuerzo de corte referencial, (ec. 2.41)
- a : Factor de calibración = 0,5.
- b : Factor de calibración = 1.
- c : Factor de calibración = -0,0165.
- d : Factor de calibración = 3.
- f : Factor de calibración = -5,7.

$$\tau_{\text{ref}} = 111,1 \cdot \exp(-\exp(0,9988 \cdot \exp(-0,1089 \cdot \text{LOG}(J_{\text{AGG}})))) \quad (2.40)$$

$$\tau_{iA} = J_{\text{AGG}} \cdot (\delta_{L,i,A} \cdot \delta_{L,i,A}) \quad (2.41)$$

donde:

- J_{AGG} : Rigidez de los agregados de la junta, calculada en ese mes.
- $\delta_{L,i,A}$: Deflexión en la esquina cargada causado por eje tipo A y categoría de peso i.
- $\delta_{L,i,A}$: Deflexión en la esquina descargada causado por eje tipo A y categoría de peso i.

Finalmente, la pérdida de rigidez de la junta en un semestre, se obtiene sumando cada pasada durante el semestre, según la siguiente ecuación (ec. 2.42):

$$\Delta S_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^2 \sum_{i=1}^{N_A} \Delta S_{i,A} \cdot n_{i,A} \quad (2.42)$$

con:

- ΔS_{tot} : Pérdida de rigidez de la junta acumulado durante el semestre
- $\Delta S_{i,A}$: Pérdida de rigidez de la junta producido por eje tipo A, carga i.
- $n_{i,A}$: Número de repeticiones de carga en el semestre para eje tipo A, carga i

2.5.2.3. Modelo de Escalonamiento

El modelo de escalonamiento de OptiPave2, realiza un cálculo incremental semestral tomando en cuenta el escalonamiento acumulado en los semestres anteriores. El cálculo se realiza para un periodo igual a la vida del pavimento, desde la apertura al tránsito del pavimento. El modelo utilizado corresponde al modelo de Khazanovich et al. (2004), y está dado por las siguientes relaciones (ecs 2.43 a 2.46).

$$\text{Fault}_m = \sum_{i=1}^m \Delta \text{Fault}_i \quad (2.43)$$

$$\Delta \text{Fault}_i = C_{34} \cdot (\text{FAULTMAX}_{i-1} - \text{Fault}_{i-1})^2 \cdot \text{DE}_i \quad (2.44)$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \cdot \sum_{j=1}^m DE_j \cdot \log(1 + C_5 \cdot 5,0^{EROD})^{C_6} \quad (2.45)$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} \cdot \delta_{curling} \cdot \left[\log(1 + C_5 \cdot 5,0^{EROD}) \cdot \log\left(\frac{P_{200} \cdot WetDays}{P_S}\right) \right]^{C_6} \quad (2.46)$$

donde:

- Fault_m : Escalonamiento promedio en el semestre m, pulg.
- ΔFault_i : Incremento semestral en el escalonamiento promedio durante el semestre i, pulg.
- FAULTMAX_i : Máximo escalonamiento promedio para el semestre i, pulg.
- FAULTMAX₀ : Máximo escalonamiento promedio inicial, pulg.
- EROD : Factor de Erosión base/subbase.
- DE_i : Diferencial de energía acumulado durante el semestre i = 0,12.
- δ_{curling} : Máxima deflexión mensual, debido al alabeo por temperatura y humedad de la losa.
- P_S : Sobrecarga de la subrasante, en libras.
- P₂₀₀ : Porcentaje del material de la base (capa bajo el pavimento) que pasa por la malla #200.
- WetDays : Número de días promedio al año con precipitaciones (precipitación diaria sobre 5 mm).
- C₁₂ = C₁ + C₂ · FR^{0,25}.
- C₃₄ = C₃ + C₄ · FR^{0,25}.
- C₁ : Constante de calibración = 1,0184.
- C₂ : Constante de calibración = 0,9166.
- C₃ : Constante de calibración = 0,0022.
- C₄ : Constante de calibración = 0,0009.
- C₅ : Constante de calibración = 250.
- C₆ : Constante de calibración = 0,4.
- C₇ : Constante de calibración = 1,8331.
- FR : Índice de congelamiento de la base (Porcentaje del tiempo en el año en que la base se encuentra bajo los 0°C).

2.5.2.4. Modelo de Rugosidad Superficial (IRI)

El modelo de IRI utilizado por OptiPave2 está dado por la siguiente relación (ec. 2.47):

$$IRI = IRI_I + C_1 \cdot CRK + C_2 \cdot SPALL + C_3 \cdot TFAULT + C_3 \cdot SF \quad (2.47)$$

donde:

- IRI : IRI predicho, pulg/milla.

IRI _I	:	Rugosidad inicial, medida en términos de IRI, pulg/milla.
CRK	:	Porcentaje de losas agrietadas.
SPALL	:	Porcentaje de losas con desconches.
TFAULT	:	Escalonamiento promedio acumulado por milla, pulg.
SF	:	Factor de Sitio.
C ₁	:	Constante de calibración = 0,013.
C ₂	:	Constante de calibración = 0,007.
C ₃	:	Constante de calibración = 0,0008.
C ₄	:	Constante de calibración = 0,003.
SF	=	$AGE \cdot (1 + 0,5556 \cdot FI) \cdot (1 + P_{200}) / 1.000.000$
con:		
FI	:	Índice de Congelamiento, °F · días.
P ₂₀₀	:	Porcentaje del material de la base (capa bajo el pavimento) que pasa por la malla #200.

2.5.3. Parámetros de Diseño del Software

Los parámetros de diseño utilizados por el software OptiPave2 son los siguientes:

- **Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento**

En este grupo de parámetros se encuentran las dimensiones de las losas (largo, espesor), tipo de borde del pavimento, sobrealcance de losas, barras de traspaso de cargas y umbrales de deterioro (porcentaje de losas agrietadas, escalonamiento promedio e IRI final).

- **Parámetros de Diseño del Tráfico**

En este grupo de parámetros se encuentran el método de medición del tráfico (ejes equivalentes o espectro de carga, repeticiones de carga acumuladas, tasas de crecimiento, distribución lateral del tránsito, entre otros).

- **Parámetros de Diseño del Hormigón**

Se incluyen las propiedades del hormigón, tales como tipo de resistencia especificada (compresión o flexotracción), resistencia del hormigón, peso específico, coeficiente de retracción, módulo de elasticidad, módulo de Poisson, entre otros.

- **Parámetros de Diseño del Suelo**

Incluye las propiedades de cada una de las capas consideradas en el diseño del pavimento (módulo resiliente y módulo de Poisson), porcentaje de material fino de la capa bajo el pavimento, coeficiente de fricción entre la losa y la capa bajo el pavimento, entre otros.

- **Parámetros de Diseño del Clima**

Entre los parámetros del clima se tiene la zona climática (zonas de Chile o climas genéricos), temperaturas medias de verano y de invierno, gradiente equivalente de construcción, índice de congelamiento de la base, entre otros.

Cada uno de estos y otros parámetros específicos de diseño utilizados por OptiPave2, junto a los valores recomendados de diseño, se muestran en detalle en la sección A.1 del Anexo A.

2.6. Diseño de Pavimentos de Asfalto – Software de la MEPDG

La MEPDG, publicada por la AASHTO en el año 2008, actualmente es la herramienta más actual y completa en lo referente al diseño de pavimentos rígidos y flexibles. Este método de diseño fue creado a partir de la necesidad de incorporar principios mecanicistas en los diseños de pavimentos. El desarrollo de la MEPDG fue patrocinado por un grupo de trabajo de la AASHTO, en cooperación con la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y la Federal Highway Administration (FHWA), bajo el proyecto NCHRP 1-37^a.

2.6.1. Visión General de la MEPDG

El diseño de pavimentos utilizando este método, es un proceso iterativo, cuyos resultados son los deterioros o fallas y la regularidad superficial del pavimento, no los espesores de las capas. Por esta razón, se consideran las condiciones locales de la zona del proyecto (tráfico, clima, capas granulares, condición del pavimento existente en el caso de rehabilitación), para luego proponer un diseño de prueba de pavimento nuevo o estrategia de rehabilitación, según corresponda.

El diseño es evaluado con el fin de adecuar los datos ingresados, los criterios de desempeño y los valores de confiabilidad adoptados para la predicción de los deterioros o fallas y la regularidad superficial. Si el diseño no cumple con los criterios de desempeño establecidos, se reevalúa hasta satisfacer los criterios de desempeño elegidos dadas las condiciones locales.

2.6.2. Niveles Jerarquicos de Datos de Entrada

El ingreso de los datos de entrada en la MEPDG se realiza a través de tres niveles, los cuales dependen del grado de conocimiento que se tenga acerca de los parámetros.

- **Nivel de entrada 1:** Los parámetros de entrada de nivel 1 corresponden a datos medidos directamente, mediante ensayos de laboratorio y/o pruebas específicas para cada sitio o proyecto. Este nivel es el que representa de manera más precisa el parámetro de entrada para el diseño, lo cual involucra mayores costos durante la recopilación de información.
- **Nivel de entrada 2:** Los parámetros de nivel 2 son estimados a partir de correlaciones o ecuaciones de regresión, en base a otras propiedades o ensayos más fáciles de realizar. Un ejemplo de un dato de entrada de nivel 2 corresponde al módulo resiliente de la subrasante o capas granulares estimado en base a correlaciones con el CBR.

- **Nivel de entrada 3:** Los parámetros de nivel 3 corresponden a valores por defecto de carácter nacional para datos de entrada, por lo que no se requiere de ensayos de laboratorio o pruebas específicas en la zona del proyecto.

2.6.3. Criterios de Desempeño y Confiabilidad

En la Tabla 2-6 se muestran los deterioros de pavimentos flexibles predichos por la MEPDG, junto a los valores umbral recomendados al término de la vida de diseño, en base a la importancia de la vía.

La MEPDG permite realizar diseños de pavimento en base a cierto valor de confiabilidad (R). La confiabilidad de diseño se define como la probabilidad (P) de que el deterioro del pavimento al final de su vida de servicio, sea menor al valor umbral crítico adoptado para dicho deterioro. Esto significa que, por ejemplo, si se diseñan 10 proyectos con una confiabilidad de diseño para el ahuellamiento de 90%, uno de ellos, en promedio, presentaría valores de ahuellamiento por sobre el valor umbral fijado para ese deterioro.

En la Tabla 2-7 se muestran valores recomendados de confiabilidad según la clasificación funcional de la vía.

Tabla 2-6: Criterios de Desempeño de la MEPDG – Pavimentos Flexibles (AASHTO, 2008).

Criterios de Desempeño	Valor Máximo al final de la Vida útil de Diseño
Fisuramiento piel de cocodrilo (fisuramiento de abajo hacia arriba).	Interestatal: 10% del área del carril Primaria: 20% del área del carril. Secundaria: 35% del área del carril.
Profundidad del Ahuellamiento (deformación permanente en las trayectorias de las ruedas).	Interestatal: 0,40 plg. Primaria: 0,50 plg. Otros: (<45 mph): 0,65 plg.
Longitud del Fisuramiento Transversal (Fisuras térmicas)	Interestatal: 500 pies/milla. Primaria: 700 pies/milla. Secundaria: 700 pies/milla.
IRI (Regularidad superficial)	Interestatal: 160 plg./milla. Primaria: 200 plg./milla. Secundaria: 200 plg./milla.

Tabla 2-7: Valores recomendados de Confiabilidad de la MEPDG (AASHTO, 2008).

Clasificación Funcional	Nivel de Confiabilidad	
	Urbano	Rural
Interestatal / Autopistas	95	95
Arterias Principales	90	85
Coletores	80	75
Local	75	70

2.6.4. Ecuaciones de Deterioro Para Pavimentos Flexibles y Recapados de Asfalto

2.6.4.1. Profundidad del Ahuellamiento

La profundidad del ahuellamiento está dada por la siguiente relación (ec. 2.48):

$$\Delta_{p(HMA)} = \epsilon_{p(HMA)} \cdot h_{(HMA)} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(HMA)}^{10^{k_{1r} n^{k_{2r} \beta_{2r} T^{k_{3r} \beta_{3r}}}} \quad (2.48)$$

donde:

- $\Delta_{p(HMA)}$: Deformación acumulada permanente o deformación plástica vertical acumulada en la subcapa/capa de HMA, en plg.
- $\epsilon_{p(HMA)}$: Deformación unitaria permanente o plástica axial acumulada en la subcapa/capa de HMA, en plg./plg.
- $\epsilon_{r(HMA)}$: Deformación unitaria resiliente o elástica calculada por el modelo de respuesta estructural a una profundidad media de cada subcapa de HMA, en plg./plg.
- $h_{(HMA)}$: Espesor de la Subcapa/capa de HMA, en plg.
- n : Número de repeticiones de carga por eje
- T : Temperatura de la mezcla o del pavimento, °F.
- k_z : Factor de confinamiento de profundidad.
- k_{1r}, k_{2r}, k_{3r} : Parámetros de calibración global de campo (de la recalibración realizada en el proyecto NCHRP 1-40D; $k_{1r} = -3,35412$, $k_{2r} = 0,4791$, $k_{3r} = 1,5606$)
- $\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$: Constantes de calibración locales o de mezclas en el campo, para la calibración global, estas constantes se establecieron en 1.0.

$$k_z = (C_1 + C_2 \cdot D) 0,328196^D \quad (2.49)$$

$$C_1 = -0,1039(H_{HMA})^2 + 2,4868H_{HMA} - 17,342 \quad (2.50)$$

$$C_2 = 0,0172(H_{HMA})^2 - 1,7331H_{HMA} + 27,428 \quad (2.51)$$

donde:

- D : Profundidad debajo de la superficie, en plg.
- H_{HMA} : Espesor total de HMA, en plg.

2.6.4.2. Fisuramiento Relacionado con la Carga

La MEPDG predice dos tipos de fisuras relacionadas con la carga: las fisuras de piel de cocodrilo y las fisuras longitudinales. El software asume que las grietas de piel de cocodrilo se inician en la parte inferior de las capas asfálticas, mientras que asume que las grietas longitudinales se inician en la superficie. El número máximo admisible de repeticiones de carga para cada tipo de agrietamiento está dado por la siguiente relación:

La profundidad del ahuellamiento está dada por la siguiente relación (ec. 2.52):

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (2.52)$$

donde:

- N_{f-HMA} : Número permitido de repeticiones de carga por eje para un pavimento flexible y recapados de HMA.
 ε_t : Deformación unitaria por tensión en lugares críticos y calculados por el modelo de respuesta estructural, en plg/plg.
 E_{HMA} : Módulo dinámico del HMA medido en compresión, en psi.
 k_{f1}, k_{f2}, k_{f3} : Parámetros de calibración global de campo (de la recalibración realizada en el proyecto NCHRP 1-40D; $k_{f1} = 0,007566$, $k_{f2} = -3,9492$, $k_{f3} = -1,281$).
 $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$: Constantes de calibración locales o de mezclas en el campo, para la calibración global, estas constantes se establecieron en 1.0.

$$C = 10^M \quad (2.53)$$

$$M = 4,84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0,69 \right) \quad (2.54)$$

donde:

- V_{be} : Contenido de asfalto efectivo por volumen, en %.
 V_a : Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla de HMA.
 C_H : Factor de corrección de espesor, dependiente del tipo de fisuramiento.

Para fisuramiento de piel de cocodrilo o de abajo hacia arriba (ec. 2.55):

$$C_H = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49H_{HMA})}}} \quad (2.55)$$

Para fisuramiento longitudinal o de arriba hacia abajo (ec. 2.56):

$$C_H = \frac{1}{0,01 + \frac{12,00}{1 + e^{(15,676 - 2,8186H_{HMA})}}} \quad (2.56)$$

donde:

- H_{HMA} : Espesor total de HMA, en plg.

Luego, la MEPDG calcula los índices de daño incremental a profundidades críticas siguiendo una malla patrón a lo largo de las capas asfálticas. El índice de daño incremental (ΔDI) se

calcula dividiendo el número real de cargas por eje por el numero admisible de cargas de ese eje, lo cual se conoce como hipótesis de Miner. El índice de daño acumulado (DI) para cada ubicación crítica se calcula como la suma de los índices de daño incremental a lo largo del tiempo, según la siguiente ecuación (ec. 2.57):

$$DI = \sum (\Delta DI)_{j,m,l,p,T} = \sum \left(\frac{n}{N_{f-HMA}} \right)_{j,m,l,p,T} \quad (2.57)$$

donde:

- n : Número real de repeticiones de carga por eje dentro de un periodo de tiempo específico
- j : Intervalo de carga por eje
- m : Tipo de carga por eje (ejes simples, dobles, triples, cuádruples, o configuración de eje especial).
- l : Tipo de camión utilizado. Grupos de clasificación de camiones incluidos en la MEPDG
- p : Mes
- T : Temperatura media para cinco intervalos de temperatura o quintiles usados para subdividir cada mes, en °F.

A partir del daño acumulado (ec. 2.57), la MEPDG calcula el área de fisuramiento de piel de cocodrilo y la longitud del fisuramiento longitudinal, a partir de las ecuaciones presentadas a continuación.

El porcentaje del área de agrietamiento por fatiga se calcula mediante la siguiente relación (ec. 2.58):

$$FC_{Bottom} = \left(\frac{1}{60} \right) \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \log(DI_{Bottom} \cdot 100))}} \right) \quad (2.58)$$

donde:

- FC_{Bottom} : Área del fisuramiento de piel de cocodrilo que inicia en la parte inferior de las capas de HMA, % del área total del carril.
- DI_{Bottom} : Índice de daño acumulado en la parte inferior de las capas de HMA
- $C_{1,2,4}$: Constantes de regresión de la función de transferencia ($C_4 = 6000$, $C_1 = 1$, $C_2 = 1$).

$$C_1^* = -2C_2^* \quad (2.59)$$

$$C_2^* = -2,40874 - 39,748(1 + H_{HMA})^{-2,856} \quad (2.60)$$

donde:

H_{HMA} : Espesor total de HMA, en plg.

Para la predicción de la longitud de las fisuras longitudinales por fatiga, se utiliza la siguiente expresión (ec. 2.61):

$$FC_{Top} = 10,56 \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 - C_2 \text{Log}(DI_{Top}))}} \right) \quad (2.61)$$

donde:

- FC_{Top} : Longitud de fisuras longitudinales que inician en la parte superior de la capa de HMA, pies/milla.
 DI_{Top} : Índice de daño acumulado cerca de la parte superior de la superficie de HMA.
 $C_{1,2,4}$: Constantes de regresión de la función de transferencia ($C_4 = 7$, $C_1 = 3,5$, $C_2 = 1000$).

2.7. Especificación de Ligantes Asfálticos SUPERPAVE

El diseño de pavimentos asfálticos mediante la MEPDG presentados en este trabajo considera, en la selección de ligantes asfálticos, el sistema SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement), el cual es el resultado de un programa de investigación desarrollado entre 1987 y 1993, denominado Strategic Highway Research Program (SHRP). El objetivo de este programa fue obtener nuevas metodologías para el diseño de mezclas asfálticas, selección de ligantes asfálticos, materiales granulares y modelos de predicción de comportamiento de pavimentos asfálticos.

Actualmente en Chile, los ligantes asfálticos se clasifican por viscosidad, lo que permite elegir dos tipos de ligante según la zona en la que se encuentre el proyecto: CA 14 y CA. Este sistema de clasificación no asegura el buen desempeño de la mezcla dadas las características climáticas de la zona, ya que los ensayos que incluye la especificación por viscosidad se realizan bajo temperaturas previamente establecidas, las cuales no necesariamente coinciden con las temperaturas presentadas en terreno.

El método de clasificación Superpave, se basa en el desempeño, ya que la selección de ligantes asfálticos considera las temperaturas presentadas en terreno. Además, este método busca evitar tres principales fallas que se presentan en los pavimentos de asfalto: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. Para tal fin, la especificación SUPERPAVE incluye nuevos ensayos que permiten caracterizar las propiedades fundamentales de los ligantes. Adicionalmente, se incorporan criterios que consideran el volumen de tránsito, tiempo de carga y envejecimiento de la mezcla al momento de realizar los ensayos.

2.7.1. Grados de Desempeño

El sistema Superpave clasifica los ligantes asfálticos según grado de desempeño, o grado PG (Performance Grade). Los grados de desempeño consisten principalmente en temperaturas. La nomenclatura general de un ligante asfáltico Superpave es de la siguiente forma (ec. 2.62):

donde:

- PG : Performance Grade, grado de desempeño.
 XX : Nomenclatura que hace referencia a la alta temperatura
 YY : Nomenclatura que hace referencia a la baja temperatura

Tanto para baja y alta temperatura, la diferencia entre un grado PG y otro es de 6°C. De esta forma, la especificación de asfaltos Superpave incluida en el Volumen 8 del Manual de Carreteras (MC-V8), incluye los siguientes grados de desempeño (Tabla 2-8).

Tabla 2-8: Ligantes Superpave – Grados de Desempeño PG (MC-V8).

Grados de Desempeño Ligantes Superpave	
Alta Temperatura (XX), °C	Baja Temperatura (YY) °C
46	34; 40; 46
52	10; 16; 22; 28; 34; 40; 46
58	16; 22; 28; 34; 40
64	10; 16; 22; 28; 34; 40
70	10; 16; 22; 28; 34; 40
76	10; 16; 22; 28; 34
82	10; 16; 22; 28; 34

Por ejemplo, un ligante asfáltico PG 64-28, se desempeñará adecuadamente a temperaturas inferiores a 64°C, en donde predomina la deformación permanente a altas temperaturas (ahuellamiento). El mismo ligante se desempeñará adecuadamente a temperaturas superiores a -28°C, para la cual predomina el agrietamiento térmico en las capas asfálticas.

Los ligantes asfálticos tienen asociadas temperaturas intermedias, en las cuales predomina el agrietamiento por fatiga. La temperatura intermedia se calcula según la siguiente relación:

$$T_{Intermedia} = \frac{Grado_{Alta T^{\circ}} + Grado_{Baja T^{\circ}}}{2} + 4 \quad ^{\circ}C \quad (2.63)$$

donde:

- $T_{Intermedia}$: Temperatura intermedia asociada al ligante asfáltico PG XX-YY
 $Grado_{Alta T^{\circ}}$: Grado de alta temperatura, XX, °C
 $Grado_{Baja T^{\circ}}$: Grado de alta temperatura, YY, °C

Para el ligante asfáltico del ejemplo anterior, de grado PG 64-28, se tiene:

$$T_{Intermedia} = \frac{64 - 28}{2} + 4 = 22^{\circ}\text{C}$$

, lo cual significa que el ligante tendrá un buen comportamiento para zonas con temperaturas intermedias iguales o mayores a 22°C, para la falla que predomina a temperaturas intermedias (agrietamiento por fatiga).

2.7.2. Confiabilidad

Para el cálculo del grado de desempeño de un ligante en determinada zona, se requiere adoptar el valor de confiabilidad que se le quiere asignar. Los valores de confiabilidad generalmente más usados corresponden a 50% y 98%. Es necesario adoptar un valor de confiabilidad debido a que en la metodología Superpave, se asume que las temperaturas extremas se distribuyen de acuerdo a una distribución normal de probabilidad.

2.7.3. Zonificación SuperPave

A modo de realizar diseños de pavimentos asfálticos con la MEPDG, en los cuales se utilicen ligantes asfálticos especificados por desempeño, en la Figura 2-18 se muestra la zonificación Superpave para Chile, con un 98% de confiabilidad (Delgadillo et al., 2016).

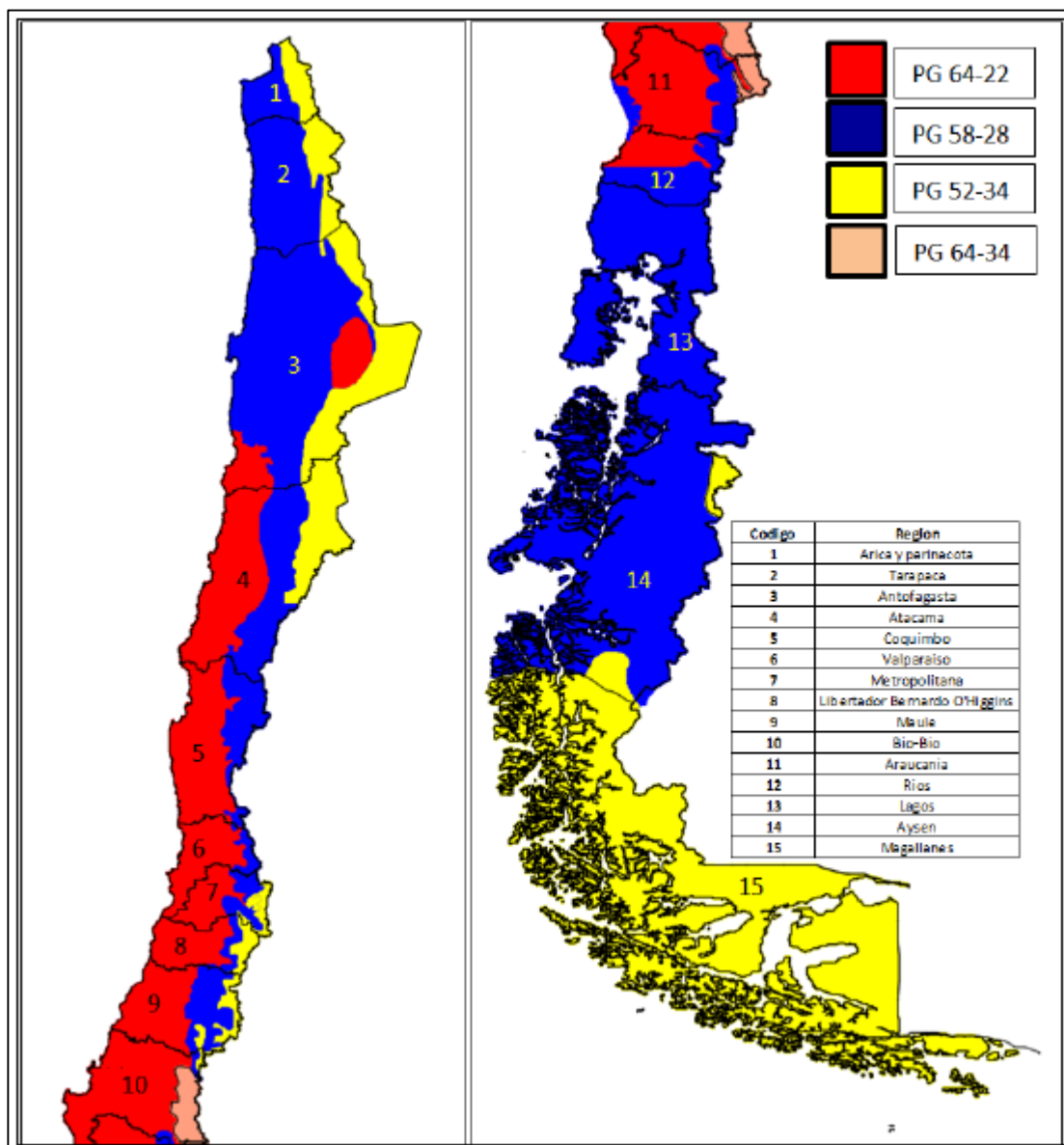


Figura 2-18: Zonificación Superpave para Chile, 98% de Confiabilidad (Delgadillo et al, 2016).

2.8. Análisis del Costo del Ciclo de Vida de Alternativas

El análisis del costo del ciclo de vida consiste en un análisis técnico, basado en principios económicos bien establecidos, que se usa para evaluar la eficiencia económica general a largo plazo entre diversas alternativas de opciones de inversión. El análisis del costo del ciclo de vida se usa para evaluar y comparar el costo para la empresa constructora un número cualquiera de alternativas de pavimentación, incluyendo una diversidad de soluciones ya sea en hormigón o asfalto. Cuando este análisis del costo del ciclo de vida de las alternativas de diseño o de rehabilitación de un pavimento

se realiza correctamente, es capaz de identificar la estrategia que entrega el mejor valor con el desempeño esperado, al menor costo durante el periodo en análisis.

Para realizar un análisis del costo del ciclo de vida de una alternativa de pavimentación, se consideran las siguientes etapas (ACPA, 2012):

1. Selección de un periodo de análisis
2. Selección de una tasa de descuento
3. Estimación de los costos iniciales
4. Estimación de los costos para el usuario
5. Estimación de costos futuros
6. Estimación de un valor residual
7. Comparación entre alternativas

Para este trabajo, se considerará sólo la estimación de costos iniciales y costos futuros de mantenimiento, dejando fuera del alcance de este trabajo la estimación de costos para los usuarios.

2.8.1. Periodo de Análisis Recomendado

Para el análisis de los costos del ciclo de vida, el periodo de análisis seleccionado debería ser lo suficientemente largo para abarcar el periodo de desempeño del nuevo diseño o conservación y rehabilitación, y al menos incluir una actividad importante de la conservación o rehabilitación para cada alternativa. Por esta razón, la American Concrete Pavement Association (ACPA) recomienda un periodo de análisis de 35 a 50 y más años.

2.8.2. Valor Residual

El valor residual de los pavimentos puede ser definido de las siguientes tres formas (ACPA, 2012):

- El valor neto que el pavimento tendría en el mercado si es reciclado al final de su periodo de desempeño. Este valor se conoce como valor de salvamento.
- El valor de la vida remanente al final del periodo de análisis, y
- El valor del pavimento existente como capa de soporte para una sobrecarpeta o sobrecapa, al final del periodo de análisis.

El hormigón es un material 100% reciclable. Al término de su vida de fatiga, este material se puede triturar y reutilizar en diferentes formas como, por ejemplo, para material de subbase para un pavimento de hormigón nuevo.

Al igual que los pavimentos de hormigón, los materiales asfálticos también son 100% reciclables. Los Pavimentos Asfálticos Recuperados (Reclaimed Asphalt Pavements, RAP) se hicieron populares durante la década de 1970, debido al incremento del precio del petróleo crudo durante el embargo del petróleo árabe (FHWA, 2011). Los RAP presentan numerosas ventajas, tales como:

- Reutilización de material
- Disminución del volumen de botaderos
- Reducción de costos en pavimentación
- Ahorro en importación y extracción de materia prima (asfalto y áridos)
- Conservación de suministro de material virgen
- Disminución en los tiempos de intervención en el camino
- Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra (disminución del porcentaje de cemento asfáltico).

Durante el año 2012 en Chile, la Dirección de Vialidad llevó a cabo la construcción de tramos de prueba considerando un 20% de RAP, como parte del mejoramiento de la Ruta F-50, sector Lo Orozco, Quilpué (Zúñiga, 2016).

CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Introducción

La Carretera El Cobre (CEC), cuyo nombre oficial es Av. Presidente Eduardo Frei Montalva, corresponde a la única vía de acceso hacia el mineral El Teniente. Construida a finales de la década de los 60, tiene una longitud total de 64 km, a lo largo de cinco tramos. La CEC está construida de pavimento asfáltico en la mayor parte de su extensión, en estado visiblemente avanzado de deterioro producto de las condiciones particulares de tránsito y climáticas de esta ruta.

Por otro lado, esta carretera se compone de calzada simple bidireccional, por lo que realizar actividades de mantenimiento genera un gran impacto en el tránsito vehicular. Por esta razón, para todos los análisis y diseños de pavimento presentados en este trabajo, y ante una eventual pavimentación de prueba, se ha escogido una zona de estudio específica dentro de la carretera, en la cual se ubica una pista auxiliar de tránsito lento.

En este capítulo se expone, someramente, las características geográficas de la CEC, sus tramos y la zona de estudio escogida. Para esta última se presenta, además, estimaciones acerca del nivel de tránsito y condición estructural del pavimento existente, en base a estudios y antecedentes disponibles dentro de la DET. Junto a esto se realiza un levantamiento de información climática a partir de registros históricos de las estaciones meteorológicas existentes en el área alta de la División. La información presentada en este capítulo será utilizada para realizar diseño de alternativas de pavimentación en hormigón y asfalto, los cuales serán presentados en los capítulos posteriores.

3.2. Carretera El Cobre (CEC)

La CEC está conformada de cinco tramos (Figura 3-1), comenzando en pleno centro de Rancagua y finalizando en una de las entradas subterráneas de la mina, denominada ADIT42 (de la sigla Acceso Drenaje Inyección Transporte). Debido a la ubicación geográfica y variación de altura, esta ruta presenta condiciones climáticas variadas, por lo que resulta útil para la DET dividir la carretera en tramos y establecer límites de velocidad y otras medidas preventivas en base a la condición climática actual en cada tramo. El tránsito vehicular es libre sólo para el Tramo 1. Los tramos 2 a 5 corresponden al área alta de la DET y son de acceso restringido sólo a personal de la DET y las distintas empresas contratistas que prestan servicios a la División. El control de ingreso al área alta de la División y al mineral El Teniente se encuentra ubicado en el sector Maitenes de Machalí, por lo que se conoce como control Maitenes. La conservación de la CEC está a cargo de la Unidad Operación Carretera (UOC) de la DET, la cual se encarga de velar por la seguridad y operatividad de cada uno de los tramos que componen esta carretera durante todos los días del año.

3.2.1. Tramos de la CEC

A continuación, se describen los distintos tramos que conforman la CEC.

- **Tramo 1 (Rancagua – Maitenes y Variante Coya)**

Inicia en la ciudad de Rancagua, en la intersección de las avenidas Capitán Antonio Millán y General José de San Martín, y se extiende por aproximadamente 21,2 km hacia el este de la ciudad, finalizando en el control Maitenes. De dicho lugar nace la variante Coya, con una longitud aproximada de 4 km en dirección este, hasta el pueblo de Coya. Allí se encuentra la central eléctrica de la DET y comienza la vía conocida como la “Ruta del Ácido” debido a que por dicha ruta se transporta el ácido sulfúrico producido por la División hacia la Estación de Transferencia Férrea El Olivar. El Tramo 1 y la Variante Coya son de tránsito vehicular libre. No obstante, el mantenimiento vial está a cargo de la UOC. El Tramo 1 está constituido en su mayoría por pavimento asfáltico. Solo en los primeros 7 km (pleno centro de Rancagua), el pavimento es de hormigón.

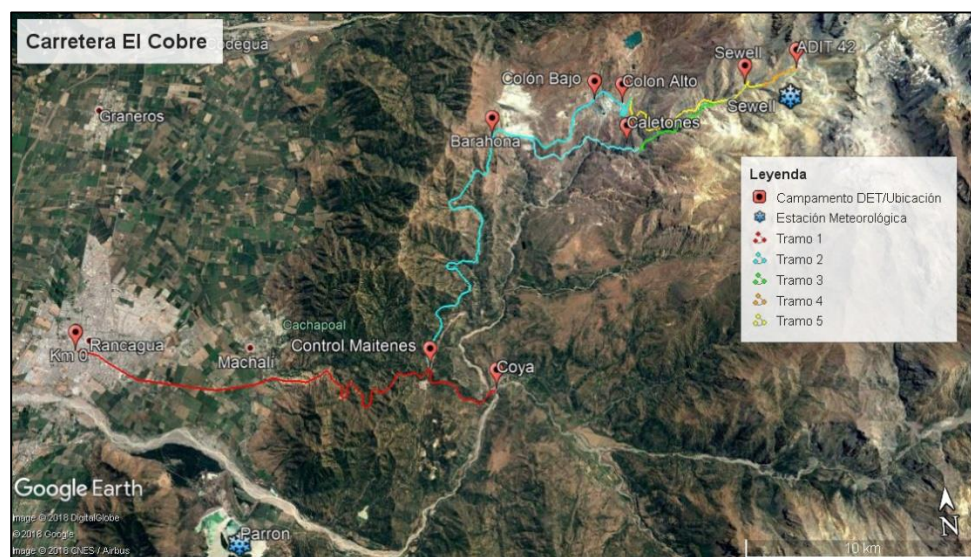


Figura 3-1: Carretera El Cobre Presidente Eduardo Frei Montalva.

- **Tramo 2 (Maitenes – Colón Alto y Variante Caletones)**

Comienza en el control de ingreso Maitenes y finaliza en el sector industrial Colón (Colón alto), cerca del acceso al Ferrocarril Teniente 8 y Maestranzas (km 48,5). Su longitud aproximada es de 28 km. Dentro del Tramo 2 se ubican los campamentos Barahona (km 38,5), Colón Bajo (km 45) y Colón Alto (km 47). En Barahona se encuentra ubicado personal de la gerencia de Recursos Hídricos, parte del personal de la UOC, silos de sal (utilizada para deshielo de la carretera), bodegas, entre otros. En Colón se ejecutan principalmente las operaciones de chancado del material que se extrae de la mina. En Colón Bajo se encuentra ubicado personal de la UOC, taller mecánico y maquinarias necesarias (camiones barrenieve) para mantener la carretera operativa en todo momento ante condiciones climáticas que alteren las condiciones de seguridad de la carretera, tales como neblina y nevadas. A partir del km 40,5 nace la ruta variante Caletones, principal vía de acceso hacia la fundición que lleva el mismo nombre. Esta vía tiene una extensión de 6 km y finaliza en el Puente de La Escoria, conectando con el inicio del Tramo 3.

- **Tramo 3 (Caletones – La Junta)**

Comienza en el Puente de La Escoria, en zona aledaña a la Fundición Caletones, y se extiende 6 km hasta el sector de La Junta (bodegas), cerca de Sewell. El Tramo 3 antiguamente conectaba la fundición Caletones con Sewell y la mina. Actualmente no está habilitado para la circulación de vehículos debido a que no cumple con las condiciones de seguridad necesarias, utilizándose sólo en situaciones de emergencia, previa evaluación geomecánica.

- **Tramo 4 (Sewell – ADIT 42)**

Este tramo es la continuación del tramo 5, en el sector conocido como “inclinado 45 toneladas”. Su longitud es de aproximadamente 5 km y finaliza en el portal ADIT 42, que es una de las entradas al nivel 4 de la mina subterránea.

- **Tramo 5 (Colón – Sewell)**

Este tramo inicia en el sector de acceso al Ferrocarril Teniente 8 y Maestranzas en el sector de Colón Alto (km 48,5), donde finaliza el Tramo 2. Su longitud es de aproximadamente 10 km. Se caracteriza por poseer zonas de la ruta con curvas cerradas, pendiente fuerte y tramos de geometría angosta, por lo que la velocidad máxima de circulación en todo el tramo es de 40 km/h. Entre los km 52 y 53 se encuentra el Túnel Copado, el cual posee sólo una pista de circulación, razón por la cual el tránsito es controlado por semáforo. El tramo 5 finaliza en Sewell, en la zona denominada “sector inclinado 45 toneladas” (km 58,5).

3.3. Zonificación Climática

En la Figura 3-2 se muestran los tipos de clima de Chile según la clasificación climática de Wladimir Köppen (Riosco & Tesser, 2006). En ella se observa además la ubicación geográfica de 69 estaciones meteorológicas del país. Considerando la ubicación de las estaciones Parrón y Sewell de la Figura 3-1 y la Figura 3-2, se puede observar que dentro de la CEC predominan principalmente tres tipos de clima:

- **Templado cálido con lluvias invernales (Csb):** clima de lluvias estacionales. La temperatura media del mes más cálido es inferior a 22°C y, al menos, cuatro meses con temperaturas medias mayores a 10°C. Este tipo de clima se presenta al inicio del Tramo 1, cerca de la ciudad de Rancagua.
- **Templado frío con lluvias invernales (Csc):** según esta clasificación la temperatura media del mes más cálido es inferior a 22°C, y menos de 4 meses con temperaturas medias menores a 10°C. Este tipo de clima predomina sobre la mayor parte de la carretera, comenzando cerca de la comuna de Machalí y extendiéndose hasta Sewell, abarcando los tramos 2 y 3 y parte de los tramos 1 y 5.

- **Frío de tundra por altura (ETH):** Fríos, tundra y hielo. en ningún mes la temperatura media supera los 10°C. La temperatura media del mes más cálido entre 0 y 10°C. Se presenta en las zonas más altas de la división, cerca del Tramo 4.

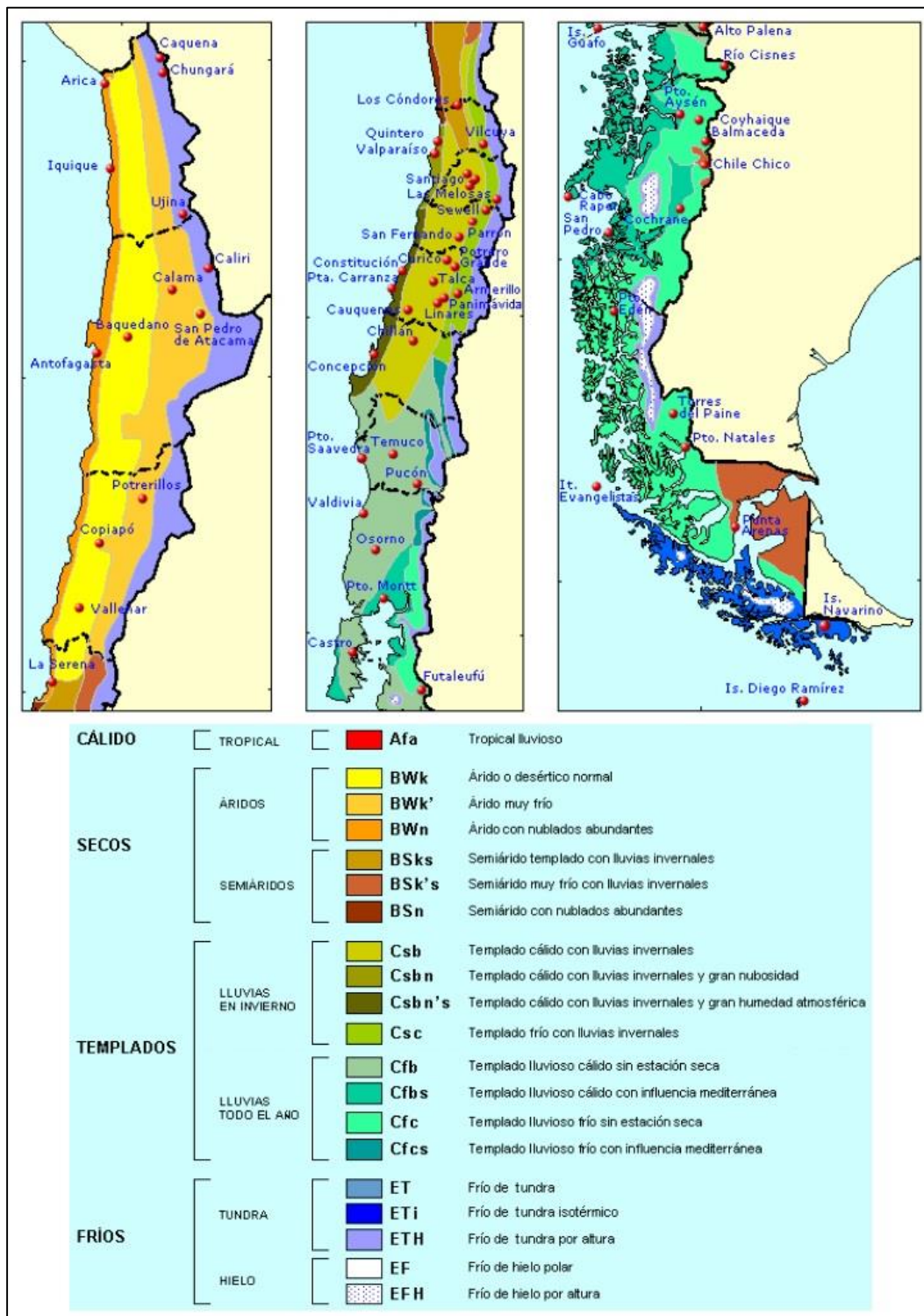


Figura 3-2: Clasificación Climática de Köppen para Chile (Riosco & Tesser, 2006).

3.4. Zona Escogida – Pista de Prueba

A modo de realizar diseños de pavimentos nuevos y recapados de asfalto y de hormigón con losas cortas no adherido sobre el pavimento asfáltico existente, se seleccionó una zona en donde se ubica una de las pistas auxiliares de tránsito lento existentes dentro de la CEC. El tramo escogido se muestra en la Figura 3-3. Abarca desde el km 41 al km 42 de la carretera (Tramo 2), a unos 500 metros desde el inicio de la ruta de acceso hacia la fundición Caletones. La elección de esta zona se realizó considerando la cercanía a estaciones meteorológicas existentes en el área alta de la DET. También se consideró el estado avanzado de deterioro de la pista auxiliar (en adelante pista de prueba), a fin de realizar una futura en parte de la pista.



Figura 3-3: Zona de Estudio y Pista Auxiliar de Tránsito Lento (Pista de Prueba).

La pista auxiliar tiene aproximadamente 350 m de longitud por 4 m de ancho, con una berma asfáltica de 1 m. Su altura con respecto al nivel del mar es cercana a los 1600 m. Según información manejada por la UOC, la pendiente en este sector es cercana a 7%. La velocidad usual de circulación de camiones en esta pista es de aproximadamente 40 km/h.

3.4.1. Condición Estructural Existente – Inspección Visual

La pista de prueba se muestra en la Figura 3-4. Se observa un nivel de deterioro importante considerando que fue construida en el año 2011. El deterioro observado corresponde principalmente a agrietamiento por fatiga (Figuras 3-4B y 3-4C), presentando además asentamientos verticales de la superficie de hasta 3,5 cm (Figura 3-4D). La pista de prueba presenta una franja de aproximadamente 1 m de ancho en el borde interior, que a simple vista corresponde a la antigua berma de la pista principal adyacente (Figura 3-4A). Dicha franja de la pista se encuentra en condiciones visiblemente mejores que en el resto del ancho, lo que permite suponer que tanto el espesor de la berma antigua como de la pista principal son mayores.

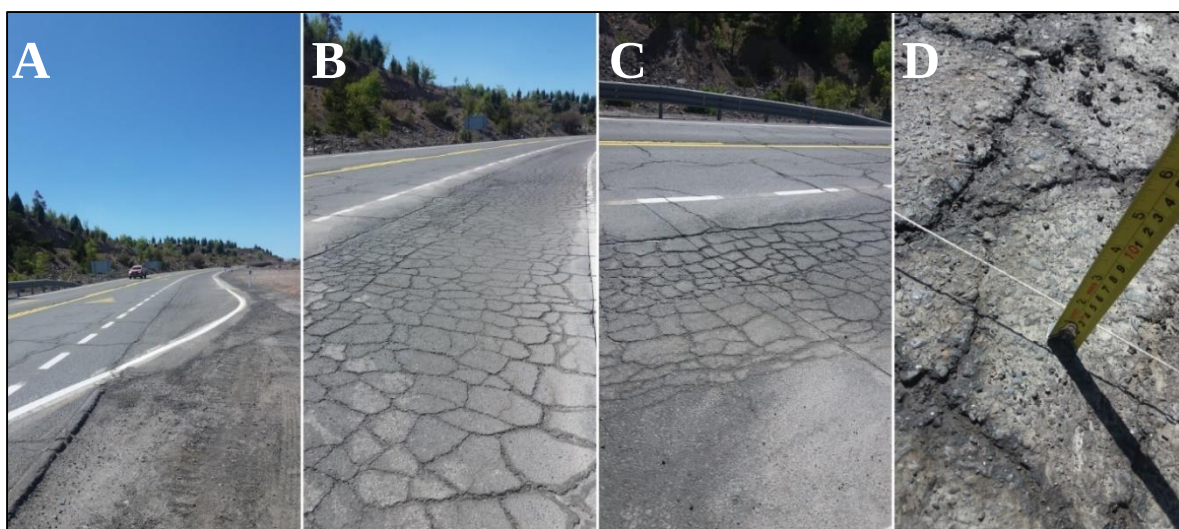


Figura 3-4: Pista de Prueba – Condición Existente.

3.4.2. Capas del Pavimento

- **Pista de Prueba**

La información relativa a las capas estructurales de la pista de prueba se resume en la Tabla 3-1. Las especificaciones de materiales utilizados para bases, subbases y capas de rodadura presentados en esta tabla están en conformidad con las especificaciones contenidas en el Volumen 8 del Manual de Carreteras (MC-V8). Parte de esta información fue proporcionada por la UOC. Para determinar la capacidad de soporte CBR y otras propiedades de la subrasante se solicitaron ensayos de laboratorio, cuyo informe se encuentra en el Anexo D.

Tabla 3-1: Estructura del Pavimento Existente en Pista de Prueba.

Carpeta Asfáltica	
Espesor Asfalto (cm)	7 - 10
Asfalto Utilizado	CA-24
Banda Granulométrica Áridos	IV-A-12
Base Granular	
Espesor Base (cm)	25
Banda Granulométrica Áridos	TM-50b
Subrasante	
CBR (%)	48
Tipo de Suelo según clasificación AASHTO (Ver Anexo D)	A-2-6(0)
Límite Líquido	38
Límite Plástico	21,9
Índice de Plasticidad	16,5

- **Pista Principal Adyacente**

En la Tabla 3-2 se muestra la estructura del pavimento en la pista principal adyacente a la pista de prueba (pista en dirección hacia Sewell), entre los km 41 y 42. Estos valores fueron extraídos de un plan de conservación de la CEC realizado en el año 2011 (APSA, 2011). La determinación del módulo resiliente (Mr) y Número Estructural (NE) efectivo en cada tramo fue realizada mediante retrocálculo con datos de deflectometría medida con deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD).

Tabla 3-2: Evaluación Estructural km 41 a km 42 (APSA, 2011).

Km inicial	Km Final	CBR (%)	Mr (MPa)	NE Efectivo (pulgadas)
41,000	41,333	63	212	7,50
41,333	42,000	42	165	5,71

3.5. Estimación del Nivel de Tránsito

3.5.1. Transito Medio Diario Anual (TMDA)

En la Tabla 3-3 se muestran los valores del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) de vehículos que ingresa al área alta de la División (control de acceso Maitenes) durante el año 2016, valores que fueron extraídos de un estudio proporcionado por la Gerencia de Servicios de la DET, denominado “Sistema de Monitoreo, Control de Flota y Detección de Personas” realizado en el mismo año.

Tabla 3-3: TMDA ingreso DET 2016 Control Maitenes.

Tipo de Vehículo	Vehículos/Día
Camiones	413
Camionetas	617
Buses	371

En el estudio citado anteriormente se cuenta además con el registro de la cantidad promedio de personas transportadas hacia las dependencias principales del área alta de la DET, los cuales se muestran la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Personal Transportado a cada Sector de la DET.

Sector/Campamento	Cantidad de Personas Transportadas	Porcentaje (%)
Caletones	1211	21,1
Colón	3028	52,9
Sewell	1436	25,1
Rajo Sur	53	0,9
TOTAL	5728	100

Por otro lado, se cuenta con información acerca del parque vehicular del año 2017 en la DET (Tabla 3-5), el cual consiste en un registro de la cantidad de vehículos por categoría autorizados para ingresar a la División. Los camiones están identificados en tres categorías: camión estándar, semirremolque y camión menor.

Tabla 3-5: Parque Vehicular de Camiones DET año 2017.

Categoría	Vehículos Autorizados 2017	Porcentaje (%)
Camión Estándar	838	69
Semirremolque	347	28,6
Camión Menor	29	2,4
TOTAL	1214	100

Finalmente, a falta de información actualizada y detallada, se asume que la proporción del TMDA de buses y camiones que ingresa por el control Maitenes (Tabla 3-3) se distribuye de acuerdo a la proporción de personal transportado a cada sector (Tabla 3-4). Por lo tanto, si a estos valores se descuenta el TMDA que circula hacia Caletones (21,1%), se obtiene el TMDA en la zona de estudio. Se asumió una proporción del TMDA de camiones de acuerdo al parque vehicular 2017 (Tabla 3-5). Los valores del TMDA se muestran en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: TMDA en la Zona de Estudio (km 41) – Dirección Sewell.

Categoría	TMDA Tramo de Prueba
Camión Estándar	226
Semirremolque	94
Camión Menor	6
Buses	293
TOTAL	619

3.5.2. Tasa de Crecimiento

Actualmente, dentro de la DET se está llevando a cabo la ejecución de un proyecto estructural de expansión de la mina El Teniente, denominado Nuevo Nivel Mina, el cual asegurará la continuidad operacional de la División. Un estudio realizado en el año 2015 arrojó, mediante simulaciones de tránsito, que en los próximos 4 años el nivel de congestión en horario punta en la carretera afectará la continuidad operacional y la seguridad de los usuarios de la carretera. Sin embargo, actualmente se están tomando las medidas de mitigación necesarias para prevenir que el nivel de congestión suba por sobre un límite de saturación, entre las cuales se encuentra la reducción de la flota de camiones que circulan en horario peak en un 8%, junto con una optimización en la tasa de utilización de buses. Este escenario se observa en la Figura 3-5.

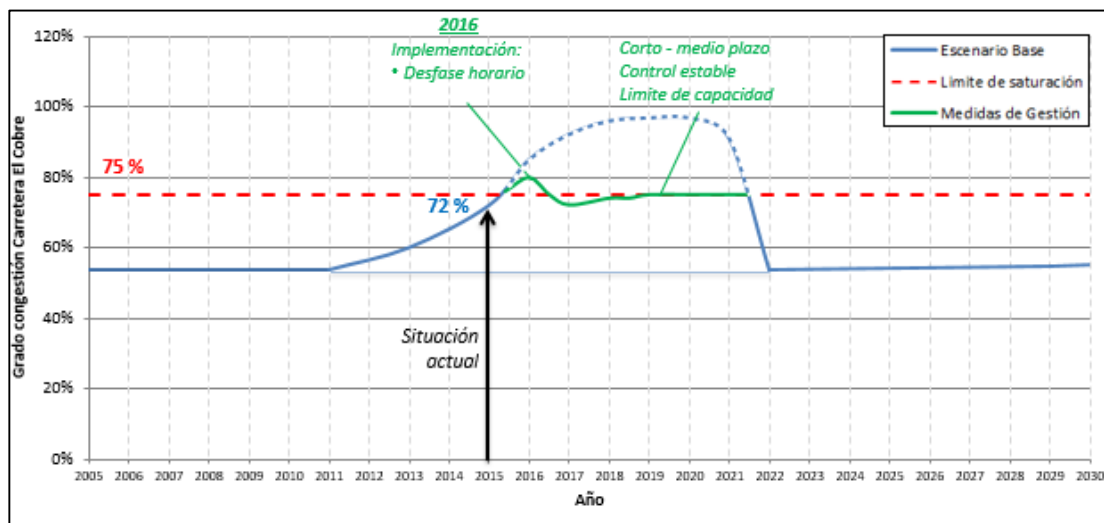


Figura 3-5: Simulación Congestión Vial en la CEC, Periodo 2011 – 2022.

Teniendo en consideración estos antecedentes, y a falta de mayor información acerca de volúmenes de tránsito en años anteriores, se ha adoptado una tasa de crecimiento anual igual a 2% para camiones, mientras que para buses se utilizó una tasa de 1%, a modo de no sobreestimar el nivel de solicitudes de tránsito futuras dentro de la CEC.

3.5.3. Cálculo de Repeticiones de Carga

Para el cálculo de repeticiones de carga se ha utilizado el método de Ejes Equivalentes descrito en la sección 3.603.202 del MC-V3, debido a que no se cuenta con información detallada que permita establecer espectros de carga por tipo eje.

- **Caracterización de Vehículos según Clasificación FHWA**

En primer lugar, se procedió a asignar a cada categoría de tránsito pesado un modelo específico según observaciones en terreno. Estos modelos fueron asociados a las respectivas clases de vehículos que establece la FHWA. Esta información se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Clasificación de Vehículos en la Zona de Estudio, según clasificación FHWA.

Categoría Parque Vehicular	Marca y Modelo	Clase FHWA
Camión Estándar	Ford Cargo 1722	Clase 5
Camión Estándar	Ford Cargo 2429	Clase 6
Semirremolque	Freighliner Cascadia 113 6x4 60k	Clase 10
Camión Menor	Mitsubishi Fuso Canter 7.5 4x2	Clase 5
Bus	Marcopolo Viaggio 1050 G7	Clase 4

- **Cálculo de Ejes Equivalentes (EE)**

Para los tipos de vehículos pesados mostrados en la tabla anterior, se calcularon los pesos por eje, mediante principios de estática, para lo cual se consideraron pesos por eje cercanos al peso admisible de cada eje según especificaciones técnicas de los modelos de vehículos escogidos. Posteriormente se calculó el factor de ejes equivalentes de cada vehículo pesado utilizando los coeficientes por tipo de eje y carga para pavimentos flexibles que se encuentran en la sección 3.603.202 del MC-V8.

Finalmente, en la Tabla 3-8 se resume la cantidad de EE acumulados en la pista de prueba y en la pista principal. Según observaciones en terreno, los buses no hacen uso de las pistas auxiliares, por lo que no se contabilizaron en los diseños de pavimentos nuevos en la pista de prueba. Los pesos por eje, factores de EE y EE acumulados se detallan en el Anexo B.

Tabla 3-8: Ejes Equivalentes Acumulados Pista de Prueba y Pista Principal Adyacente.

Situación de Análisis	EE Acumulados
Pista de Prueba (Sin Buses, 20 años)	15.173.534
Pista Principal (Con Buses, 10 años)	13.294.147
Pista Principal (Con Buses, 20 años)	28.725.443

3.6. Información Meteorológica

Para la determinación de los parámetros climáticos de temperatura y precipitaciones necesarios para el diseño de pavimentos, cuenta con los registros históricos disponibles en el sitio

web de Pronóstico y Monitoreo Meteorológico de la División El Teniente (Meteodata, 2017). Actualmente la DET cuenta con 11 estaciones meteorológicas, de las cuales 10 se encuentran en el área alta de la División.

Se consideraron las estaciones más cercanas: estaciones Barahona, Colón y Embalse El Sapo (ver Figura 3-3). Cada estación cuenta con registros de temperaturas, precipitaciones y otras variables desde el año 2009 a la fecha, a intervalos de 30 minutos.

Los datos climáticos mostrados en esta sección corresponden a los datos extraídos de la estación Barahona, utilizando las otras dos estaciones para el relleno de datos faltantes mediante correlaciones o promedio aritmético simple. El detalle acerca del relleno de datos se muestra en el Anexo B.

3.6.1. Temperaturas Medias Mensuales

El resumen de las Temperaturas Medias Mensuales en la estación Barahona, para el periodo 2009 – 2017, se muestra en la Figura 3-6.

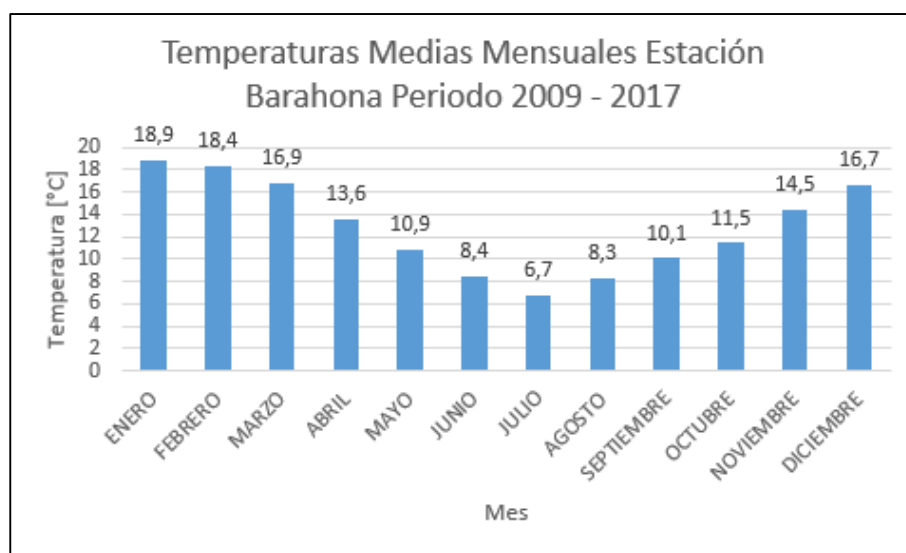


Figura 3-6: Temperaturas Medias Mensuales Estación Barahona.

- **Temperaturas Máximas y Mínimas Históricas**

Las temperaturas máximas registradas en la estación Barahona se presentan durante el mes de enero, registrando una temperatura promedio de 29,1°C.

Con respecto a las temperaturas mínimas, estas se presentan durante el mes de julio, con valores promedio de entre -4 y -5°C, presentando un valor mínimo histórico de -8°C.

- **Porcentaje del Tiempo al Año con Temperaturas Menores a 0°C**

Para determinar este valor se eligió aquel año con el invierno más frío dentro del periodo, vale decir, el cual presenta el promedio de temperaturas más bajo en los seis meses más helados del año.

A partir del análisis de temperaturas se determinó que el año 2011 corresponde al año con el invierno más frío entre 2009 y 2017. Se obtuvo la cantidad de horas al año con temperaturas menores a 0°C en las estaciones Barahona y Colón. Los resultados se muestran en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9: Horas al Año con Temperaturas menores a 0°C, año 2011

Mes	Barahona	Colón
Mayo	0	0
Junio	25	55
Julio	133	180,5
Agosto	95,5	173,5
Septiembre	14	29,5
Junio	2	140
Total	269,5	578,5
% Tiempo al Año	3,1%	6,6%

3.6.2. Registros de Precipitaciones

De los registros disponibles, se obtuvieron los valores de la precipitación promedio anual en la estación Barahona (Tabla 3-10), junto a la cantidad de días al año con precipitación acumulada mayor a 5 mm.

Según acotaciones de personal del área de Pronóstico y Monitoreo Meteorológico de la DET la precipitación acumulada anual mostrada en la Tabla 3-10 está conformada tanto por precipitación pluvial como nival, por lo que los valores reales de precipitación pluvial son más bajos.

Tabla 3-10: Precipitaciones Anuales y Días con precipitación Estación Barahona

Año	Precipitación Anual (mm)	Días al año con Precip. mayor a 5 mm
2009	894,6	28
2010	558,1	25
2011	536,3	27
2012	913,3	30
2014	572,1	33
2015	809,4	26
2016	1111,3	26
Promedio	770,7	28

Según indicaciones del personal de control y monitoreo de las estaciones meteorológicas presentes en el área alta de la DET, los valores medidos de precipitaciones anuales podrían presentar un alto grado de error debido a la eventual presencia de precipitación nival en la zona. Por esta razón, para efectos de diseño de pavimentos, se considerará una precipitación anual acumulada igual al 80% de la precipitación anual promedio obtenida en la tabla anterior.

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE PAVIMENTOS

4.1. Introducción

Se realizaron diseños de pavimento de hormigón y de asfalto dentro de la Zona de Estudio, utilizando la información relativa al tránsito, clima y condiciones de soporte determinadas en el Capítulo 3. El estudio consta de dos etapas: diseño de pavimento en pista de prueba y diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados en la pista principal adyacente a la pista de prueba.

Para el diseño de pavimentos de hormigón de losas cortas en la pista de prueba, se analizaron tres diseños, utilizando tres de las 12 zonas climáticas que ofrece OptiPave2, de mayor similitud a los tipos de clima existentes en la CEC (ver sección 3.3), eligiendo la zona climática para la cual se presentan los mayores índices de deterioro al término de la vida útil. Adicionalmente se estudió el efecto de incorporar fibra en el hormigón.

Para el diseño de pavimentos de asfalto en la pista de prueba, se realizó un diseño de pavimento utilizando el método descrito en el MC-V3 de 2017, basado principalmente en el método AASHTO de 1993. La estructura de pavimento resultante fue analizada con la MEPDG, utilizando ligantes asfálticos especificados según viscosidad y especificados según grado de desempeño. Estos últimos fueron seleccionados de acuerdo a las características climáticas y de tránsito presentes en la zona de estudio.

Finalmente, considerando algunos parámetros de diseño de pavimentos en la pista de prueba, se realizaron diseños de pavimentos nuevos y rehabilitados en la pista principal adyacente, considerando la condición del pavimento en el km 41 de la CEC. Para el diseño de pavimentos asfálticos, se consideraron recapados asfaltos de espesores de 10, 15 y 18 cm sobre el pavimento asfáltico existente, y una reconstrucción completa de la pista. Para pavimentos de hormigón, se consideró un recapado no adherido de losas cortas de hormigón con fibra sobre el asfalto existente, y dos reconstrucciones de la pista: una reconstrucción con losas cortas de hormigón con fibra, y un pavimento de hormigón tradicional (sin fibra), con losas de 3,5 m de largo y barras de traspaso de carga en las juntas transversales, diseñado según el método descrito en el Manual de Carreteras de 2017 (AASHTO 98). La alternativa de hormigón tradicional inicialmente iba a ser diseñada con la MEPDG calibrada para Chile, que es la herramienta más actualizada para el diseño de pavimentos de hormigón en el país, cuyos diseños de pavimento son optimizados en comparación a los diseños sobredimensionados del método AASHTO 98. Sin embargo, el uso de la MEPDG para diseños de pavimentos rígidos no fue posible debido a problemas técnicos.

En este capítulo se muestran los espesores requeridos de pavimento para para cada diseño, junto con un resumen acerca de los valores de los datos de entrada utilizados en los softwares MEPDG y OptiPave2, para diseños en asfalto y hormigón con losas cortas respectivamente.

4.2. Parámetros de Diseño Generales

4.2.1. Vida de Diseño

Para el diseño de pavimentos nuevos de hormigón y asfalto, y recapados de hormigón, se ha seleccionado una vida de diseño de 20 años. Para recapados de asfalto en la pista principal se ha seleccionado una vida de diseño de 10 años.

4.2.2. Subrasante

Para los diseños de pavimentos nuevos se ha considerado una subrasante de módulo resiliente igual a 186 MPa, asociado a una capacidad de soporte CBR igual a 48% (ec. 2.16), determinada mediante estudio de mecánica de suelos en la pista de prueba (Ver Anexo D).

Para diseños de capas asfálticas y hormigón sobre el asfalto existente de la pista principal, se ha adoptado un valor del módulo resiliente de 165 MPa, según un estudio realizado en la DET relativo a un plan de conservación de pavimentos en la CEC (APSA, 2011).

4.2.3. Tránsito

La cantidad de Ejes Equivalentes utilizada para los diseños de pavimentos nuevos y rehabilitados mostrados en este capítulo corresponden a las señaladas en la Tabla 3-8 como sigue:

- Diseño de Pavimentos Nuevos (en pista de prueba) = 15.173.434
- Rehabilitación de Hormigón (Capa sobre Asfalto Existente) = 28.725.443

La tasa de crecimiento utilizada es igual a 2% para camiones y 1% para buses, según lo indicado en la sección 3.5.2 del Capítulo 3.

Debido a que la MEPDG trabaja con espectros de carga y no con ejes equivalentes, se ajustó el TMDA en los diseños, de tal manera que las repeticiones de carga acumuladas durante la vida útil coincidieran aproximadamente con los ejes equivalentes respectivos de cada tipo de diseño.

4.2.4. Tipo de Tráfico

Para ambos softwares se utilizó la distribución de tráfico de la FHWA TTC 7 en los diseños de la pista de prueba, mientras que para diseños en la pista principal se utilizó el tipo de tráfico FHWA TTC 17. Los tipos de tráfico y clasificación de vehículos de la FHWA se encuentran en el Anexo C.

4.2.5. Umbrales de Deterioro y Confiabilidad

Los valores máximos admisibles adoptados para cada tipo de deterioro en utilizados en los programas OptiPave2 y MEPDG, para pavimentos rígidos y flexibles, se resumen en la Tabla 4-1. La elección de estos valores se realizó considerando los criterios adoptados en el último plan de conservación de pavimentos realizado en la CEC (APSA, 2011).

Tabla 4-1: Umbrales de Deterioro Máximos Admisibles para Pavimentos Flexibles y Rígidos.

Pavimentos Flexibles (MEPDG)		Pavimentos Rígidos (OptiPave2 y AA98)	
IRI Final (m/km)	3,5	Losas Agrietadas (%)	15
Agrietamiento Térmico (m/km)	133	Escalonamiento Promedio (mm)	5
Agrietamiento por Fatiga (abajo hacia arriba, %)	35	IRI Final (m/km)	3,5
Agrietamiento por Fatiga (de arriba hacia abajo, m/km)	380		
Ahuellamiento Total (mm)	16		
Ahuellamiento sólo Carpeta Asfáltica (mm)	16		

4.3. Parámetros de Diseño de la MEPDG

En esta sección se describen los parámetros específicos del software MEPDG no incluidos en la Sección 4.2. Estos parámetros se dividen en dos categorías: parámetros generales y parámetros específicos. Para los parámetros generales se adoptaron los valores por defecto del software. Los parámetros específicos dependen de la zona de estudio y de las características del diseño.

4.3.1. Parámetros Generales de Tránsito

- Configuración de Ejes de Camiones**

En la Tabla 4-2 se resumen los valores por defecto relativos a las características de los distintos tipos de ejes y distancias al borde de la pista.

Tabla 4-2: Parámetros de la MEPDG por Defecto – Configuración de Ejes.

Configuración de Ejes	
Ancho promedio de Ejes (m)	2,6
Espaciamiento de Ejes Dobles (m)	1,31
Espaciamiento entre Ruedas Dobles (mm)	305
Espaciamiento entre Ejes Triples (m)	1,25
Espaciamiento entre Ejes Cuádruples (m)	1,25
Presión de Inflado de Neumáticos (kPa)	827,4
Distribución Lateral del Tránsito	
Distancia de rueda externa al borde del pavimento (mm)	430
Desviación Estándar ubicación media de la rueda* (mm)	190
Distancia entre Ejes	
Espaciamiento promedio para ejes lejanos (m)	5,49
Espaciamiento promedio para ejes intermedios (m)	4,57
Espaciamiento promedio para ejes cercanos (m)	3,66
Porcentaje de Camiones con ejes lejanos (%)	61
Porcentaje de Camiones con Ejes Intermedios (%)	22

Porcentaje de Camiones con Ejes Cercanos (%)	17
--	----

- **Ajuste Mensual de Tráfico**

La MEPDG permite realizar un ajuste mensual por clase de vehículo (clasificación de tipos de vehículos de la FHWA). Para todos los diseños se utilizó la configuración por defecto al realizar un diseño nuevo, empleando un factor igual a 1 para todos los meses, en todas las clases de vehículos.

- **Promedio de Ejes por Camión**

La MEPDG permite adoptar valores promedio de la cantidad de ejes asociados a las distintas clases de vehículos pesados. Los valores por defecto adoptados se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Parámetros MEPDG por Defecto – N° de Ejes Promedio por Tipo de Vehículo.

Clase FHWA	Ejes Simples	Ejes Dobles	Ejes Triples	Ejes Cuádruples
Clase 4	1,62	0,39	0	0
Clase 5	2	0	0	0
Clase 6	1,02	0,99	0	0
Clase 7	1	0,26	0,83	0
Clase 8	2,38	0,67	0	0
Clase 9	1,13	1,93	0	0
Clase 10	1,19	1,09	0,89	0
Clase 11	4,29	0,26	0,06	0
Clase 12	3,52	1,14	0,06	0
Clase 13	2,15	2,13	0,35	0

4.3.2. Parámetros Generales de la Mezcla Asfáltica

Se adoptaron valores por defecto para algunos parámetros específicos de diseño de mezclas asfálticas, los cuales se resumen en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Parámetros MEPDG por Defecto – Propiedades Mezclas Asfálticas.

Parámetro	Valor
Módulo de Poisson	0,35
Creep Compliance (1/GPa)	Parámetro de Entrada Nivel 3
Temperatura de Referencia (°C)	21,1
Resistencia a la Tracción Indirecta a -10°C (MPa)	3,18
Capacidad Calorífica (Joule/Kg-Kelvin)	963
Conductividad Térmica (Watt/m-Kelvin)	1,16
Contracción Térmica	$1.991 \cdot 10^{-5}$

4.3.3. Caracterización del Clima

La MEPDG actualmente no cuenta con información climática de estaciones meteorológicas presentes en el área alta de la DET. Por esta razón, se utilizó una herramienta que ofrece el software, la cual consiste en generar una estación meteorológica virtual a partir de la ubicación geográfica y altitud del proyecto, y de información climática de dos o más estaciones meteorológicas existentes. Se utilizó una de las estaciones de Santiago (Pudahuel) junto con la estación Curicó (General Freire). Las temperaturas promedio mensual horario de la estación virtual generada se muestran en la Figura 4-1. Se observa que las temperaturas mensuales generadas siguen un patrón muy similar a las temperaturas de la estación Barahona, con diferencias de temperatura de alrededor de 2°C en los meses más cálidos y de 4°C en los meses más fríos. La temperatura anual promedio de la estación Barahona es de 12,9 °C, mientras que en la estación virtual la temperatura anual promedio es de 10,2°C. A falta de información climática más representativa, se utilizó los valores de temperatura de la estación virtual, a pesar de que los resultados no serán totalmente representativos, debido a la susceptibilidad térmica de los materiales asfálticos.

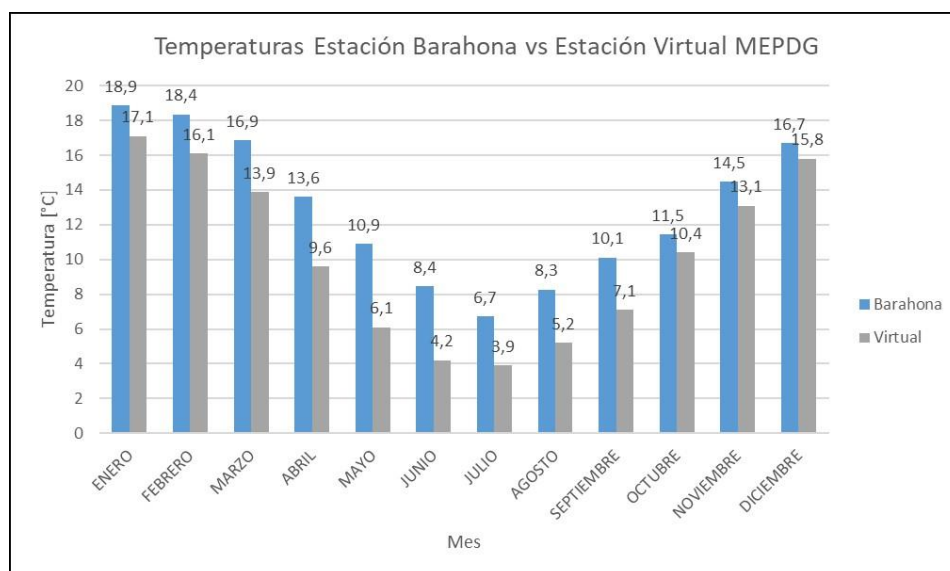


Figura 4-1: Temperaturas Estación Barahona y Estación Virtual de la MEPDG.

4.3.4. Caracterización de Capas Granulares

Para las capas de base y subbase de pavimentos nuevos y rehabilitados, se consideraron respectivamente valores medios de las bandas granulométricas TM-50b y TM-50a de la Tabla 8.101.1B mostrada en el MC-V8. En cuanto a los límites de consistencia, se adoptaron los valores máximos permitidos para el Límite Líquido (LL) e Índice de plasticidad (IP), según la tabla 8.101.1.A del mismo documento. Los valores de estos datos de entrada se resumen en la Tabla 4-5. Las tablas citadas se presentan en la sección C.2 del Anexo C.

El Módulo Resiliente de cada capa fue calculado considerando el valor CBR mínimo exigido de cada una para el diseño de pavimentos asfálticos según lo establecido en el MC-V3.

Tabla 4-5: Parámetros MEPDG – Caracterización de Bases y Subbases.

Límites de Consistencia		
LL Subbase	35	
IP Subbase	8	
LL Base	25	
IP Base	6	
Módulo Resiliente		
Mr Subbase	114	
Mr Base	200	
Granulometrías		
Tamiz (mm)	% Que Pasa	
	Subbase	Base
50	100	100
40	-	85
25	78	70
20	-	60
10	53	50
5	43	40
2,5	-	-
2	30	30
0,5	18	15
0,08	10	5

4.3.5. Espectro de Carga Utilizado

El espectro de carga utilizado corresponde al espectro registrado en la plaza de pesaje Curacaví, por ser el más cercano a la zona de estudio y por su ubicación, considerando que los camiones de transporte de concentrado de cobre se dirigen hacia el puerto por la Ruta 68.

4.3.6. Mezclas Asfálticas – Granulometría Áridos Pétreos

Las granulometrías consideradas para las mezclas asfálticas utilizadas en este trabajo se resumen en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Parámetros de Diseño MEPDG – Granulometría Mezclas Asfálticas.

Características del Ligantes y Tipo de Capas			
Tipo de Ligante Asfáltico	Tradicional	Tradicional	Superpave
Tipo de Capa	Rodadura	Intermedia	Rodadura e Intermedia
Banda Granulométrica	IV-A-12	III-12a	Asumida
Especificación	5.408 MC V5	5.408 MC V5	-

Granulometrías			
Tipo de Ligante Asfáltico	Tradicional	Tradicional	Superpave
Tamiz (mm)	% que pasa		
20	100	100	100
12,5	94	88	90
10	81	73	80
Tipo de Ligante Asfáltico	Tradicional	Tradicional	Superpave
Tamiz (mm)	% que pasa		
5	46	45	46
2,5	32	28	27
1,18	24	-	18
0,63	18	16	12
0,315	13	11	9
0,16	9	8	7
0,08	6	5	5

La granulometría utilizada para capas intermedias con asfaltos tradicionales mostradas en la Tabla 4-6 corresponde al promedio de los límites superior e inferior de las bandas granulométricas señaladas. La granulometría utilizada para capas de rodadura con asfaltos tradicionales se ajusta a la banda de trabajo IV-A-12, y se obtuvo a partir de un certificado de diseño de mezclas asfálticas con asfalto modificado realizado por la empresa Bitumix en la DET. Dicho certificado se adjunta en el Anexo D.

En el caso de la granulometría para mezclas Superpave, se modificó la granulometría de la banda IV-A-12 de tal manera que cumpliera con los puntos de control de la gráfica de Füller. Las especificaciones de puntos de control para granulometrías de mezclas asfálticas Superpave para tamaño máximo de 20 mm, junto con la representación gráfica de la granulometría asumida en la Tabla 4-6, se muestran en el Anexo C.

4.4. Diseños de Pavimentos de Losas Cortas en Pista de Prueba

4.4.1. Parámetros por Defecto OptiPave2

Durante el diseño de todas las alternativas de pavimentos de hormigón de losas cortas, se utilizaron valores recomendados y/o por defecto para los parámetros que se muestran en la Tabla 4-7. Estos parámetros se describen con mayor detalle en la sección A.1 del Anexo A. Estudiar cada parámetro en detalle queda fuera del alcance de este trabajo.

Tabla 4-7: Parámetros de Diseño Utilizados por Defecto en OptiPave2.

Parámetros de Tráfico	
Distancia de la Huella a la línea de Demarcación (mm)	450
Desv. Estándar de la Distribución Lateral del Tráfico (mm)	250

Parámetros del Hormigón	
Confiabilidad de Diseño de Hormigón (%)	80
Desviación Estándar Diseño de Hormigón (MPa)*	0,4
Aumento de Resistencia de 28 a 90 Días	1,1
Módulo de Elasticidad del Hormigón (MPa)	29.000
Peso Específico del Hormigón (Kg/m ³)	2.400
Módulo de Poisson	0,15
Coeficiente de Dilatación Térmico (10 ⁻⁶ /°C)	10
Retracción del Hormigón a los 365 Días (microstrain)	700
Contenido de Aire (%)	3
Relación Agua/Cemento	0,45
Método de Ensayo de Fibra (para diseños de Ho. con Fibra)	ASTM 1609
Resistencia Residual de la Fibra (MPa)	1
Parámetros del Suelo	
Módulo de Poisson para Bases y Subrasante	0,35
Coeficiente de Fricción Pavimento-Base	0,65
Parámetros del Clima	
Temperatura de Fraguado del Hormigón (°C)	45

4.4.2. Parámetros de Diseño Específicos OptiPave2

Los parámetros específicos de OptiPave2 pista de prueba se resumen en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Pista de Prueba – Parámetros de Diseño Específicos OptiPave2.

Parámetros del Tipo de Pavimento	
Largo de Losas (m)	1,75
Tipo de Borde	Berma Hormigón
Losa Exterior con Sobreancho	Si
Barras de Transferencia	No
IRI Inicial (m/km)	1,8
Parámetros de Diseño de Tráfico	
Método de Análisis de Tráfico	Ejes Equivalentes
Clasificación del Tipo de Tráfico	FHWA TTC 7
Tasa de Crecimiento Anual (%)	2
EE Totales en Pista de Diseño	15.173.534
Parámetros de Diseño del Hormigón	
Tipo de Ensayo de Resistencia	Flexotracción
Edad de Ensayo	28 Días
Resistencia a la Flexotracción (MPa)	5,0
Parámetros de Diseño del Suelo	
Tipo de Suelo de Base	A-2-4
Módulo Resiliente Base (MPa)	182 (CBR 60%)

Espesor de la Base (mm)	150
Tipo de Suelo de Subrasante	A-2-6
Módulo Resiliente Subrasante (MPa)	186 (CBR 48%)
Mat. Fino Bajo Malla #200 (Capa Bajo el Pavimento, %)	5
Propiedades de Diseño del Clima	
Gradiente Equivalente de Construcción (°C)	-15
Temperatura Media de Invierno (°C)	9,3
Temperatura Media de Verano (°C)	16,5
Nº Días al año con Precipitaciones	28
Índice de Congelamiento de la Base (%)	5

4.4.3. Análisis de Zonas Climáticas

Se procedió a realizar tres diseños diferentes, diferenciándose cada uno únicamente en la zona climática utilizada. Los climas utilizados corresponden a las Zonas 7, 8 y 12 de la Tabla A-6 presentada en el Anexo A. Los tipos de climas de estas zonas, según clasificación climática de Köppen, son los siguientes:

- Zona 7: Templado Cálido con Lluvias Invernales (Csb)
- Zona 12: Templado Frío con Lluvias Invernales (Csc)
- Zona 8: Frío de Tundra por Altura (ETH)

El análisis se realizó considerando un espesor de hormigón igual a 16 cm. En las Figuras 4-2, 4-3 y 4-4 se muestra el comportamiento en el tiempo para el porcentaje de losas agrietadas, escalonamiento promedio e IRI, con el nivel de confianza seleccionado. La notación utilizada para presentar los resultados de desempeño es la siguiente:

- Diseño 1: Diseño con zona climática Santiago – Chillan (Zona 7).
- Diseño 2: Diseño con zona climática Coyhaique – Punta Arenas (Zona 12).
- Diseño 3: Diseño utilizando Clima Cordillera – Central (Zona 8).

Los valores para los deterioros de cada diseño al término de la vida de servicio (20 años) se resumen en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Deterioros Diseños OptiPave2 año 20 – Análisis de Climas.

Diseño	Losas Agrietadas (%)	Escalonamiento Promedio (mm)	IRI (m/km)
Diseño 1	4,95	3,13	3,49
Diseño 2	3,96	3,83	3,87
Diseño 3	5,11	3,86	3,89

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el deterioro que manda el diseño, para los tres tipos de clima, corresponde a la regularidad superficial (IRI), mientras que el porcentaje de losas agrietadas y el escalonamiento promedio aún se encontrarán dentro límites aceptables.

Por otro lado, se observa que el mayor porcentaje de losas agrietadas y el mayor valor del IRI final se presentan en el Diseño 3 (clima Cordillera Central).

Finalmente, se observa que el diseño que presentó menos porcentaje de losas agrietadas es el Diseño 2. Esto se debe principalmente a que para el clima de la Zona 12 la mayoría del tiempo se presentan gradientes de temperatura cercanos a 0°C, por lo que el alabeo disminuye, y con esto, el nivel de agrietamiento.

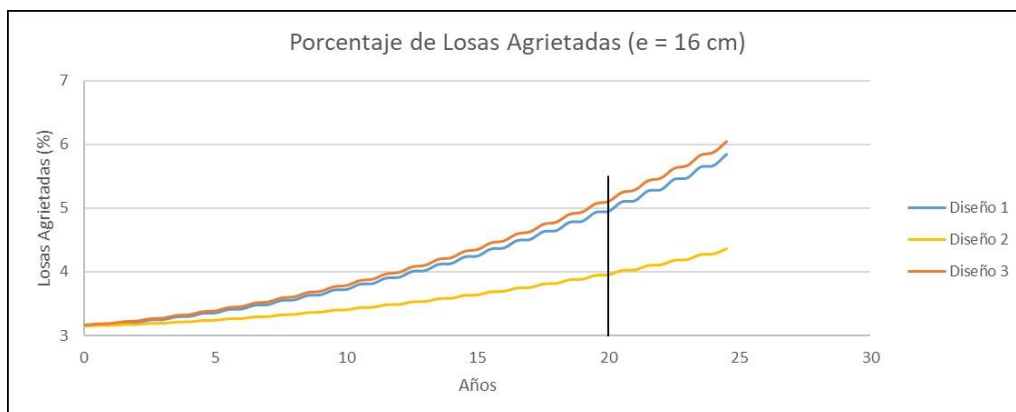


Figura 4-2: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Losas Agrietadas según Clima.

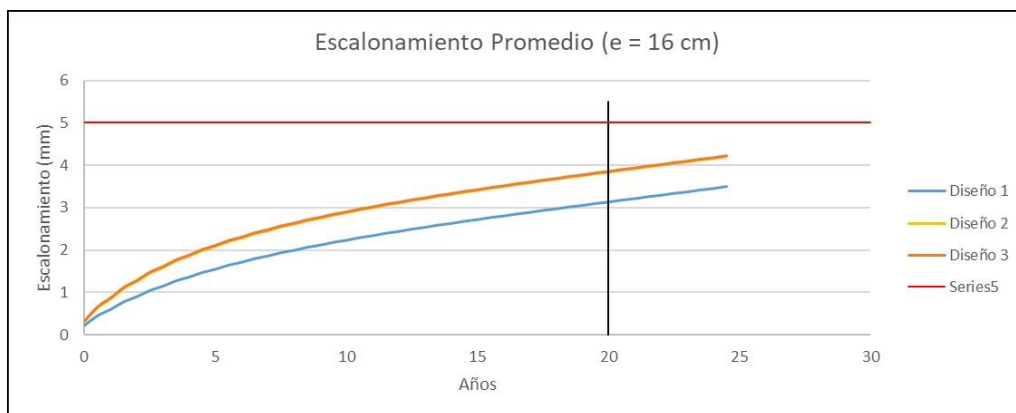


Figura 4-3: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Escalonamiento Prom. según Clima.

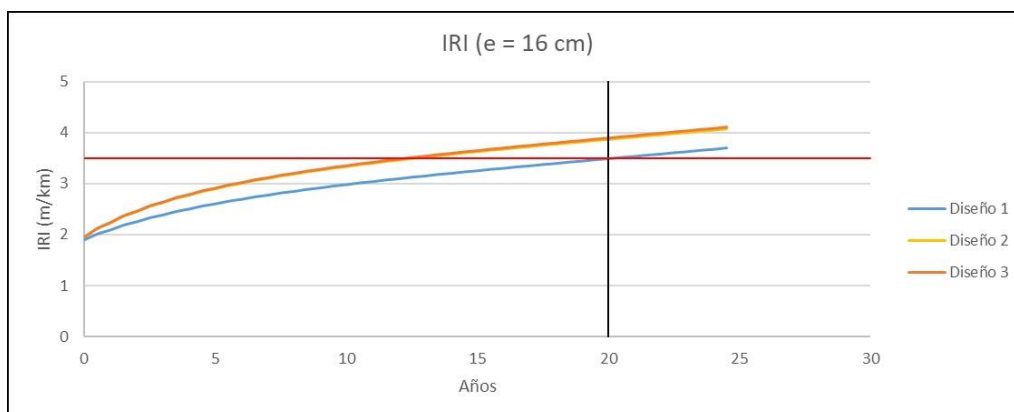


Figura 4-4: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – IRI según Clima.

4.4.4. Análisis para Contenido de Fibra en el Hormigón

Como complemento al análisis anterior, se realizó una comparación entre un diseño de hormigón sin fibra y otro diseño con fibra en el hormigón, a modo de ilustrar cómo influye el contenido de fibra en los modelos de predicción de deterioros de OptiPave2. Para tal efecto se utilizó el Diseño 3 de la sección 4.4.3 (clima Cordillera Central). Para el diseño con fibra, la resistencia residual utilizada es de 1 MPa según la norma ASTM 1609, mismo valor utilizado en el proyecto de repavimentación del Camino La Pólvara (Del Río & Covarrubias V., 2016). En las Figuras 4-5, 4-6 y 4-7 se ilustra el comportamiento en el tiempo para los deterioros medidos por OptiPave2. Los valores para cada deterioro al final de la vida de servicio se resumen en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10: Deterioros Diseños OptiPave2 año 20 – Análisis de Uso de Fibra.

Diseño	Losas Agrietadas (%)	Escalonamiento Promedio (mm)	IRI (m/km)
Diseño 3 Sin Fibra	4,27	3,77	3,97
Diseño 3 Con Fibra	3,32	3,77	3,96

De los resultados obtenidos en este análisis se concluye que el uso de fibra en el diseño de pavimentos de hormigón de losas cortas con OptiPave2 trae beneficios en el comportamiento del pavimento, principalmente en la reducción del porcentaje de losas agrietadas. Los valores del escalonamiento predicho son idénticos para diseños con y sin fibra, lo cual es esperable debido a que el modelo de escalonamiento no incluye el aporte de fibras en el hormigón. Finalmente, si bien los valores de predicción del IRI son muy similares, existe una leve variación que se debe al aporte en la reducción del porcentaje de losas agrietadas incluido en el modelo de predicción del IRI de OptiPave2.

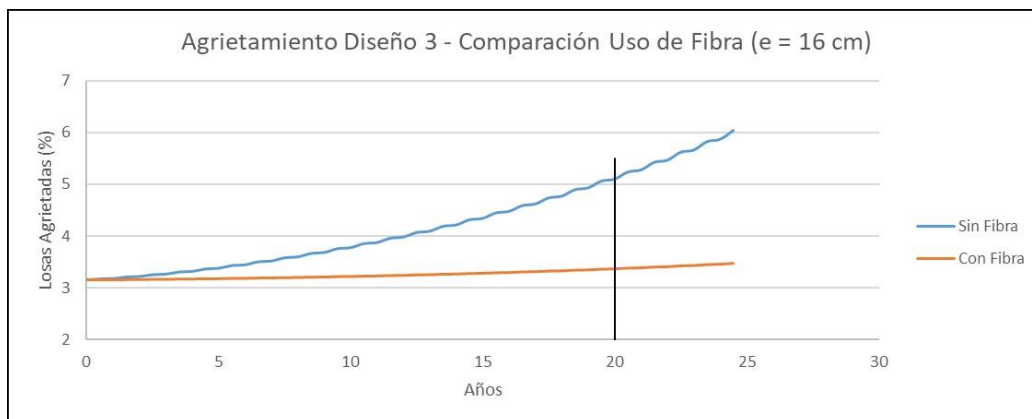


Figura 4-5: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Agrietamiento según Uso de Fibra.

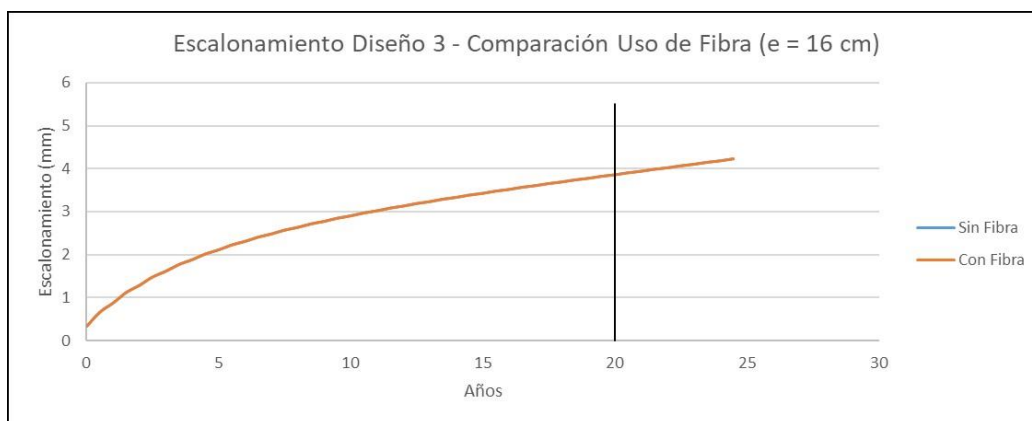


Figura 4-6: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – Escalonamiento según Uso de Fibra.

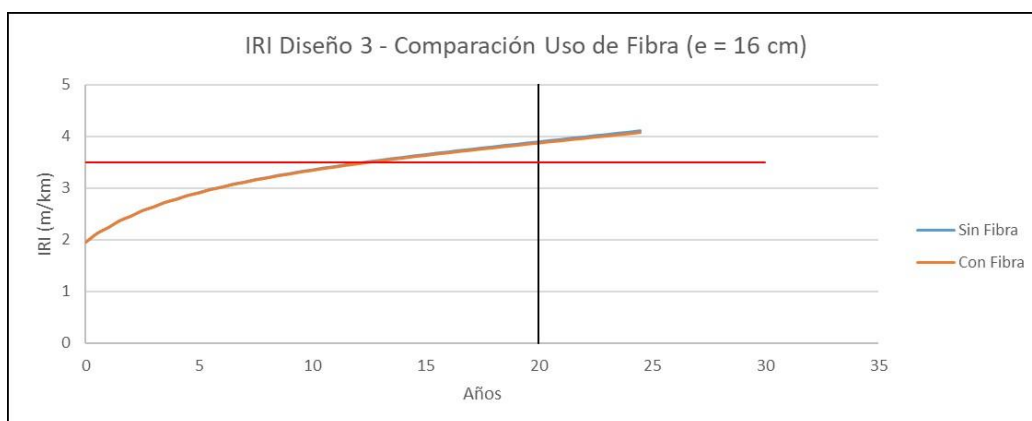


Figura 4-7: Diseños Losas Cortas en Pista de Prueba – IRI según Uso de Fibra.

4.4.5. Resultados de Diseño

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, se optó por realizar un diseño de pavimento de losas cortas de hormigón, utilizando los parámetros de diseño mostrados en las Tablas 4-2 y 4-3. El clima seleccionado corresponde al clima Cordillera Central (Zona 8), con el cual se obtiene el diseño más conservador. Con el objetivo de reducir el nivel de agrietamiento del pavimento, se ha optado por realizar un diseño de hormigón con fibra, con una resistencia residual mínima de la fibra igual a 1 MPa. El espesor requerido de las losas de hormigón es de 18 cm. El esquema del pavimento se muestra en la Figura 4-8.

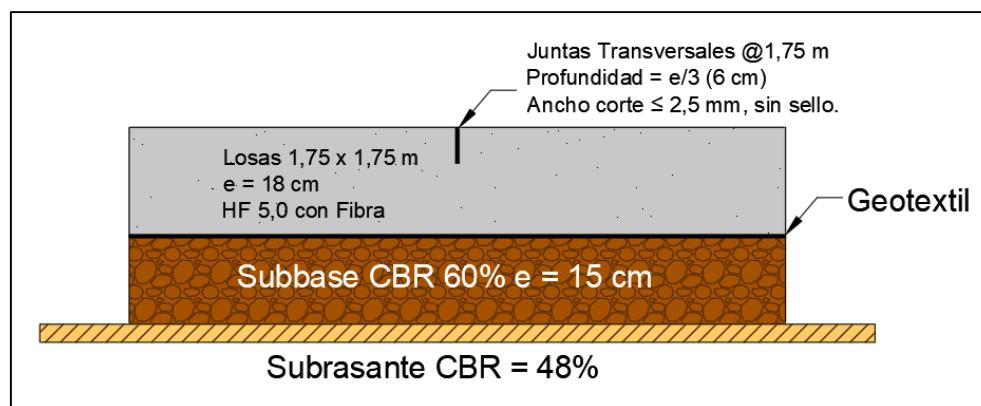


Figura 4-8: Diseño Pavimento de Losas Cortas de Hormigón en Pista de Prueba.

Para este diseño, los indicadores de desempeño al final de la vida de servicio son los siguientes:

- Porcentaje de Losas Agrietadas (%) : 3
- Escalonamiento Promedio (mm) : 2,94
- IRI Final (m/km) : 3,48

En base a estos valores, se concluye que, hacia el final de la vida de servicio del pavimento, este presentará una regularidad superficial cercana al valor máximo permitido, mientras que el porcentaje de losas agrietadas y el escalonamiento promedio permanecerán en niveles aceptables.

4.5. Diseño en Hormigón Método MC 2017 (AASHTO 98) en Pista de Prueba

A modo de comparar el diseño de pavimento de losas cortas con respecto a pavimentos de hormigón tradicionales, se ha realizado un diseño alternativo en hormigón utilizando el método descrito en el MC 2017, basado en el método AASHTO de 1998. Tal como se mencionó al inicio de este capítulo, para realizar esta comparación se debió utilizar la MEPDG calibrada para Chile, con la cual se pueden obtener diseños optimizados y más competitivos con los pavimentos de losas cortas,

herramienta que, además, permite estimar el desempeño del pavimento en el tiempo debido a la naturaleza empírico mecanicista de este método de diseño.

4.5.1. Parámetros de Diseño

El diseño del pavimento consiste en un pavimento de hormigón con juntas simples con losas de 3,5 m de largo, con barras de traspaso de carga espaciadas a 30 cm.

Los parámetros del modelo utilizados se resumen en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11: Diseño Pista de Prueba – Método MC 2017 – AASHTO 98.

Parámetros de Diseño Generales	
Ejes Equivalentes Acumulados	15.173.534
Módulo de Reacción del a Subrasante (k, MPa/m)	107,2
Resistencia a la Flexión del Hormigón, a 28 días (MPa)	5,0
Confiabilidad (%)	75
Desviación Estándar Error Combinado (S_0)	0,35
Índice de Serviciabilidad Inicial	4,5
Índice de Serviciabilidad Final	2
Tipo de Berma	Pista Ensanchada (4,3 m)
Tipo de Base del Pavimento	Granular
Espesor Base (mm)	150
Módulo Resiliente de la Base (MPa)	182
Diámetro Barras de Traspaso (mm)	32
Parámetros del Clima (Estación Barahona)	
Temperatura Media Anual (°C)	12,9
Precipitación Anual (mm)	617
Nº de Días con Precipitación sobre 5 mm	28
Velocidad del Viento Promedio (nudos)	0,97

4.5.2. Resultados de Diseño

El espesor requerido del pavimento, según el método de diseño de pavimentos de hormigón descrito en el Volumen 3 del MC de 2017, es igual a 19 cm, para losas de 3,5 m de largo y sistema de barras de traspaso de carga en las juntas. El diseño obtenido sólo será comparado en términos de costos iniciales, ya que el método de diseño no permite evaluar la evolución de los deterioros en el tiempo. El esquema del pavimento se muestra en la Figura 4-9.

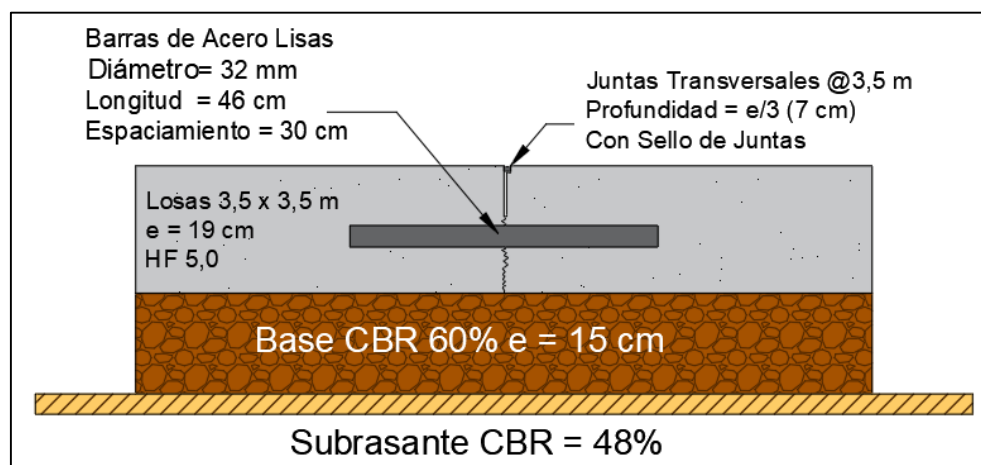


Figura 4-9: Diseño Hormigón Pista de Prueba MC 2017 – Espesor Capas.

4.6. Diseño en Asfalto Método MC 2017 en Pista de Prueba

4.6.1. Parámetros de Diseño

En la Tabla 4-12 se muestra un resumen de los valores utilizados para los parámetros que involucra este método de diseño. Los criterios de selección para cada uno de estos valores se exponen en forma resumida en la sección A.2 del Anexo A.

Tabla 4-12: Parámetros de Diseño Asfalto Pista de Prueba – Método MC 2017.

Parámetros Ecuación de Diseño AASHTO 93	
Ejes Equivalentes Acumulados	15.173.534
Módulo Resiliente de la Subrasante (MPa)	186
Confiabilidad (%)	75
Desviación Estándar Error Combinado (S_0)	0,49
Índice de Serviciabilidad Inicial	4,2
Índice de Serviciabilidad Final	2
Número Estructural, Coeficientes Estructurales y de Drenaje	
Numero Estructural Total Requerido (NEt, mm)	80,1
Número Estructural Mínimo Capas Asfálticas (NEa, mm)	47,5
Coeficientes de Drenaje (base y subbase)	1,15
Coeficiente Estructural Subbase	0,12
Coeficiente Estructural Base	0,13
Coeficiente Estructural Capa Binder	0,41
Coeficiente Estructural Capa Rodadura	0,43

4.6.2. Resultados de Diseño

Los espesores resultantes del pavimento que satisfacen el nivel de tránsito y número estructural requerido, se muestran en el esquema de la Figura 4-10.

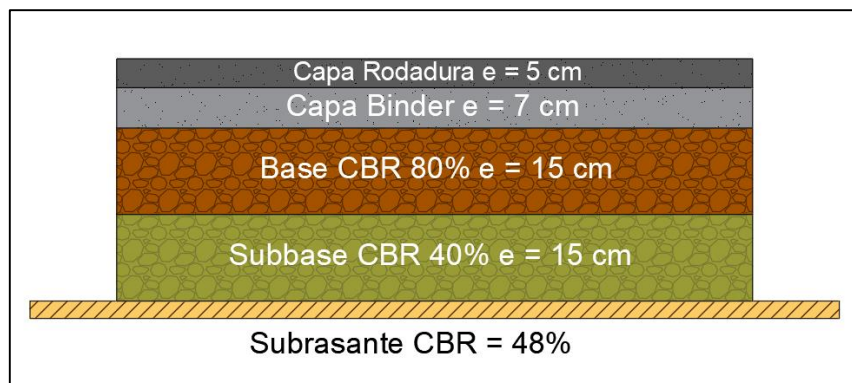


Figura 4-10: Diseño Asfalto Método MC 2017 Pista de Prueba – Espesor Capas.

4.7. Diseño de Asfalto MC 2017 – Análisis con la MEPDG

La estructura de pavimento asfáltico obtenida en la sección 4.6 fue analizada con la MEPDG, a modo de evaluar el comportamiento real de la estructura en el tiempo ante deterioros como agrietamiento o deformaciones permanentes, lo cual no puede realizarse con el método descrito en el MC-V3 de 2017 dada su naturaleza empírica.

4.7.1. Velocidad de Circulación

Para el análisis se consideró una velocidad de circulación de vehículos igual a 40 km/h, que corresponde al promedio de circulación de camiones por la pista de prueba debido a la pendiente existente en el sector, cercana a 7%.

4.7.2. Ligantes Asfálticos Considerados – Parámetros Volumétricos de Mezcla

El análisis con la MEPDG se realizó considerando tres de los tipos de ligantes asfálticos disponibles que ofrece el programa:

- Ligante asfáltico especificado por Penetración Pen. 60-70.
- Ligante asfáltico especificado por viscosidad AC-30.
- Ligante asfáltico especificado por Desempeño PG 58-28.

Se ha elegido un ligante especificado por penetración (Pen 60-70) debido a que se cuenta con información concreta acerca de un diseño Marshall de mezclas asfálticas para la DET, el cual utiliza un alto modificado especificado con un grado de penetración de 60-80. Dicha información está contenida en un certificado emitido por la empresa Bitumix y se expone en el Anexo D.

El ligante asfáltico AC-30 fue escogido para observar el comportamiento de los ligantes especificados por viscosidad en Chile, con una viscosidad mínima de 2400 poises (CA-24).

Finalmente, se escogió un ligante asfáltico especificado con un grado de desempeño PG 58-28 con un 98% de confiabilidad según lo indicado en la Zonificación Superpave para Chile. El grado PG se asocia a condiciones estándar definidas por Superpave, de velocidades de circulación alta y condiciones de tránsito moderadas (Delgadillo et al, 2016).

Los parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas y las densidades consideradas se resumen en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13: Parámetros MEPDG – Características Volumétricas Mezclas Asfálticas.

Capa Intermedia			
Parámetros	Ligante Asfáltico		
	Pen. 60-70	AC-30	PG 58-28
Vacíos de Aire (%)	5,9	5,9	4,0
Asfalto Efectivo (%)	9,5	9,5	11,8
Densidad (kg/m ³)	2387	2387	2400
Capa Rodadura			
Parámetros	Ligante Asfáltico		
	Pen. 60-70	AC-30	PG 64-28
Vacíos de Aire (%)	4,3	4,3	4,0
Asfalto Efectivo (%)	10,8	10,8	11,8
Densidad (kg/m ³)	2408	2408	2400

Los valores de vacíos de aire, y asfalto efectivo mostrados en la tabla anterior fueron obtenidos a partir de un análisis volumétrico de mezclas, considerando la densidad efectiva de los agregados del diseño de mezcla Marshall realizado por la empresa Bitumix, igual a 2727 kg/m³ (ver Anexo D).

Para el cálculo de los vacíos de aire y asfalto efectivo de las mezclas tradicionales de la capa de rodadura, se utilizaron los valores del porcentaje de asfalto (referido al peso de los agregados), porcentaje de absorción, densidad del asfalto y densidades de la mezcla compactada señaladas en el diseño Marshall realizado por Bitumix. El porcentaje de asfalto relativo al peso de los agregados es igual a 5% para capas de rodadura. Para capas intermedias se adoptó un valor de 4,5%, asumiendo que se cumple la estabilidad Marshall mínima requerida para las capas intermedias según lo señalado en el manual de carreteras (8000 N).

En el caso de mezclas con asfaltos PG, a falta de información concreta, se diseñó la mezcla considerando un valor por defecto de la densidad de la mezcla igual a 2400 kg/m³. El porcentaje de asfalto efectivo fue determinado de manera de obtener un porcentaje de vacíos de la mezcla igual a 4%. Se observa que para la capa de rodadura se ha incrementado en un grado la alta temperatura (6°C), debido a la condición de tránsito lento presente en la pista de prueba.

4.7.3. Resultados de Desempeño

Una vez determinadas todas las variables, se procedió a ejecutar el software con el diseño para los tres tipos de ligante asfáltico mencionados en la sección 4.6.2. En la Tabla 4-14 se muestra un resumen de los indicadores de desempeño obtenidos al final de la vida útil para las mezclas asfálticas según el ligante asfáltico utilizado.

Tabla 4-14: Diseño MC 2017 - Resultados de Desempeño de la MEPDG.

Deterioro	Umbral	Pen 60-70	AC-30	PG 64-28
IRI Final (m/km)	3,5	2,73	2,74	2,78
Ahuellamiento Total (mm)	16	18,55	18,91	23,40
Agr. Fatiga abajo hacia arriba (%)	35	20,43	20,53	11,33
Agr. Térmico (m/km)	133	2,80	2,80	2,80
Agr. Fatiga arriba hacia abajo (m/km)	380	878,54	880,49	686,64
Ahuellamiento C. Rodadura. (mm)	16	12,44	12,77	16,96

Los resultados mostrados en la Tabla 4-14 indican que, independiente del ligante asfáltico utilizado, el espesor del pavimento es insuficiente para las condiciones de tránsito y clima de la zona, ya que el nivel de ahuellamiento y agrietamiento por fatiga (de arriba hacia abajo) superan los umbrales máximos admisibles.

Por otro lado, se observa que los ligantes especificados por viscosidad y penetración tienen un comportamiento similar, presentando este último un desempeño levemente mejor.

En cuanto al diseño con asfalto especificado por desempeño (PG), a partir de los deterioros observados se deduce que la mezcla presenta un comportamiento más dúctil, con mayor nivel de ahuellamiento y menor agrietamiento por fatiga con respecto a los diseños de asfalto con asfaltos tradicionales. La reducción del agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba es de aproximadamente un 50%, mientras que el agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo se reduce cerca de un 22%. Esta reducción en el nivel de agrietamiento implica un aumento en la profundidad de ahuellamiento de alrededor de 5 mm.

Cabe señalar que para diseños con mezclas tradicionales se realizaron con valores reales dentro de la DET, mientras que, para el diseño de la mezcla asfáltica especificada por desempeño, se utilizó el valor de densidad por defecto, el cual no representa necesariamente el nivel de compactación requerido de acuerdo al nivel de tránsito.

En las Figuras 4-11 y 4-12 se muestran las curvas de predicción del ahuellamiento total (total Rut Depth) y agrietamiento por fatiga (AC top-down cracking) para los diseños con ligantes Pen 60-70 y PG 64-28. Para el ahuellamiento total, se observa que alcanza su valor máximo al año 13 en la mezcla Pen 60-70, mientras que en la mezcla con asfalto PG 64-28, alcanza su valor máximo aproximadamente al comienzo del año 7. En cuanto al agrietamiento, se observa que alcanza su valor máximo cerca del año 9 en diseño con asfalto PG 64-28, mientras que en la mezcla tradicional con asfalto Pen 60-70, el agrietamiento máximo permitido se alcanza durante el año 6.

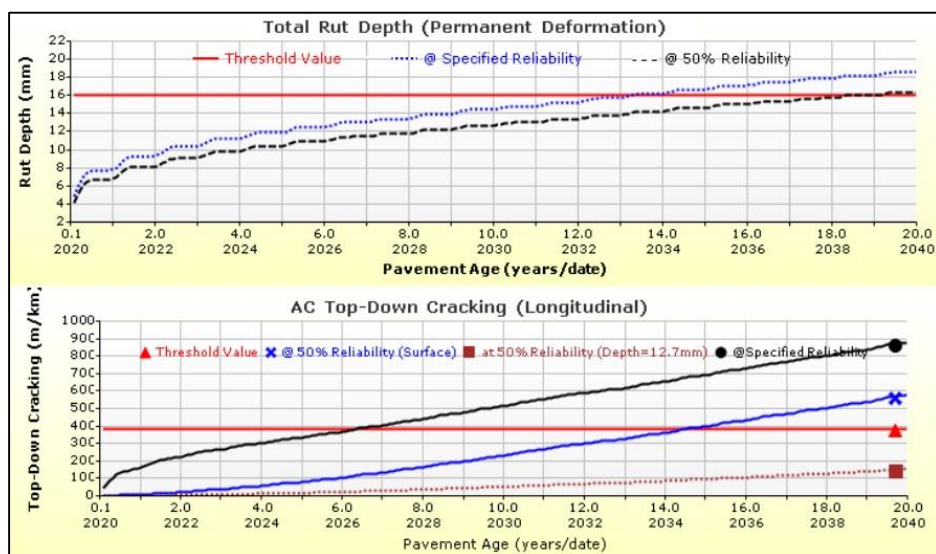


Figura 4-11: Diseño MC 2017 con Asfalto Pen 60-70 – Ahuellamiento y Grietas por Fatiga.

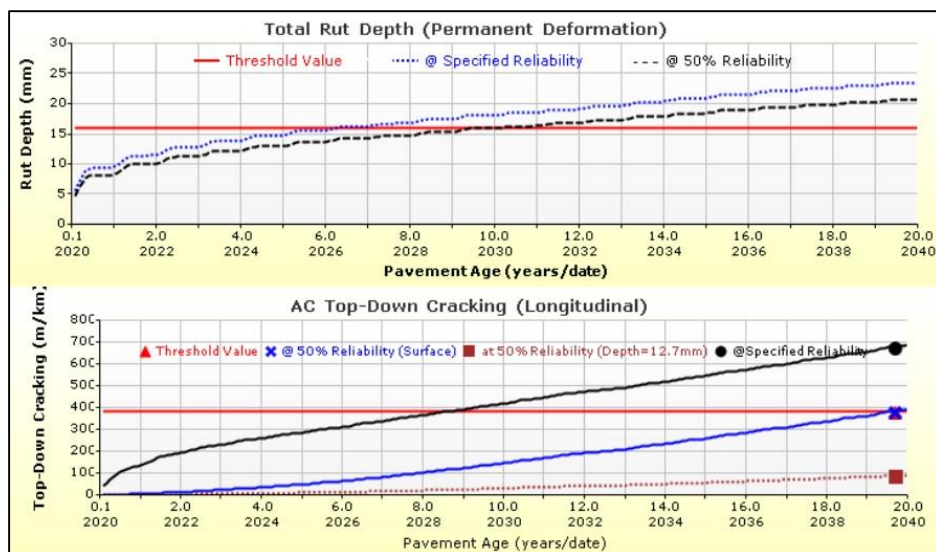


Figura 4-12: Diseño MC 2017 con Asfalto PG 64-28 – Ahuellamiento y Grietas por Fatiga.

4.8. Diseño de Pavimento de Asfalto en Pista de Prueba Mediante la MEPDG

4.8.1. Parámetros de diseño

Teniendo en consideración los resultados obtenidos en la sección 4.6, se realizó un diseño de pavimento utilizando mezclas asfálticas con asfaltos especificados por desempeño. Para la capa asfáltica intermedia se utilizó asfalto de grado PG 58-28 con un 98% de confiabilidad según la Zonificación Superpave para Chile. Para la capa de rodadura se incrementó en un grado la alta

temperatura del ligante debido a la condición de tránsito lento en la pista, con lo que resulta un ligante asfáltico PG 64-28.

Los parámetros de diseño de tránsito, clima y capas granulares utilizados en el diseño corresponden a los señalados en las secciones 4.2 y 4.3 de este capítulo.

4.8.2. Resultados de Diseño

Se ejecutó el programa hasta obtener un diseño en el cual todos los indicadores de desempeño se mantengan en niveles admisibles al final de la vida de servicio. El espesor de las capas asfálticas requerido, para las características climáticas y caracterización de las capas subyacentes adoptada, se muestra en el esquema de la Figura 4-13.

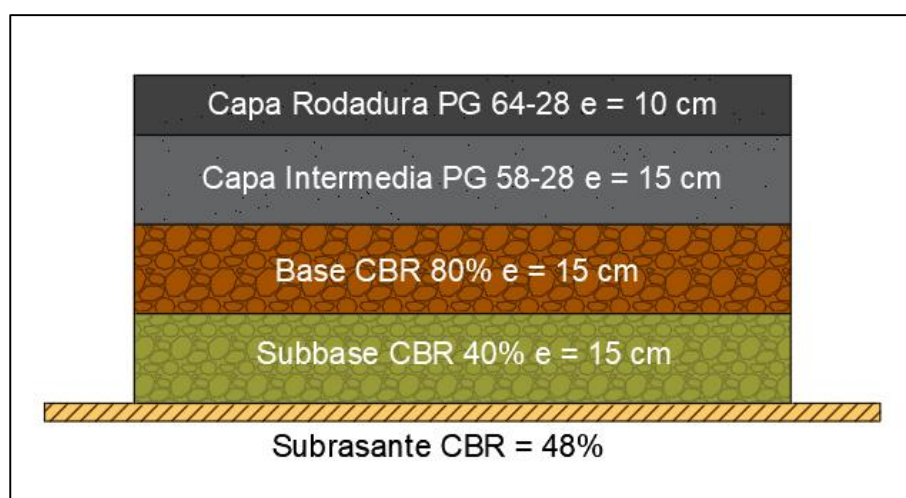


Figura 4-13: Diseño Asfalto MEPDG en Pista de Prueba – Espesor Capas.

4.9. Diseño de Rehabilitaciones de Asfalto en Pista Principal

Para analizar los costos de trabajos de rehabilitación en la pista principal, se consideró la reparación de distintos espesores de asfalto en la pista principal. Adicionalmente, para realizar un análisis más completo, se consideró la reconstrucción completa del carril. Las alternativas consideradas se detallan en las siguientes páginas.

4.9.1. Estructura Existente – Parámetros de Entrada MEPDG

En la Figura 4-14 se muestra un esquema acerca de la condición actual del pavimento. Se observa que el espesor de asfalto es de 31 cm, que corresponden a la zona con el espesor de asfalto más bajo entre los km 41 y 42. En esta zona el módulo resiliente de la subrasante es de 165 MPa (APSA, 2011).

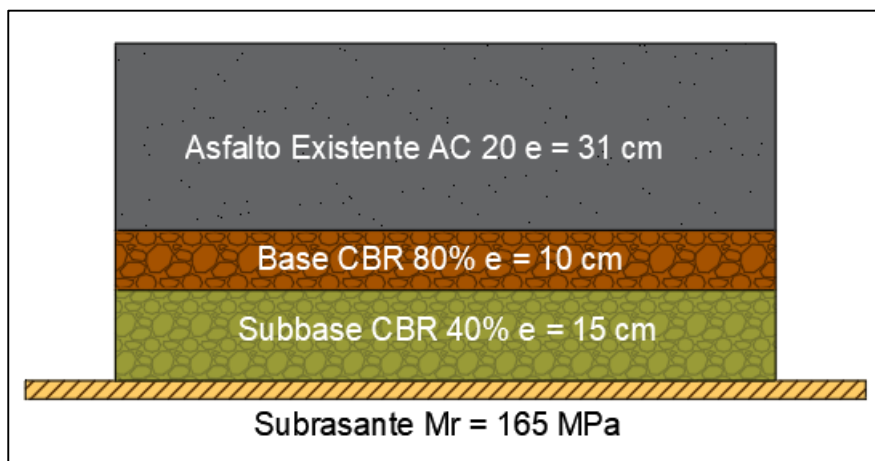


Figura 4-14: Estructura de Asfalto Existente en Pista Principal (km 41).

4.9.1.1. Caracterización de las Capas del Pavimento Existente

Salvo el espesor de la capa asfáltica existente y de las capas granulares de base y subbase, no se cuenta con ningún otro antecedente. Por esta razón, a modo de modelar esta estructura en la MEPDG para el diseño de rehabilitaciones, las capas granulares se caracterizaron de acuerdo a lo señalado en la sección 4.3.4. Para la capa asfáltica se asumió un asfalto tradicional especificado por viscosidad de grado AC 20. Para la estimación del módulo dinámico, se asumió la granulometría de la mezcla que cumple con la banda IV-A-12 de acuerdo a lo señalado en la sección 4.3.6 (Tabla 4-6).

4.9.1.2. Parámetros de Rehabilitación Utilizados

Para la caracterización del pavimento existente en la MEPDG, se ingresó con datos de entrada de Nivel 2, ingresando los siguientes niveles de deterioros según estimaciones realizadas mediante observación en terreno:

- Agrietamiento por Fatiga (%) : 30
- Agrietamiento Transversal (m/km) : 15
- Ahuellamiento de la capa Asfáltica (mm) : 3

4.9.1.3. Distribución del Tránsito Utilizada

A diferencia del diseño de pavimentos nuevos, para el diseño de rehabilitaciones se consideró la clasificación de tráfico de la FHWA TTC 17, la cual contiene un alto porcentaje de circulación de buses (vehículos clase 4).

4.9.2. Alternativas de Mantenimiento Propuestas

Para una evaluación económica posterior, se propusieron cuatro alternativas de mantenimiento en la pista principal:

- Alternativa 1 : Recapado Asfáltico de 10 cm de espesor (3,5 m de ancho).
- Alternativa 2 : Recapado Asfáltico de 15 cm de espesor (3,5 m de ancho).
- Alternativa 3 : Recapado Asfáltico de 18 cm de espesor (3,5 m de ancho).
- Alternativa 4 : Reconstrucción Completa de la Pista y Berma (4,3 m de ancho).

Las alternativas mencionadas anteriormente se esquematizan en las Figuras 4-15 y 4-16. Al igual que en los diseños de pavimentos nuevos, se consideraron mezclas asfálticas con asfaltos de grado PG 64-28 para la capa de rodadura y de grado PG 58-28 para capas intermedias (alternativa 4). Los datos de entrada utilizados en la MEPDG utilizados para caracterizar la granulometría de los áridos y el diseño volumétrico de las mezclas asfálticas nuevas para las alternativas de rehabilitación 1 a 4, corresponden a los mismos parámetros de granulometría y análisis volumétrico de mezclas Superpave utilizados en el diseño de pavimentos nuevos, los cuales se especifican respectivamente en las secciones 4.3.6 (Tabla 4-6) y 4.6.2 (Tabla 4-12).

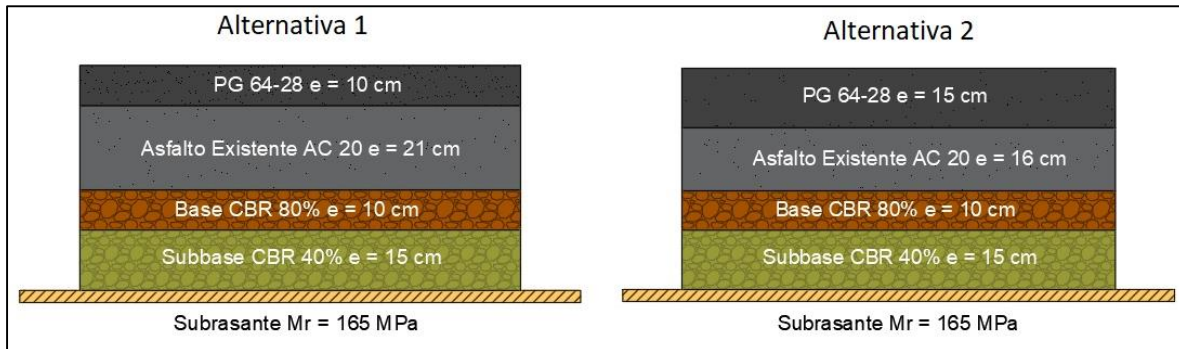


Figura 4-15: Mantenimiento en Asfalto Pista Principal – Alternativas 1 y 2.

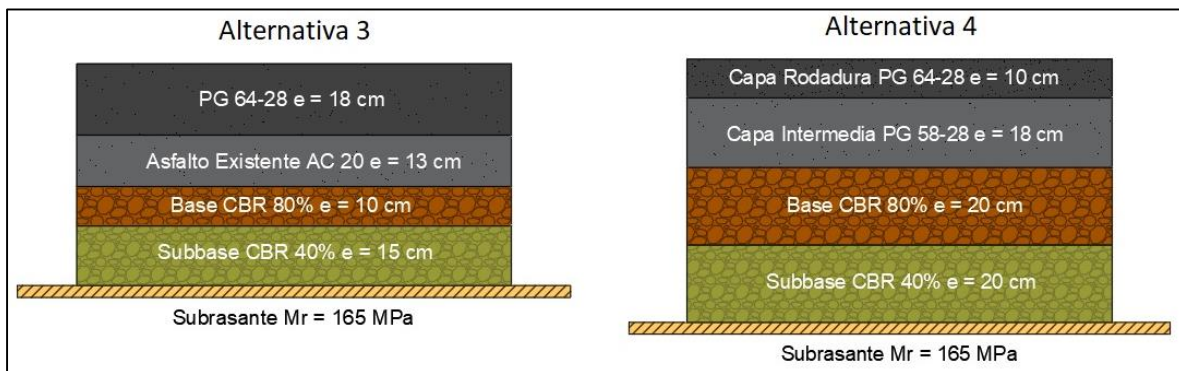


Figura 4-16: Mantenimiento en Asfalto Pista Principal – Alternativas 3 y 4.

La alternativa 4 mostrada en la Figura 4-16 se obtuvo ejecutando el programa hasta obtener un diseño satisfactorio que cumpliera con los umbrales máximos de deterioro para pavimentos asfálticos señalados en la Tabla 4-1 (sección 4.2.5).

4.9.3. Análisis MEPDG – Determinación de Periodos de Mantención

Para estimar las fechas futuras de mantención de las alternativas de rehabilitación en la pista principal, y los costos asociados a ellas (Capítulo 6), se consideró un horizonte temporal de análisis de 40 años.

Para los recapados sobre el pavimento existente (alternativas 1 a 3) se siguió la siguiente metodología:

- a. El primer recapado se realiza al principio del periodo de análisis (año 0).
- b. Se determina el año de falla del primer recapado. Para esto, se consideró en la MEPDG el TMDAC (AADTT en el software) que produce una cantidad de repeticiones de carga similar a la cantidad de ejes equivalentes acumulados durante un periodo de 10 años. El año de falla del primer recapado corresponde al año en el cual se supera alguno de los indicadores de desempeño, luego de ejecutar la MEPDG. Dicho año corresponde al año de ejecución del segundo recapado.
- c. Para determinar el año de falla del segundo recapado (e inicio del tercer recapado) se repite el paso b, considerando el TMDAC acumulado en 10 años a contar del año en el que se realizó el segundo recapado (igual al año de falla del primer recapado).
- d. El paso b se repite de acuerdo a la cantidad de recapados que se alcance a realizar dentro del horizonte temporal, de 40 años.

En el caso de la alternativa 4 (reconstrucción completa de la pista), se realizó un diseño para 20 años, y luego se evaluó un recapado de los 10 cm que componen la capa de rodadura (ver figura 4-14). Para evaluar los parámetros del pavimento existente de este recapado, se ingresó el porcentaje de grietas por fatiga, agrietamiento transversal y ahuellamiento de las capas obtenido a partir de los resultados de la GEMPD para los indicadores de desempeño del pavimento nuevo al término de la vida útil.

En la Tabla 4-15 se muestra un resumen de los años de mantención correspondientes para las alternativas 1 a 4, en base a los resultados obtenidos de los indicadores de desempeño de la MEPDG.

Tabla 4-15: Resumen Mantenciones Asfalto en Pista Principal – Alternativas 1 a 4

Recapados Asfalto (Año de Mantenciones)				
Mantención	e 100 mm	e 150 mm	e 180 mm	Pavimento Nuevo
1	0	0	0	0
2	4	8	9	20
3	8	15	18	32
4	12	22	26	-
5	16	28	33	-
6	20	34	39	-
7	23	39	-	-
8	26	-	-	-
9	29	-	-	-
10	32	-	-	-
11	34	-	-	-
12	36	-	-	-
13	38	-	-	-

Cabe destacar que la mantención 0 para el pavimento nuevo en la tabla anterior corresponde a reconstrucción completa de la pista.

A modo de ejemplo, en la Figura 4-17 se exponen los resultados de la evaluación del primer recapado de asfalto de espesor 150 mm (Alternativa 2). Se puede observar que la cantidad de repeticiones de carga es cercana a 13,2 millones. Este recapado, al igual que todos los otros, fallan únicamente por agrietamiento por fatiga producto de las grietas reflejadas del pavimento existente. En el gráfico de la Figura, se observa que el primer recapado de 150 mm falla en el año 8.

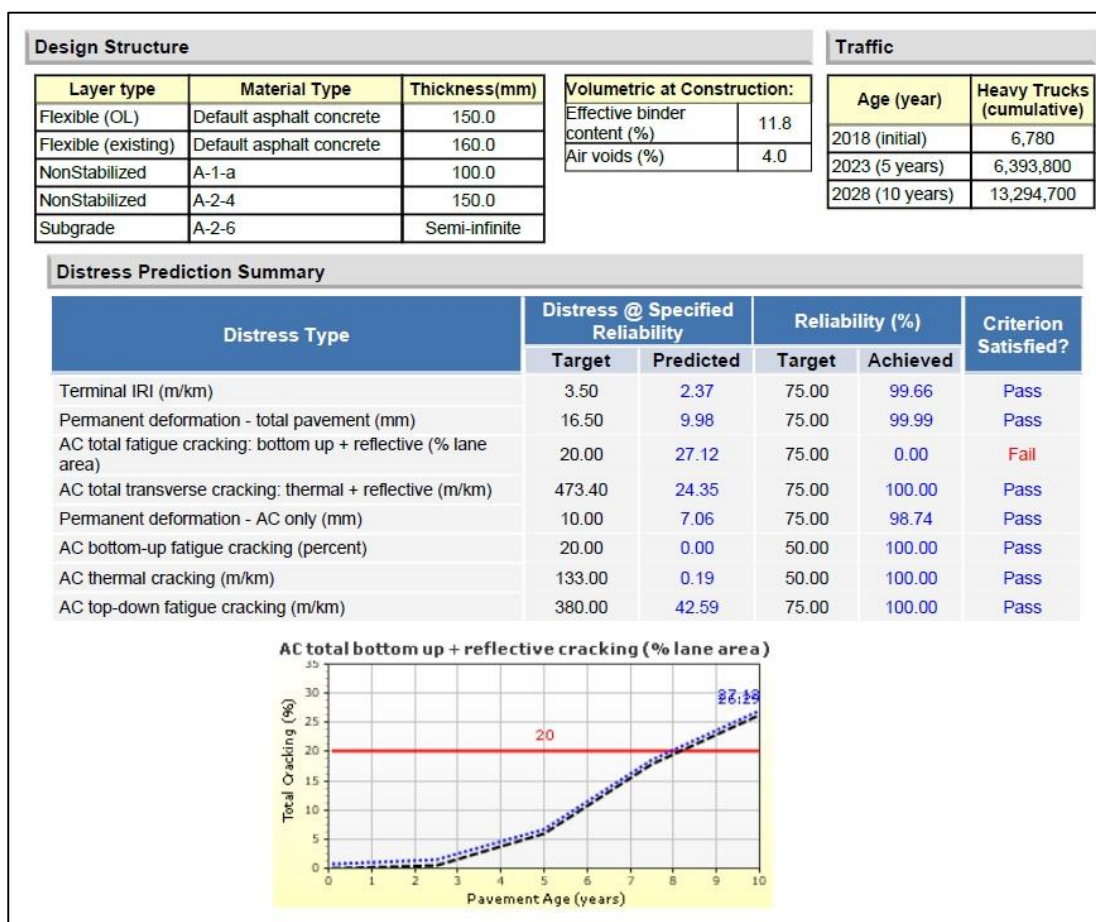


Figura 4-17: Resultados MEPDG Pista Principal – Alternativa 2: Recapado 150 mm

4.10. Recapado con Losas Cortas de Hormigón en Pista Principal

4.10.1. Parámetros de Diseño y Consideraciones

Como alternativa de mantención en hormigón en la pista principal, se consideró una capa de refuerzo no adherida con losas cortas de hormigón con fibra estructural. Los parámetros de diseño considerados corresponden a los mismos parámetros utilizados en el diseño de losas cortas en la pista de prueba expuestos en la sección 4.4 (Tablas 4-7 y 4-8), con excepción de algunos parámetros de tránsito y del suelo, modificados de acuerdo a las condiciones existentes en la pista principal. Los parámetros de diseño con OptiPave2 acerca del tránsito y del suelo utilizados para este diseño se muestran respectivamente en la Tabla 4-16 y Figura 4-18.

Tabla 4-16: Recapado de Losas Cortas en Pista Principal – Parámetros de Tránsito.

Parámetros de Diseño de Tráfico	
Clasificación del Tipo de Tráfico	FHWA TTC 17
Tasa de Crecimiento Anual (%)	2
EE Totales en Pista de Diseño	28.725.443

Proyecto	Diseño	Tráfico	Hormigón	Suelo	Clima	Resultados
N° de Capas	4					
Tipo de Ensayo	CBR					
	Tipo de Suelo	Módulo Resiliente Invierno (MPa)	Módulo Resiliente Verano (MPa)	Módulo de Poisson	Espesor (mm)	
Base	Geotextil	100	100	0,5	5	
2° Capa	Pavimento Asfált	1.000	1.000	0,35	120	
3° Capa	A-1-a	200	200	0,35	100	
4° Capa	A-2-4	114	114	0,35	150	
5° Capa	A-1-a					
6° Capa	A-1-a					
Subrasante	A-2-4	165	198	0,35		
Resistencia a la erosión (Capa Bajo el Pavimento)	1		?			
Coefficiente de Fricción Pavimento-Base	0,65					
Material Fino Bajo Malla N° 200 (Capa Bajo el Pavimento)	1		(%)			
Ayuda OptiPave2 TCPavements						

Figura 4-18: Diseño Pista Principal OptiPave2 – Parámetros del Suelo.

Como se observa en la figura anterior, se consideró la instalación de una membrana geotextil entre la superficie de asfalto existente y el pavimento nuevo de hormigón, la cual se recomienda instalar cuando el recapado de hormigón es no adherido (Fick & Harrington, 2014).

A falta de antecedentes sobre el módulo elástico de la carpeta asfáltica existente, se utilizó un valor de 1000 MPa, que corresponde a un valor promedio recomendado en la sección ayuda de OptiPave2. Debido a que la capa bajo el pavimento corresponde a una malla geotextil sobre el pavimento asfáltico existente, se ha ingresado un porcentaje de material fino bajo la malla N° 200 igual a 1%. Se seleccionó un factor de resistencia a la erosión bajo el pavimento igual a 1, ya que bajo el hormigón se tiene pavimento asfáltico existente.

Finalmente, se consideró un retiro parcial del pavimento existente igual a 19 cm, dejando 12 de los 31 cm totales de asfalto que componen la pista existente.

4.10.2. Espesor de Hormigón Adoptado

Se procedió a ejecutar OptiPave2 con un espesor de hormigón con fibra igual a 19 cm. Los niveles de deterioro predichos por el software al final del periodo de diseño, para una confiabilidad de 75%, son los siguientes:

Losas Agrietadas (%)	:	3	(Máximo 15%)
Escalonamiento Promedio Final (mm)	:	2,94	(Máximo 5 mm)

IRI Final (m/km) : 3,48 (Máximo 3,5 m/km)

Según estos resultados, se puede deducir que el deterioro que condiciona la vida útil del pavimento corresponde a la regularidad superficial (IRI), por lo que al final de la vida de diseño, será conveniente realizar un cepillado de la superficie en el pavimento. Efectuar dicha actividad de mantenimiento implica una reducción en el espesor de las losas, con lo cual se perderían las condiciones geométricas de la rasante en la pista.

Para superar esta dificultad, se aumentó el espesor del pavimento en 2 cm, por lo que la estructura resultante corresponde a una capa de refuerzo de 21 cm sobre un espesor de asfalto existente de 12 cm. Esta solución implica elevar la rasante en 2 cm. Considerando un rebaje promedio de 1,5 cm por cepillado, durante la primera mantención la rasante recuperaría parte de su cota original. El esquema de la solución propuesta se muestra en la Figura 4-19.

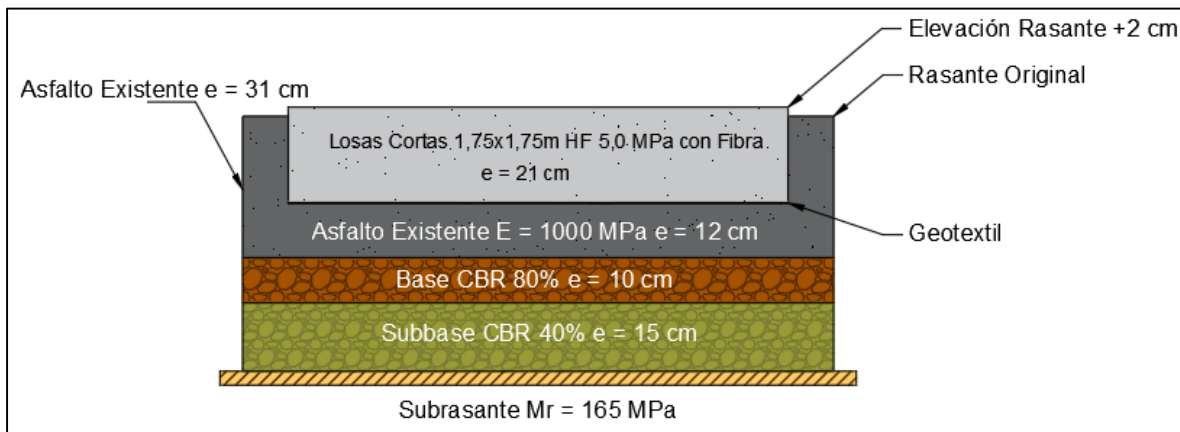


Figura 4-19: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – Esquema Pavimento.

4.10.3. Evaluación del Desempeño en el Tiempo

Para estimar el desempeño del pavimento durante el periodo de análisis de 40 años, se utilizaron las curvas de deterioros que entrega el programa en los resultados. Se realizaron tres evaluaciones con OptiPave2:

Evaluación 1: se evaluó el pavimento con un espesor de 21 cm, considerando el tránsito acumulado en los primeros 20 años ($EE = 28.725.443$). Se determinó que el pavimento falla al cabo de 26 años.

Evaluación 2: se evaluó el pavimento simulando un primer cepillado de la superficie, reduciendo el espesor inicial en 1,5 cm (espesor del pavimento = 19,5 cm) y considerando el tránsito acumulado durante 20 años, a contar del año 26 ($EE = 42.213.400$). Se determinó que el pavimento falla por regularidad superficial en el año 39.

Evaluación 3: se evaluó el pavimento simulando un segundo cepillado de la superficie, reduciendo el espesor de la evaluación 2 en 1,5 cm (espesor del pavimento = 18 cm), considerando el tránsito acumulado durante 20 años, a contar del año 39 ($EE = 51.870.039$).

Con las curvas de desempeño obtenidas en las tres evaluaciones anteriores, se procedió a estimar las curvas de deterioro para los deterioros de porcentaje de losas agrietadas, escalonamiento promedio e IRI, teniendo las siguientes consideraciones.

- El porcentaje de losas agrietadas después de cada cepillado corresponde al valor acumulado en los periodos anteriores.
- Cada actividad de cepillado reduce el valor del escalonamiento en las juntas a cero.
- Cada actividad de cepillado disminuye el IRI a un valor de 2 m/km.

En las Figuras 4-20, 4-21 y 4-22 se muestran respectivamente las curvas de deterioro correspondientes al porcentaje de losas agrietadas, escalonamiento promedio e IRI durante un periodo de tiempo de 40 años.

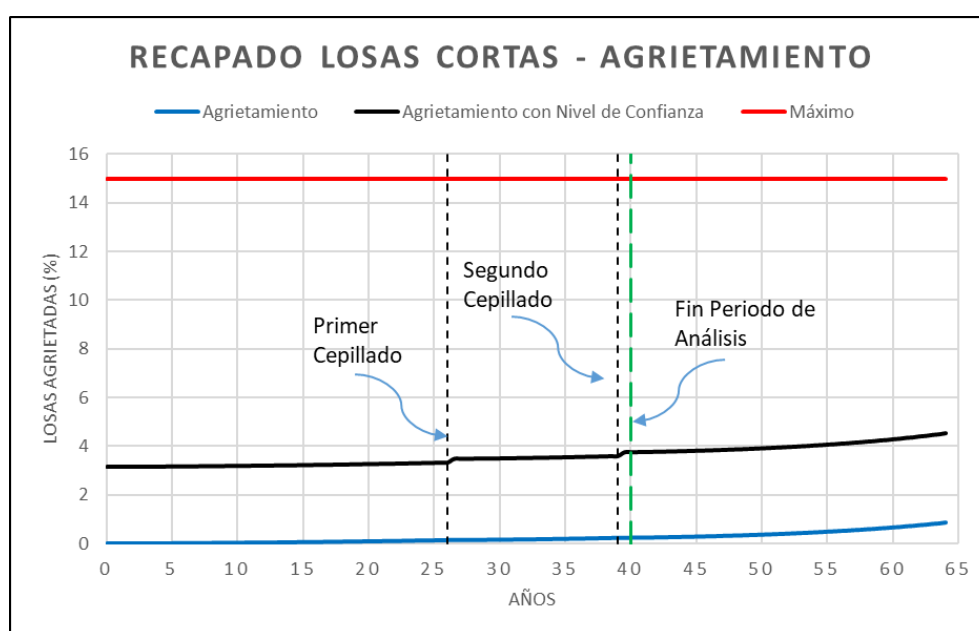


Figura 4-20: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – Agrietamiento vs Tiempo.

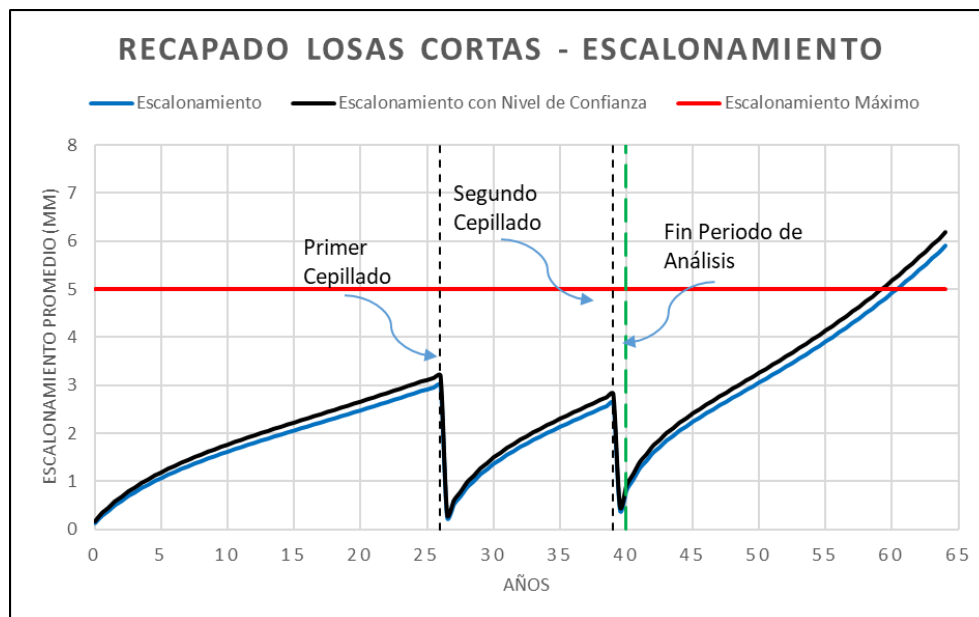


Figura 4-21: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – Escalonamiento vs Tiempo.

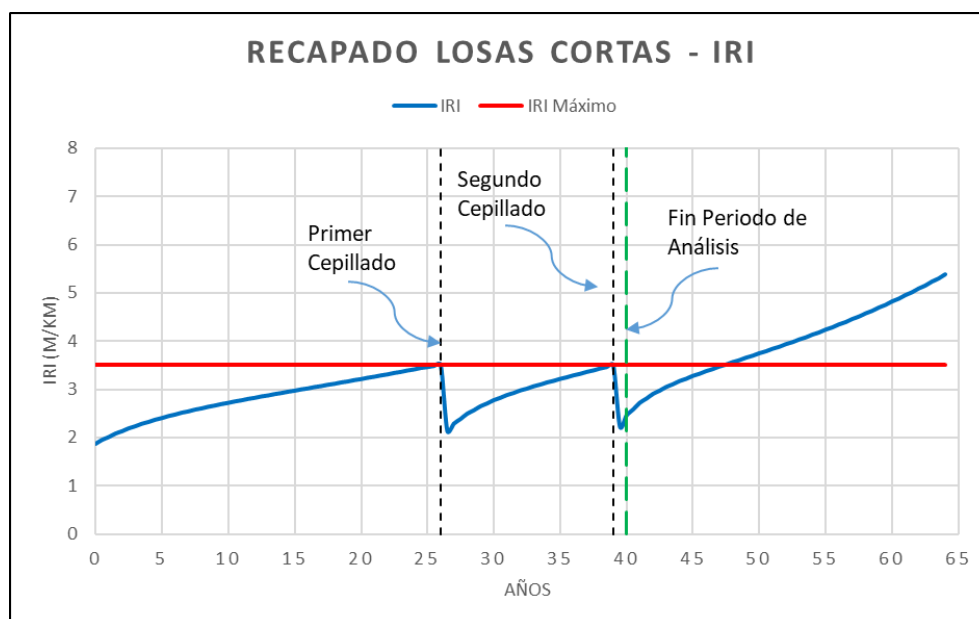


Figura 4-22: Recapado con Losas Cortas en Pista Principal – IRI vs Tiempo.

La información relevante asociada a las figuras mostradas anteriormente, se resume en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17: Recapado Losas Cortas en Pista Principal – Desempeño según OptiPave2.

Año	Agrietamiento (%)	Agrietamiento con nivel de Confianza (%)	Escalonamiento Promedio (mm)	Escal. con nivel de Confianza (mm)	IRI (m/km)
26	0,144	3,332	2,992	3,204	3,511
39	0,240	3,605	2,628	2,826	3,503
40	0,244	3,765	0,807	0,916	2,461
47	0,327	3,867	2,649	2,847	3,515

Finalmente se concluye que se deben realizar dos cepillados en el pavimento dentro de un periodo de análisis de 40 años. Según las curvas de deterioro de OptiPave2, y los criterios adoptados para la elaboración de estas curvas a lo largo del periodo de análisis, el pavimento fallará otra vez en el año 47. Para este año, es probable que se deba ejecutar un recapado de hormigón sobre el pavimento, debido a los rebajes en el espesor producto de los dos cepillados. Sin embargo, los costos asociados a estas reparaciones no se considerarán en el análisis económico debido a que no se encuentran dentro del periodo de análisis considerado.

4.11. Reconstrucción con Losas Cortas de Hormigón en Pista Principal

Junto con la alternativa de recapado de hormigón sobre el asfalto existente, se consideró una reconstrucción completa de la pista con pavimentos de losas cortas, la cual considera, en términos generales, la remoción total del pavimento asfáltico de la pista y la berma, el reemplazo de las capas granulares existentes, y la construcción del pavimento, con sobreancho de la losa exterior y la construcción de una berma de hormigón.

4.11.1. Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño utilizados en OptiPave2 para esta alternativa, tanto por defecto como parámetros específicos en la zona, corresponden a los señalados en la sección 4.4 (Tablas 4-7 y 4-8), a excepción de los parámetros de tránsito, que corresponden a los señalados en la sección 4.10 (Tabla 4-16), utilizados para el diseño del recapado con losas cortas en la pista principal. El módulo resiliente de la subrasante corresponde a 165 MPa (Sección 4.2.2). Los umbrales de deterioro utilizados corresponden a los que se señalan en la sección 4.2 (Tabla 4.1).

4.11.2. Espesor de Hormigón Adoptado

El espesor requerido de hormigón, que satisface los umbrales de deterioro especificados para el diseño, es de 22 cm. No obstante, al igual que para el diseño del recapado de hormigón con losas cortas, se aumentó en 2 cm el espesor señalado, a fin de considerar la reducción del espesor de la primera actividad de cepillado del pavimento, con lo que se tiene un espesor total de hormigón con fibra igual a 24 cm (Figura 4-23).

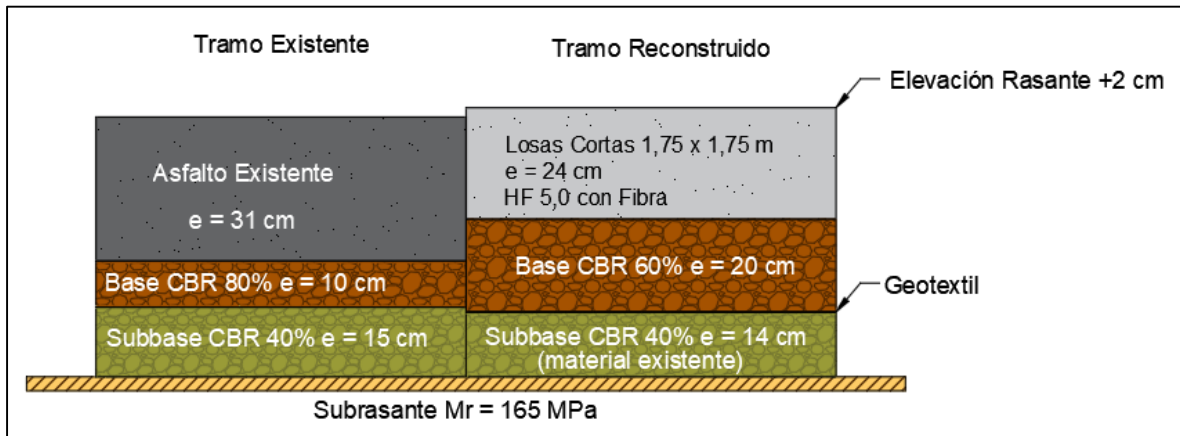


Figura 4-23: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – Esquema Pavimento.

4.11.3. Evaluación del Desempeño en el Tiempo

En las Figuras 4-24 a 4-26 se muestran las curvas de deterioro del pavimento para un periodo de 40 años. Estas se obtuvieron siguiendo la misma metodología descrita en la sección 4.10.3, para el diseño del recapado de hormigón con losas cortas. Se pronostica que, dentro de un periodo de análisis de 40 años, es necesario realizar dos cepillados del pavimento: el primero en el año 24 y el segundo en el año 39.

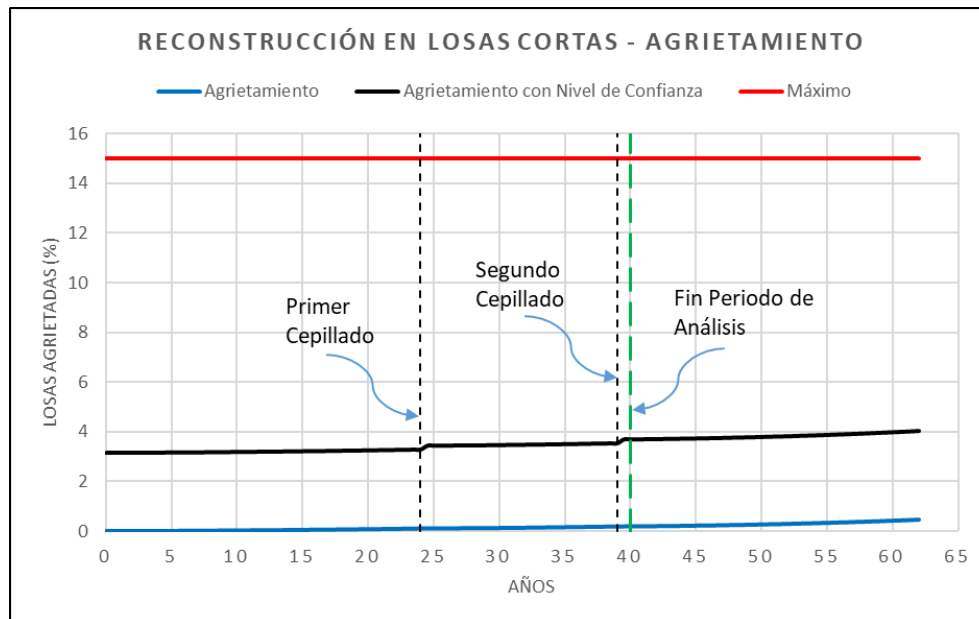


Figura 4-24: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – Agrietamiento vs Tiempo.

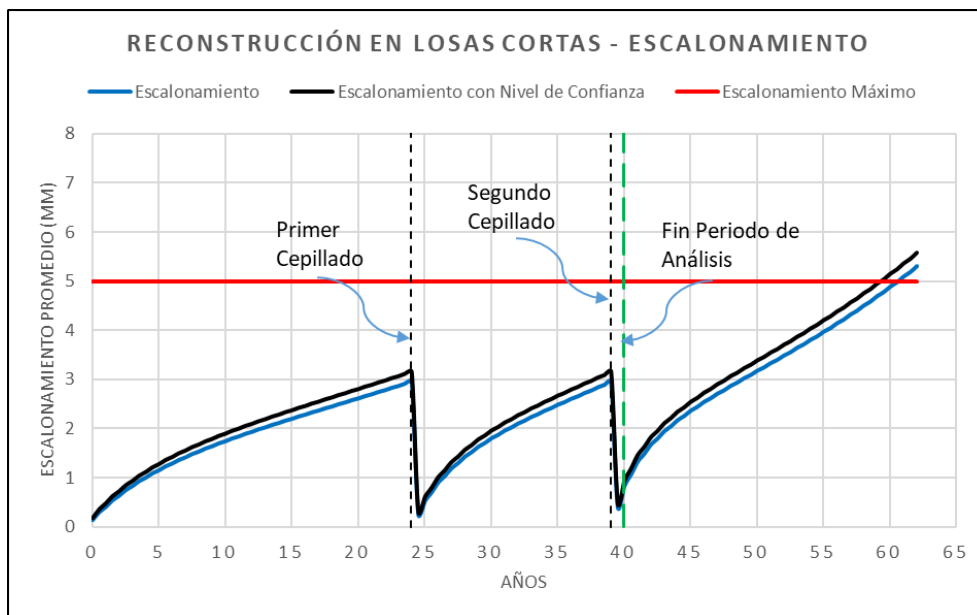


Figura 4-25: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – Escalonamiento vs Tiempo.

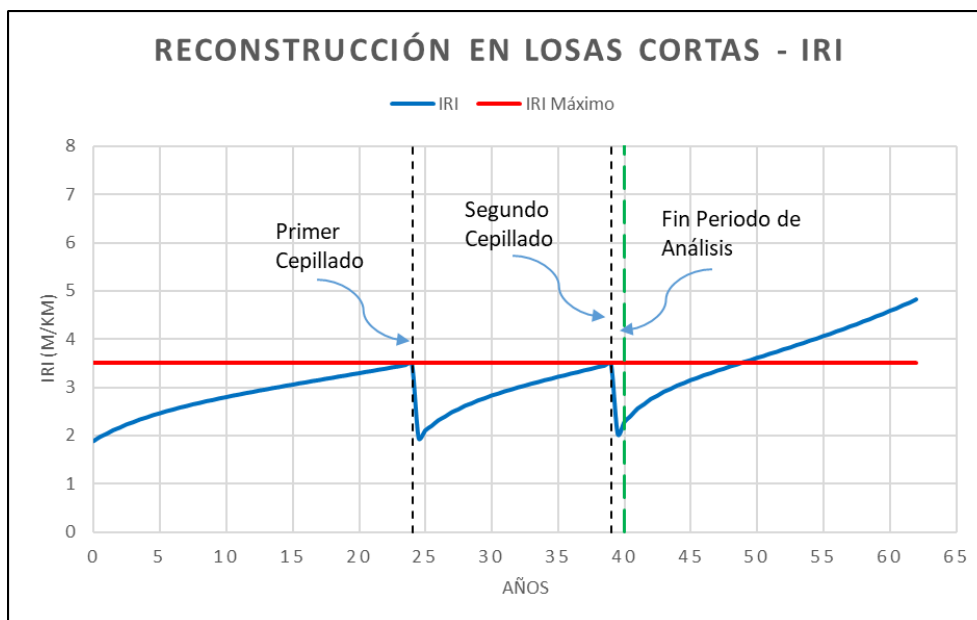


Figura 4-26: Reconstrucción con Losas Cortas en Pista Principal – IRI vs Tiempo.

En la Tabla 4-18 se muestran los valores de deterioros en los periodos de tiempo relevantes mostrados en las figuras anteriores.

Tabla 4-18: Reconstrucción con Losas Cortas Pista Principal – Desempeño según OptiPave2.

Año	Agrietamiento (%)	Agrietamiento con nivel de Confianza (%)	Escalonamiento Promedio (mm)	Escal. con nivel de Confianza (mm)	IRI (m/km)
24	0,112	3,293	2,948	3,157	3,486
39	0,196	3,551	2,952	3,161	3,488
40	0,199	3,709	0,827	0,938	2,273
49	0,267	3,793	3,021	3,233	3,527

A partir de las curvas de deterioro mostradas en las Figuras 4-24, 4-25 y 4-26, y los respectivos valores de deterioro resumidos en la Tabla 4-18, se observa que el comportamiento de esta alternativa en el tiempo es similar al comportamiento presentado por la alternativa de recapado de hormigón en la pista principal. Sin embargo, el primer cepillado se debe realizar en el año 24 y no en el año 26, por lo que el pavimento reconstruido tiene un mejor comportamiento entre el primer y segundo cepillado en comparación al recapado, ya que en ambas alternativas se recomienda un segundo cepillado en el año 39.

4.12. Reconstrucción en Hormigón – Solución Tradicional (AASHTO 98)

En forma adicional a las alternativas de hormigón con losas de geometría optimizada presentadas en las secciones 4.10 y 4.11, en esta sección se presenta un diseño de pavimento de hormigón con losas 3,5 m de largo, con pista ensanchada de 4,3 m que considera una berma de 80 cm construida de una sola vez, diseñado con el método descrito en el MC-V3 de 2017, basado en el método AASHTO de 1998. Esta alternativa fue diseñada únicamente con el fin de una comparación de costos iniciales con las alternativas de reconstrucción de hormigón con losas cortas y reconstrucción en asfalto. Para una comparación válida, se debió realizar este diseño utilizando la MEPDG calibrada para Chile.

4.12.1. Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño del pavimento corresponden en su mayoría a los parámetros de diseño de hormigón tradicional en la pista de prueba de la sección 4.5 (Tabla 4-11), con las siguientes excepciones:

EE de Diseño	:	28.725.443	
Módulo de Reacción de la Subrasante, k	:	103,11	MPa/m (CBR 42%)
Espesor Base	:	20	mm

4.12.2. Espesor de Hormigón Adoptado

El espesor de las losas de hormigón que satisface la cantidad de EE en la pista principal para una vida útil de 20 años, según la confiabilidad adoptada (75%), es de 22 cm. Al igual que en los diseños de hormigón con losas cortas, se aumentará el espesor en 2 cm para considerar la reducción

del espesor del primer cepillado, con lo que el espesor a utilizar es de 24 cm. El esquema del pavimento se muestra en la Figura 4-27.

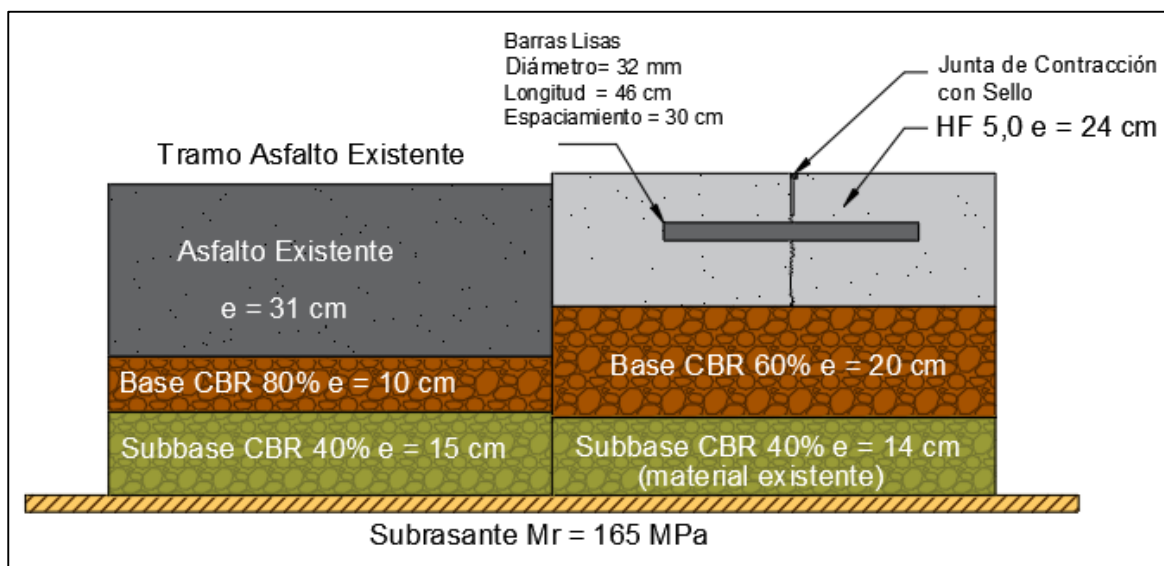


Figura 4-27: Reconstrucción Hormigón AASHTO 98 Pista Principal – Esquema Pavimento.

Se observa que el espesor de losas requerido en este diseño es igual al espesor requerido para la reconstrucción de hormigón con losas cortas. Esto se debe a que en los diseños AASHTO de 1993 y 1998, el espesor de diseño depende de la cantidad de EE de diseño, que a su vez depende de la confiabilidad adoptada, por lo que el método es altamente sensible a este parámetro. Este diseño se realizó con una confiabilidad de 75%. Si el mismo diseño se hubiera realizado con una confiabilidad de 90%, el espesor requerido de las losas es de 27 cm (sin considerar los 2 cm adicionales para el cepillado).

Otro parámetro que influye en el espesor requerido del pavimento, corresponde al tipo de berma. Este diseño en particular se realizó con una berma de pista ensanchada, de ancho igual a 4,3 m. Si el mismo diseño (con una confiabilidad de 75%) se hubiera realizado considerando borde libre (ancho de 3,5 m), el espesor requerido de las losas es de 24 cm, los cuales aumentan a 26 cm si se considera un aumento del espesor de 2 cm para cepillados futuros.

4.12.3. Serviciabilidad en el Tiempo

A modo de estimar el periodo de mantenimiento para esta alternativa de pavimento tradicional, en la Figura 4-28 se muestra la evolución de la serviciabilidad del pavimento en función del tiempo, para un periodo de análisis de 40 años. Esta curva se obtuvo aplicando la ecuación general del método AASHTO 98, determinando año a año la serviciabilidad final en función de los ejes equivalentes solicitantes acumulados (sin factor de confiabilidad).

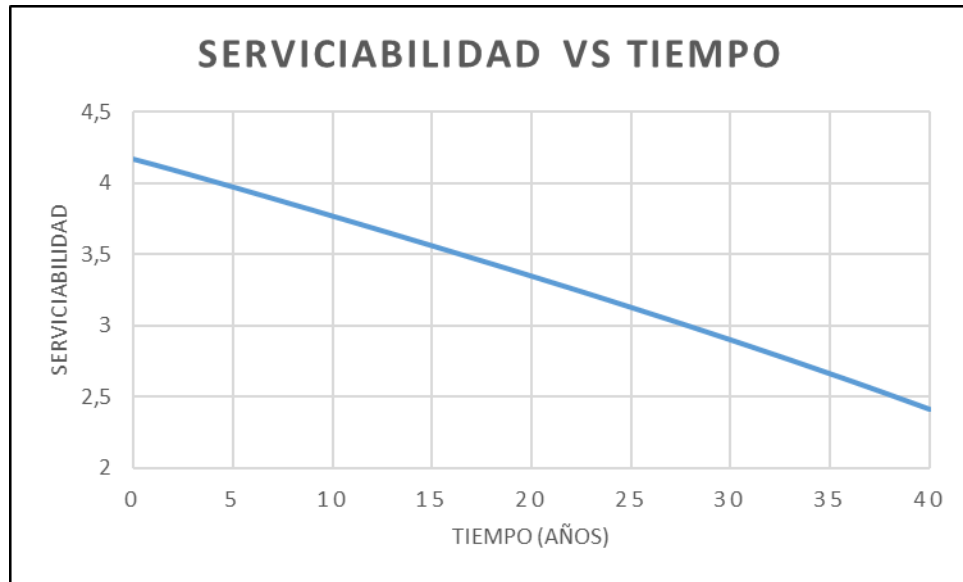


Figura 4-28: Reconstrucción AASHTO 98 Pista Principal – Evolución Serviabilidad.

En base a la serie de valores de serviabilidad de la Figura 4-28, mediante la ecuación 2.13 (ver sección 2.4.2.2) se obtuvo una estimación de la serie de valores del IRI durante el periodo de análisis, la cual se muestra en la Figura 4-29 (curva segmentada de color negro). Como criterio de selección del periodo de mantenimiento en el pavimento, se seleccionó el año en el cual el IRI alcanza un valor de 3,5 m/km, mismo umbral de deterioro para la regularidad superficial utilizado en los diseños de pavimento de losas cortas. Se observa que el umbral de IRI se alcanza al año 28 del periodo de análisis, año en el cual se considera un cepillado del pavimento como alternativa de mantención.

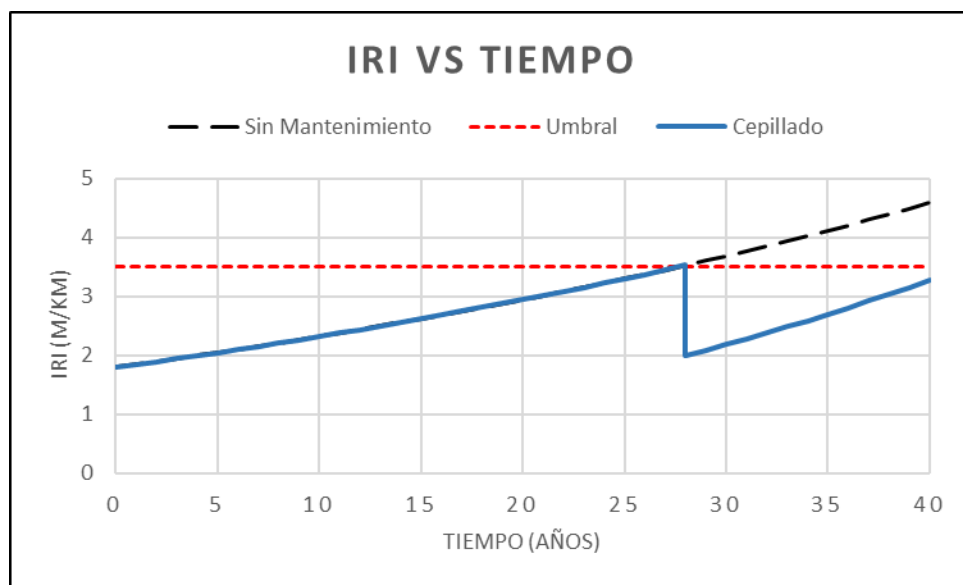


Figura 4-29: Reconstrucción Hormigón AASHTO 98 Pista Principal – Evolución IRI.

Para determinar las curvas de serviciabilidad e IRI posterior al año 28 en la, se consideró que el cepillado reduce el IRI a un valor de 2 m/km, y reduce el espesor de la losa en 1,5 cm. Se observa hacia el final del periodo de análisis que el IRI no alcanza los 3,5 m/km, por lo que no es necesario otro cepillado de la superficie.

Es necesario señalar que la serviciabilidad inicial del pavimento en el año 0 es distinta al valor usual de 4,5. Esto se debe a que se eligió un valor de serviciabilidad tal que al emplear la ecuación 2.13 resulte un IRI igual a 1,8 m/km, valor e IRI inicial utilizado en el diseño de pavimentos de losas cortas. El valor de serviciabilidad asociado es igual a 4,16.

Finalmente, cabe destacar que el método para estimar el IRI de un diseño de pavimento de hormigón tradicional es sólo empírico. Una estimación más confiable del IRI para un pavimento de estas características hubiera sido posible con la aplicación de la MEPDG calibrada para Chile, en la cual se puede aplicar además un factor de confiabilidad a las curvas de predicción de este indicador de desempeño. La MEPDG permite, además, calcular el porcentaje de losas agrietadas y el escalonamiento promedio del pavimento al final de la vida de servicio, lo cual el método AASHTO de 1998 no permite hacer.

CAPÍTULO 5. EXPERIENCIA EN OBRA

5.1. Introducción

A petición de la Unidad Operaciones Carretera (UOC) de la DET, encargada de la mantención y la operación de la carretera El Cobre, se ejecutó la construcción de un tramo de pavimento de losas cortas de hormigón con fibra sintética de polipropileno, dentro de la pista auxiliar ubicada en la zona de estudio (km 41 de la CEC). Las actividades de pavimentación se ejecutaron durante los días 5, 6 y 7 de diciembre de 2017.

En este capítulo se describe a grandes rasgos la experiencia en obra, recursos utilizados, actividades realizadas, tiempos de ejecución, y costos asociados. Se expone además los principales inconvenientes e imprevistos durante las jornadas de trabajo.

Finalmente, se muestra un resumen acerca de los resultados de resistencia a la compresión cilíndrica y flexotracción de probetas de hormigón confeccionadas y ensayadas en laboratorio, a fin de estudiar el desarrollo de la resistencia en el tiempo del hormigón utilizado en la pavimentación de prueba.

5.2. Diseño con OptiPave2

5.2.1. Características Geométricas

Las dimensiones de la pavimentación son de 100 m de largo por 3,9 m de ancho. Debido a que el ancho de la pista es superior al ancho de una pista estándar, se ha elegido ejecutar la construcción en losas de 1,75 x 1,75 m, dejando un ancho de hormigón de aproximadamente 40 cm que actúe como berma. El esquema del pavimento y las dimensiones mencionadas se muestran en el esquema de la Figura 5-1.

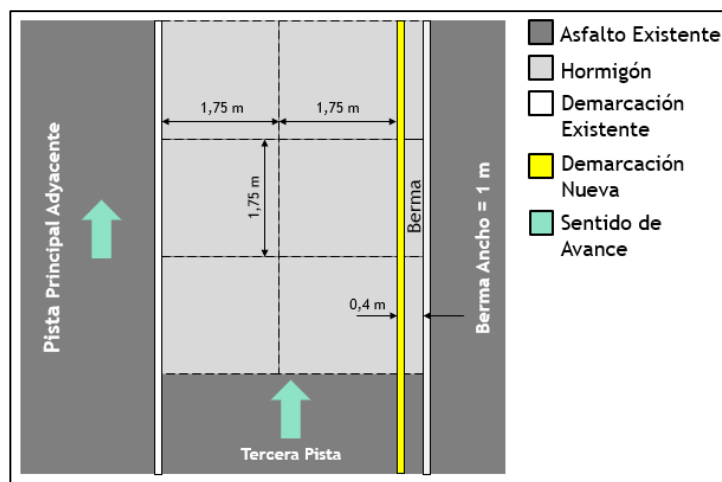


Figura 5-1: Pavimento de Losas Cortas en Pista de Prueba – Esquema en Planta.

5.2.2. Parámetros de Diseño

Los parámetros adoptados en OptiPave2 para características los umbrales de deterioro, parámetros de diseño generales y específicos, son los que se señalan respectivamente en las secciones 4.2.5 (Tablas 4-1), 4.4.1 (Tabla 4-7) y 4.4.1 (Tabla 4-8), salvo las siguientes modificaciones que se muestran a continuación.

5.2.2.1. Sobreancho de Losas

En base al ancho actual de la pista y a las dimensiones adoptadas para las losas (1,75x1,75m), se ha elegido no considerar un sobreancho de la losa exterior, de tal manera de considerar una berma de hormigón de al menos 40 cm.

5.2.2.2. Umbrales de Deterioro

Considerando el carácter experimental del proyecto y su ubicación (pista auxiliar), se aumentó el valor umbral para el IRI al final de la vida útil del pavimento, a 4 m/km.

5.2.2.3. Base

En base a los espesores de la estructura de asfalto existente en la pista, se estimó un espesor de base granular igual a 15 cm, la cual soportará la nueva capa de hormigón. Se adoptó un módulo resiliente de la base igual a 200 MPa, asociados a un valor de capacidad de soporte CBR igual a 80%.

5.2.2.4. Hormigón.

Los hormigones suministrados en el área alta de la DET están especificados por resistencia a la compresión cúbica a 28 días, por lo que se seleccionó este ensayo en OptiPave2, para el tipo de ensayo de resistencia.

A fin de obtener una resistencia a la flexotracción de alrededor de 5 MPa a 28 días, se seleccionó un hormigón especificado a compresión cúbica de 50 MPa, a 28 días, asumiendo un factor de relación entre ambas resistencias igual a 10. Cabe destacar que el factor por defecto de la relación entre la resistencia cúbica y resistencia a la flexotracción del hormigón en OptiPave2 es igual a 8,5. Se ha utilizado un valor de 90% para la Confiabilidad Diseño de Hormigón en el software, que corresponde a la confiabilidad de los hormigones suministrados en la DET.

Se realizaron ensayos de laboratorio a fin de estudiar la resistencia del hormigón seleccionado en el tiempo, los cuales se muestran en forma resumida en la sección 5.8.

5.2.3. Espesor de las Losas

Se ejecutó el software OptiPave2 con los parámetros de diseño mencionados en la sección 5.2.2. Se determinó que un espesor de 16 cm de hormigón con fibra estructural de resistencia residual

de 1 MPa satisface cada uno de los índices de deterioro al término de la vida útil (porcentaje de losas agrietadas, escalonamiento e IRI).

5.3. Actividades Realizadas

La ejecución del proyecto de pavimentación de hormigón de losas cortas en el km 41 de la CEC, se resume en las siguientes actividades:

- Remoción del Pavimento Asfáltico Existente.
- Preparación de la Subrasante.
- Pavimentación.

5.3.1. Remoción del Pavimento Asfáltico Existente

Para llevar a cabo la remoción del pavimento asfáltico existente se ejecutaron las siguientes actividades, las cuales se detallan a continuación:

- Corte del Pavimento (22/11/2017).
- Segregación de la Pista (29/11/2017).
- Retiro del Pavimento Existente (30/11/2017).

5.3.1.1. Corte del Pavimento

El corte del asfalto existente (Figura 5-2) fue ejecutado durante el día 22 de noviembre de 2017. Este se realizó utilizando dos máquinas cortadoras con disco al agua, con las cuales se realizaron aproximadamente 212 m de cortes en un plazo aproximado de cinco horas, obteniendo un rendimiento promedio de 21 m de corte por hora para cada una de las máquinas.



Figura 5-2: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Cortes de Asfalto Existente.

5.3.1.2. Segregación de la Pista

Una vez realizado el corte del pavimento, durante cada una de las actividades posteriores se procedió a realizar la segregación de la pista durante y al final de cada jornada de trabajo. La segregación consistió en la instalación de barreras de hormigón Tipo F.

5.3.1.3. Retiro del Pavimento Existente

El retiro del pavimento existente se realizó mediante excavadora (Figura 5-3). El espesor de asfalto removido según observaciones en terreno, oscilaba entre 7 y 10 cm. La actividad se completó durante un periodo aproximado de cinco horas, en el cual se removió una superficie aproximada de 400 m² de asfalto. El asfalto retirado fue almacenado a un costado de la berma para luego ser trasladado al botadero existente dentro de la DET, denominado Centro de Manejo de Residuos Industriales Sólidos (CMRIS).

En forma previa a la ejecución de esta actividad, se procedió a instalar barreras de hormigón Tipo F en aquel borde de la pista principal adyacente a la pista de prueba, con el fin de evitar accidentes en la ruta producto del desnivel de la rasante entre ambas pistas luego del retiro del asfalto. Sumado a esto, se procedió a realizar cortes y control de tránsito durante la jornada de trabajo y las jornadas correspondientes a las actividades posteriores.



Figura 5-3: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Retiro de Asfalto Existente.

Una de las dificultades generadas durante la ejecución de esta actividad corresponde al aumento considerable del espesor del asfalto cerca del borde interno de la pista (Figura 5-4), en una franja de aproximadamente 80 cm. Esto permite suponer que esta porción del pavimento corresponde a la berma antigua de la pista principal, antes de la construcción de la pista auxiliar. A fin de no

generar daños en la pista principal producto de los impactos de la excavadora, se decidió retirar sólo la capa asfáltica que conformaba la pista auxiliar.



Figura 5-4: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Franja de Asfalto de Mayor Espesor.

Una vez finalizada la jornada de trabajo, mediante la operación de un camión pluma se procedió a bajar las barreras de hormigón Tipo F al borde interno de la pista, donde el asfalto fue removido. Se instalaron discos de reducción de velocidad a 40 km/h a fin de disminuir la probabilidad de accidentes.

5.3.2. Preparación del Terreno

- Imposibilidad de retirar todo el asfalto existente. Parte del asfalto de la tercera pista corresponde a berma antigua de la pista principal adyacente, por lo que quedó un área de trabajo conformada por base antigua y asfalto subyacente de ancho aproximado de 1 m (Figura 5-5).
- Espesor de excavación insuficiente. No se dio la profundidad necesaria a la excavación en algunos sectores. Por otro lado, algunas partes presentaban mayor profundidad. Esto se verifica con la cantidad de hormigón colocado en obra. De 64 m³ necesarios sólo se colocaron 58 m³, que corresponden a un espesor promedio de pista de 14,6 cm.
- Falencias en la reparación de los bordes del pavimento asfáltico de la pista principal y berma, las cuales influyeron en la terminación superficial con la cercha, copiando la rugosidad del pavimento existente.



Figura 5-5: Inconvenientes Pavimentación con Losas Cortas – Berma Asfáltica Antigua.

5.3.3. Preparación de la Subrasante

Para la preparación de la subrasante en forma previa a la colocación del hormigón, se realizaron las siguientes actividades en la zona (Figura 5-6):

- Retiro del material suelto dentro de la excavación originada a partir de la remoción del pavimento existente.
- Mejoramiento de bordes de la zona excavada mediante martillo demoledor. Adicionalmente se utilizó hormigón pre dosificado para reconstituir algunos bordes quebrados ya sea por el retiro del pavimento o por el paso de las ruedas de los equipos por los bordes de la excavación.
- Humectación del terreno con camión aljibe.
- Rebaje del terreno a cota -0,16 m con motoniveladora y retroexcavadora, entre las 12 y 13:30 horas.
- Humectación del terreno con camión aljibe, luego del paso de la motoniveladora.
- Compactación del terreno con rodillo, en el tramo de pista con la base granular al descubierto. Se realizaron 6 ciclos de compactación, correspondiendo cada ciclo al paso del rodillo hacia adelante y en reversa a lo largo de toda la pista. La compactación se realizó en dos etapas, ya que en paralelo y desde el otro extremo de la pista se comenzó a bajar las barreras de hormigón a la porción de excavación con asfalto superficial.



Figura 5-6: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Preparación de la Subrasante

5.3.4. Pavimentación

El proceso de pavimentación en la pista de prueba consta de las siguientes actividades, las cuales se detallan a continuación:

- Colocación del Hormigón.
- Terminación.
- Textura Superficial.
- Protección y Curado.
- Corte de Juntas

5.3.4.1. Colocación del Hormigón

La etapa de colocación del hormigón se programó con una duración de sólo 2 días, iniciando el 5 de diciembre de 2017. Inicialmente se tenían considerados 64 m³ de hormigón, correspondientes a una pista de 100 m de largo, 4 m de ancho y 16 cm de espesor. Ante posibles aumentos de espesor producto de la excavación y preparación de la subrasante, se solicitaron 70 m³ de hormigón grado H50 (10 camiones mixer).

La docilidad solicitada del hormigón (según la norma chilena NCh1019 Of. 2009) fue de 10 ± 2 cm, valor elevado en relación a docilidades usualmente requeridas para proyectos de pavimentación (de 4 a 6 cm). Se decidió solicitar un hormigón con mayor asentamiento de cono a modo de considerar la pérdida de docilidad en el hormigón durante el tiempo de traslado de la mezcla. Por otro lado, también se consideró la variación de la docilidad en el hormigón producto de la incorporación de fibra estructural, la cual se añadió en una dosificación de 2,5 kg/m³ de hormigón.

La colocación del hormigón se realizó utilizando cercha vibradora. En total se dispuso de ocho trabajadores para esta actividad. El diagrama de la ubicación del personal de hormigonado se muestra en la Figura 5-7.

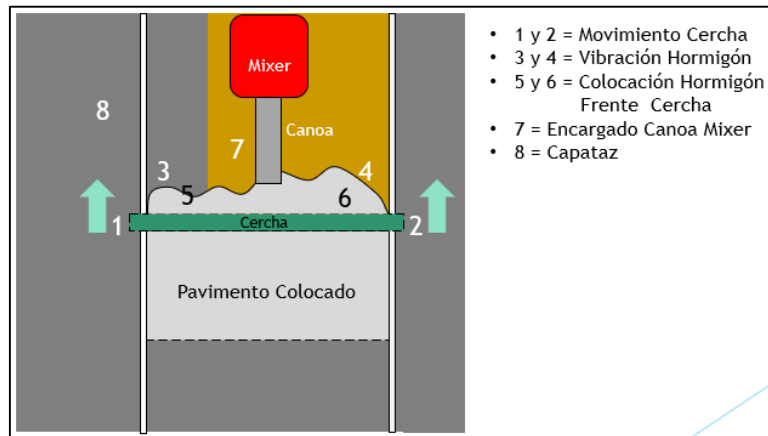


Figura 5-7: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Organización Personal de Colocación.

Luego del vaciado de cada camión mixer, el personal de colocación demoraba entre 45 min y 1 hora en colocar el hormigón, pavimentando un largo de pista promedio de 11 a 13 metros. El trabajo realizado se muestra en la Figura 5-8.



Figura 5-8: Pavimentación con Losas Cortas en km 41 - Colocación Hormigón.

Información acerca de la frecuencia de los camiones mixer en obra, junto a otros datos relevantes de la obra se resume en las Tablas 5-1 y 5-2. Cada camión transportó un total de 7 m³ de

hormigón, a excepción del ultimo camión del día miércoles 6, que transportó solo 2 m³ necesarios para finalizar la pavimentación, con lo que, en total, durante las dos jornadas de pavimentación, se colocaron 58 m³ de hormigón.

Tabla 5-1.- Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Frecuencia Camiones Mixer 5 de Dic.

Camión	Llegada Obra	Inicio Descarga	Termino Descarga	Descarga (horas)	Cono (cm)	Cono Terreno (cm)	T° Amb. (°C)	T° Ho. (°C)
1	9:10	9:25	10:20	0:55	12	-	13	19
2	11:45	11:55	12:40	0:45	12	-	14	20
3	13:02	13:06	14:45	1:39	12	16	14	20
4	14:00	14:50	16:00	1:10	12	9,5	21	21

Tabla 5-2.- Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Frecuencia Camiones Mixer 6 de Dic.

Camión	Llegada Obra	Inicio Descarga	Termino Descarga	Descarga (horas)	Cono (cm)	Cono Terreno (cm)	T° Amb. (°C)	T° Ho. (°C)
1	10:20	10:35	11:30	0:55	12	10	18	19
2	11:55	12:01	13:32	1:31	12	8	19	21
3	12:50	14:10	15:45	1:35	12	9	20	21
4	15:09	15:50	16:50	1:00	12	9,5	22	23
5	17:00	17:05	17:25	0:20	12	-	22	24

5.3.4.2. Terminación

Durante el primer día de trabajo, la terminación del pavimento se fue realizando una vez la cercha vibradora enrasaba una longitud de pavimento de entre 1 y 2 metros. Al día siguiente, se enrasaba con la cercha una longitud cercana a los 3 metros con el objetivo de reducir las detenciones de la cercha.

Durante la jornada del día martes 5 de diciembre no se contó con el platacho óptimo para la obra (platacho avión con mango extensible), por lo que la actividad de terminación se realizó con cierta dificultad durante ese día. La herramienta llegó el día miércoles 6 de diciembre durante el mediodía, lo cual facilitó mucho más la actividad de terminación (Figura 5-9).



Figura 5-9: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Terminación.

5.3.4.3. Textura Superficial

Para dar rugosidad al pavimento inicialmente se tenía pensado utilizar un sistema de escobillones industriales amarrados a un listón, de tal manera de dar textura en todo el ancho del pavimento a la vez. El sistema fracasó debido a dos factores: por una parte, la curvatura que tomó el listón producto del peso de los escobillones originó que algunos sectores quedaran sin la textura adecuada. Por otro lado, las cerdas de los escobillones eran muy delgadas y flexibles, por lo que hubo que cargar el sistema más de lo normal, originando en algunas oportunidades el desprendimiento de hormigón en la superficie terminada del pavimento.

Finalmente, para dar solución a estos problemas, se utilizó un escobillón de cerdas metálicas. Un jornal estuvo a cargo de dar textura al pavimento con esta herramienta, apenas finalizaba el proceso de terminación con platacho (Figura 5-10). Debido a que este escobillón tenía un ancho aproximado de 35 cm, el proceso fue en general poco eficiente.



Figura 5-10: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Textura Superficial.

5.3.4.4. Protección y Curado

Una vez finalizadas las actividades de terminación y textura superficial, se procedió a la colocación de la membrana de curado antisol mediante una pulverizadora de mochila (Figura 5-11). Para esta tarea se ocupó en total 11 tinetas de este producto (18 l c/u). Posterior a la aplicación de la membrana antisol, y para complementar la protección que esta ofrece, se procedió a tapar el pavimento con membrana de polietileno transparente.



Figura 5-11: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Aplicación Membrana de Curado.

5.3.4.5. Junta de Construcción

Al finalizar la colocación del hormigón en la primera jornada, se materializó una junta de construcción, a una distancia de 49 metros desde el inicio del hormigonado. Se utilizaron barras de traspaso de carga lisas de 22 mm de diámetro y 60 cm de longitud, espaciadas a 30 cm (Figura 5-12).



Figura 5-12: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Junta de Construcción.

5.3.4.6. Cortes de Juntas

Durante el primer día de trabajo se determinó que el pavimento ya estaba en condiciones de ser cortado cerca de las 15:00 horas, aproximadamente 5 horas después de finalizada la colocación del hormigón del primer camión. No obstante, por falta de personal (cortadores estaban colaborando con la tarea de hormigonado), esta actividad se realizó luego de finalizada la colocación y terminación del hormigón del último camión, a las 16:30 horas (Figura 5-13).



Figura 5-13: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Cortes Transversales (izquierda) y Longitudinales (derecha) del Pavimento.

Debido a la gran cantidad de cortes por realizar y al escaso tiempo disponible luego de la actividad de hormigonado, se dio la instrucción de realizar cortes transversales cada 3,5 m (cada dos juntas de contracción) y solo uno de los cortes longitudinales, con el objetivo de liberar tensiones por retracción del hormigón, de forma similar al procedimiento de cortes adoptado durante la repavimentación del Camino La Pólvara con losas cortas de hormigón (Del Río & Covarrubias V., 2016).

Durante la jornada del día miércoles 6 de diciembre la actividad de cortes comenzó alrededor de las 15:00 horas con un solo cortador, retomando los tramos pendientes y siguiendo el mismo patrón de corte del día anterior. Finalmente se realizó el resto de cortes en el pavimento durante el día jueves 7 de diciembre, realizando los cortes transversales intermedios y el segundo corte longitudinal, cercano al borde externo de la pista.

5.4. Resultados

La obra finalizó el día jueves 7 de diciembre, tras realizar los cortes restantes que quedaron pendientes el día anterior. Luego de terminar con la actividad de cortes se procedió a mojar el pavimento con camión aljibe. Posteriormente se dio fin al corte de tránsito en el sector y el pavimento fue abierto al tránsito a las 17:00 horas de ese día, cerca de 24 horas después de finalizar la colocación del hormigón del último camión del día anterior. El pavimento terminado se muestra en la Figura 5-14.



Figura 5-14: Pavimentación con Losas Cortas km 41 - Pavimento Terminado.

Las fotos mostradas en la figura anterior fueron tomadas tres días después de que el pavimento fuera abierto al tránsito (lunes 11 de diciembre de 2017). No se observaron indicios de daño causado por camiones. Sin embargo, se observan deficiencias importantes en la regularidad y textura superficial y en la ejecución de algunos cortes.

Para corregir las deficiencias en la regularidad superficial, se procedió a realizar un cepillado de la superficie del pavimento, el cual disminuyó el espesor de las losas en alrededor de 1,5 cm. La superficie del pavimento, posterior al cepillado, se muestra en la Figura 5-15.

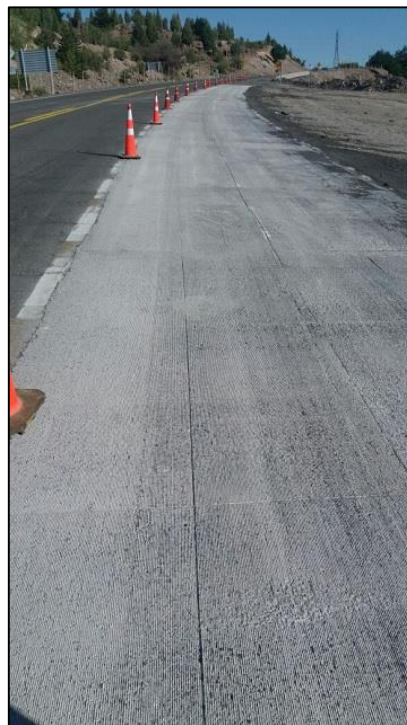


Figura 5-15: Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Cepillado de la Superficie.

5.5. Principales Inconvenientes Observados

A continuación, se mencionan las principales deficiencias, inconvenientes y contratiempos observados durante la ejecución de este proyecto.

5.5.1. Hormigonado

5.5.1.1. Suministro de la Mezcla

- Problemas en el ajuste de docilidad del hormigón en planta debido a la fibra, lo cual produjo retrasos de los camiones mixer en la obra.
- Problemas en el mezclado del hormigón, presencia de masas compactas de hormigón con fibra, en forma de bolones.
- Retraso segundo camión mixer del día martes 05/12. Transcurrió 1 hora y 35 minutos entre el termino de descarga del primer camión y el inicio de descarga del segundo. Se generó una junta fría producto del secado prematuro del hormigón de la superficie terminada, la cual no fue tratada (Figura 5-16). Debido a esto la continuidad estructural será escasa y, en el peor de los casos, nula, por lo que es probable se genere escalonamiento producto del posible desnivel que se genere entre las superficies a ambos lados de esta junta.



Figura 5-16: Inconvenientes Pavimentación km 41 - Junta Fría por Retraso de Camión Mixer.

- Desperfecto en canoa del tercer camión mixer del día miércoles 06/12. Se esperó 40 minutos entre el inicio de descarga de este y el término de la descarga del camión anterior.

- Hormigón del tercer camión del día martes 05/12 llegó fluido (mayor asentamiento de cono que el solicitado). Debido a esto se decidió esperar a que el hormigón perdiera docilidad, lo cual se puede observar en el mayor tiempo de descarga para este camión según la Tabla 5-1.

5.5.1.2. Colocación del Hormigón

- Cercha vibradora muy liviana.
- Vibradores de inmersión de poco diámetro para el hormigón colocado, lo cual se refleja en el bajo radio de acción de vibrado. (Figura 5-17). Las deficiencias en el vibrado se deben también a la baja docilidad de la mezcla debido al contenido de fibra.
- Alta rugosidad superficial, debido al exceso de pausas en el paso de la cercha (cada 1 o 1,5 m enrasados). Esto se debió principalmente a la falta de personal destinado a la terminación y textura superficial del pavimento.
- Vibrado irregular en el hormigón. En algunos sectores el vibrado fue excesivo, mientras que, en otros, faltó vibrado.
- Retracción acelerada de la mezcla, la cual generó agrietamiento del hormigón en estado fresco (agrietamiento plástico).



Figura 5-17: Inconvenientes Pavimentación km 41 – Problemas de Vibrado del Hormigón.

5.5.1.3. Terminación Superficial

- Falta de herramientas óptimas de terminación durante el primer día de hormigonado, tales como platacho avión con mango extensible. Dicha herramienta llegó durante el mediodía del segundo día de colocación del hormigón.
- Falta de personal. La terminación con platacho la realizó el jornal encargado de controlar y distribuir la caída del hormigón desde el camión a través de la canoa, por lo que, al momento de realizar la terminación, el hormigón se encontraba en la etapa de fraguado, con una consistencia algo rígida para la aplicación del platacho.
- Falta de hormigón en algunas zonas tras el paso de la cercha, obligaba a los trabajadores a realizar colocación y terminación del hormigón a mano, con platachos pequeños, o bien a retroceder con la cercha para enrasar nuevamente los sectores bajos.

5.5.1.4. Textura Superficial

- Falla del sistema de escobillones planeado inicialmente, obligó en obra a utilizar un escobillón metálico de solo 35 cm de ancho, reduciendo drásticamente el rendimiento de esta actividad.
- Exceso de carga al aplicar el escobillón provocó el desprendimiento de áridos en la superficie del hormigón terminado.

5.5.2. Protección y Curado

- Equipo pulverizador inadecuado. Los grumos existentes en la membrana antisol no permitieron un rociado óptimo del producto, lo cual condujo a un mayor consumo de membrana. Inicialmente se tenía pensado utilizar 5 tinetas para toda la obra. Al término de la faena de hormigonado se aplicó un total de 11 tinetas de membrana: 5 tinetas el primer día y 6 el segundo día.
- Porción de hormigón del primer día quedó sin cubrir debido a que se agotó la membrana antisol.
- Tardanza en proteger el hormigón con la membrana de polietileno, debido a la falta de personal y a la necesidad de continuidad en la faena de hormigonado.

5.5.3. Cortes en el pavimento

- Cortes curvos.
- Cortes longitudinales y transversales no perpendiculares entre sí.
- Espesor excesivo en algunos sectores, debido al paso repetido de la cortadora.

5.5.4. Junta de Construcción

- Desnivel en la alineación vertical de las barras de traspaso, producto de la diferencia de espesores entre hormigón colocado sobre la base existente y el hormigón colocado sobre el asfalto que no pudo ser retirado debido a su gran espesor (ver Figura 5-12).

5.5.5. Imprevistos

- Camión pluma se atravesó por la pista hormigonada aproximadamente 7 horas después de colocado y terminado el hormigón durante el primer día martes 05/12. Se habían realizado algunos cortes en el pavimento. No se registraron daños visibles en la pista.
- Accidente en la zona de trabajo durante la madrugada del día martes 6 de diciembre. Camión con batea circuló por sector de pista correspondiente al hormigón del primer camión mixer del día anterior, luego de un periodo aproximado de 18 horas contadas desde la terminación de ese tramo (Figura 5-18).



Figura 5-18: Inconvenientes Pavimentación km 41 – Accidente Martes 6 de diciembre.

5.6. Recursos Utilizados

5.6.1. Personal

Para la ejecución de esta obra se contó con el apoyo de dos cuadrillas (10 trabajadores y 2 capataces). El personal mencionado incluye personal de control y corte de tránsito durante las jornadas de trabajo (2 trabajadores).

5.6.2. Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales:

- Membrana de polietileno (5 rollo 3x20 m)
- Membrana de curado antisol (11 tinetas de 18 litros)
- Barras de acero lisas diámetro 22 mm (2 barras de 6 m)
- Fibras sintéticas de polipropileno, de 5 cm de longitud, en una dosificación de 2,5 kg/m³ de hormigón, donadas por dicha empresa para el proyecto.

5.6.3. Herramientas

Para las actividades de retiro del pavimento existente y preparación de la subrasante:

- 1 cortadora de hormigón con disco de 2,5 a 3 mm aprox.
- 1 martillo demoledor.
- Herramientas menores (palas, rastrillos, entre otros)

Durante la pavimentación se utilizó:

- 1 cercha vibradora de 4 m de longitud.
- 2 vibradores de inmersión diámetro 45 mm.
- 1 platocho avión con mango extensible de ancho aproximado igual a 1 m.
- 1 escobillón municipal de metal (ancho aprox. 35 cm).
- 2 cortadoras de pavimento.
- 1 pulverizador de mochila.

5.6.4. Equipos

Los equipos utilizados se emplearon mayormente durante la preparación de la subrasante. Estos son:

- Excavadora
- Retroexcavadora.
- Motoniveladora.
- Camión Aljibe.
- Rodillo.

5.7. Costo del Proyecto

En la Tabla 5-3 y Figuras 5-19 y 5-20 se muestra un resumen de los gastos totales (no incluyen IVA) asociados a la obra. El resumen de cada una de estas partidas se detalla en el Anexo E.

Tabla 5-3.- Pavimentación con Losas Cortas km 41 – Resumen de Costos.

Partida	Costo Total*
Colocación Contratista	\$3.651.098
Maquinaria	\$1.913.647
Hormigón	\$6.144.177
Patente por uso de losas cortas	\$374.609
Cepillado	\$5.000.000
COSTOS TOTALES	\$17.083.531
Costos Totales por m ²	\$42.709
Costos de Colocación por m ³ *	\$62.950

(*): Calculado en base a los 58 m³ de hormigón colocados.

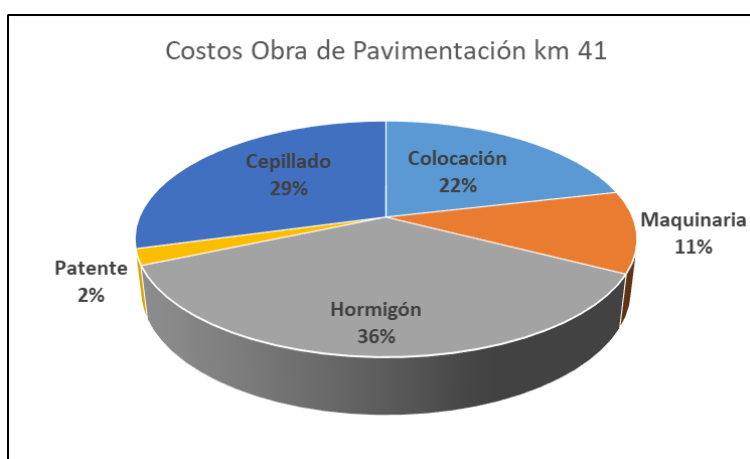


Figura 5-19: Pavimentación Hormigón en Losas Cortas km 41 – Costos (con cepillado).

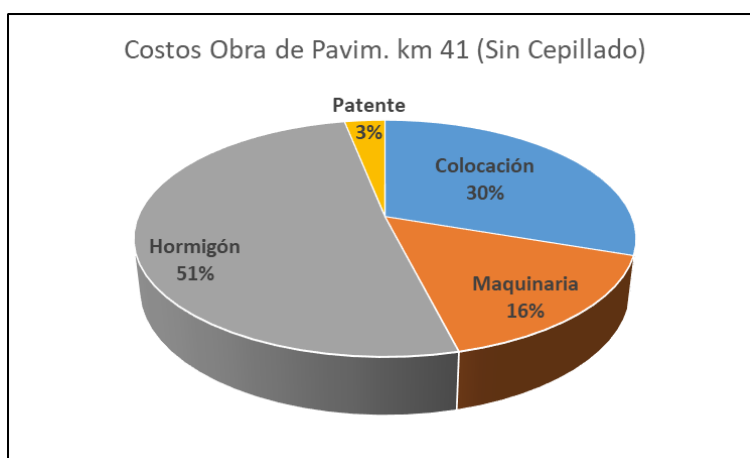


Figura 5-20: Pavimentación Hormigón en Losas Cortas km 41 – Costos (sin cepillado).

Los costos asociados a la empresa contratista que ejecutó la obra incluyen mano de obra, (ejecución de trabajos y control de tránsito), compra de materiales y arriendo de equipos (cercha vibradora, cortadoras del pavimento) etc.

5.8. Ensayos de Hormigón en Laboratorio

Previo a la ejecución de la obra de pavimentación en el km 41, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión cilíndrica y a la flexotracción en probetas de hormigón preparadas en laboratorio. Las resistencias se determinaron ensayando respectivamente probetas cilíndricas y prismáticas, a edades de 1, 2, 3, 7, 28 y 90 días. Para cada edad de ensayo se elaboraron y ensayaron tres probetas de cada tipo. Los ensayos a la compresión se realizaron en probetas cilíndricas y no cúbicas, a fin de satisfacer los requerimientos de la norma NCh170, actualizada en el año 2016, en la cual la resistencia especificada a la compresión debe determinarse en probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm.

5.8.1. Características del Hormigón

Para la elaboración de las probetas se utilizó un hormigón de resistencia especificada a la compresión cúbica de 50 MPa a 28 días, el cual forma parte de la variedad de hormigones suministrados en el área alta de la DET.

El tamaño máximo de los agregados que conforman la mezcla es de 20 mm, mientras que el contenido de cemento de la mezcla es de 420 kg/m³ de hormigón. El valor de estos parámetros difiere considerablemente en comparación a hormigones utilizados para pavimentos de hormigón. Por ejemplo, dentro de las especificaciones técnicas del hormigón establecidas por el Ministerio de Obras Públicas para el proyecto Repavimentación de la Ruta 60-Ch, Camino La Pólvora (2016), el tamaño máximo de los agregados es de 40 mm, mientras que las cantidades mínima y máxima de cemento por metro cúbico de hormigón se fijaron respectivamente en 300 y 380 kg/m³ (Del Río & Covarrubias V., 2016).

Es necesario mencionar que los ensayos de resistencia se realizaron sin incluir fibra en el hormigón debido a que no se disponía de ella al momento de realizar los ensayos. Por otro lado, la dosificación entregada para la elaboración de los hormigones de prueba no contempla el uso de fibra estructural. Por esta razón, la resistencia a la flexotracción de las probetas prismáticas ensayadas en laboratorio debería ser, en teoría, inferior a la resistencia a la flexotracción del hormigón con fibra utilizado en la obra, pues la fibra contribuye a aumentar dicha resistencia.

5.8.2. Resultados

La curva de resistencias a compresión cilíndrica y flexotracción de las probetas ensayadas, en función del tiempo, se muestra en la Figura 5-21. Los valores asociados a la figura mencionada se resumen en la Tabla 5-4.

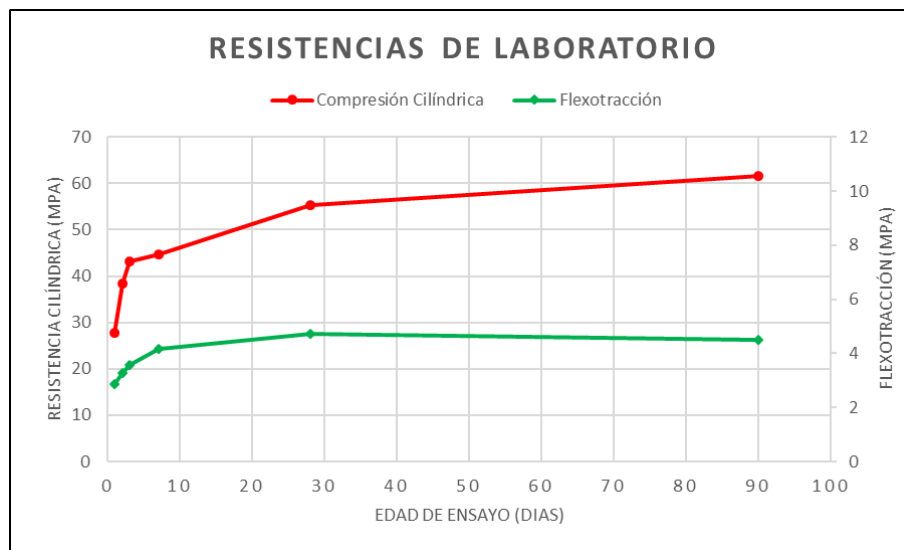


Figura 5-21: Ensayos de Hormigón en Laboratorio – Compresión Cilíndrica y Flexotracción.

Tabla 5-4.- Ensayos de Laboratorio - Resistencia Compresión y Flexotracción.

Día	Compresión Cilíndrica Promedio	Flexotracción Promedio	R. Cil / R. Flex
1	27,8	2,9	9,7
2	38,3	3,3	11,7
3	43,1	3,6	12,1
7	44,6	4,2	10,7
28	55,4	4,7	11,7
90	61,5	4,5	13,7

A partir de la información mostrada anteriormente se puede observar que la resistencia a la compresión del hormigón presenta un crecimiento a lo largo del tiempo, mientras que la resistencia a la flexotracción crece en menor proporción entre los días 1 y 28, y presenta una disminución entre el día 28 y 90. Se observa, además, que el factor que relaciona la resistencia a la compresión con la flexotracción es elevado en comparación a los factores por defecto de OptiPave2 (7,4 y 8,5 para compresión cilíndrica y cúbica respectivamente)

Finalmente, la resistencia a la flexotracción alcanzada a 28 días es de 4,7 MPa, En base a este hecho se puede afirmar que es probable que un hormigón suministrado en el área alta de la DET, de resistencia especificada a la compresión cúbica de 50 MPa, alcance una resistencia a la flexotracción cercana a 5 MPa, si se añade fibra estructural a la mezcla y si las condiciones de elaboración del hormigón en el área alta de la DET son similares a las condiciones de elaboración en laboratorio.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE COSTOS

6.1. Introducción

En este capítulo se muestra un resumen de los costos asociados a los distintos diseños de pavimentos de asfalto y hormigón presentados en los capítulos 4 y 5.

Para el diseño de pavimentos nuevos en la pista de prueba se muestra la comparación de los costos iniciales de tres alternativas de pavimento: una alternativa de pavimento de hormigón en losas cortas (Sección 4.4), una alternativa de pavimento de hormigón tradicional diseñado con el método descrito en el MC-V3 de 2017 (sección 4.5), y una alternativa de pavimento de asfalto, diseñada mediante la MEPDG (Sección 4.8). Para las alternativas de hormigón se ha considerado el precio de colocación de la pavimentación ejecutada en la pista de prueba

Para las alternativas de mantenimiento en la pista principal, se han considerado las alternativas presentadas en las secciones 4.9 a 4.12 del capítulo 4 de este trabajo, las cuales consisten principalmente en recapados y reconstrucciones en asfalto y hormigón. Para cada una de estas alternativas se ha determinado el costo inicial y los costos futuros de mantenimiento. Estos últimos fueron estimados en base a información estadística de variaciones históricas del Índice de Precios al Consumidor (IPC) e Índice de Precios al Productor (IPP), disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Los periodos de mantenimiento adoptados para las alternativas de asfalto y hormigón en losas cortas (recapados y reconstrucciones), se basan respectivamente en los resultados de predicción de deterioros de los softwares de diseño de pavimentos de la MEPDG y OptiPave2. Para la reconstrucción de pavimento tradicional diseñado con el método AASHTO 98, los periodos de mantención se han estimado en base a la pérdida de serviciabilidad asociada a la acumulación anual de EE, la cual fue estimada con dicho método de diseño.

Los costos del ciclo de vida para las alternativas de recapados en la pista principal se presentan en términos de Valor Presente Neto (VPN) y Costo Anual Equivalente (CAE), a objeto de realizar un análisis comparativo entre las alternativas.

La estimación de costos de actividades y volúmenes de obra de cada alternativa de pavimento, se realiza en base a precios de materiales, mano de obra y maquinarias de aquellas empresas contratistas que participaron prestando sus servicios durante la pavimentación en la pista de prueba, presentada en el Capítulo 5 de este trabajo.

Finalmente, al final de este capítulo, se presenta un análisis comparativo de los tiempos de ejecución de actividades involucradas para reconstrucciones de pavimentos de asfalto y de hormigón con losas cortas.

6.2. Costos Iniciales Diseños en Pista de Prueba

6.2.1. Diseños Analizados

Los diseños de pavimento considerados en la comparación de costos de construcción iniciales se describen a continuación:

- **Diseño 1:** Pavimento de Asfalto diseñado con la MEPDG (Sección 4.8, capítulo 4).
- **Diseño 2:** Pavimento de Hormigón en losas cortas construido en el km 41, con hormigón grado H50, cuyo diseño y costos fueron presentados en el Capítulo 5 (sección 5.2).
- **Diseño 3:** Pavimento de Hormigón con losas cortas utilizando hormigón grado HF 5,0 a 28 días, con fibra estructural sintética de polipropileno. Este diseño fue presentado en la sección 4.4 del capítulo 4 de este trabajo.
- **Diseño 4:** Pavimento de Hormigón tradicional diseñado con el Método descrito en MC-V3 de 2017, basado en el método AASHTO de 1998, cuyo diseño se presenta en la sección 4.5 del capítulo 4. Considera losas de 3,5 m de longitud de hormigón HF 5.0 (sin fibra), barras de traspaso de carga en las juntas y berma de pista ensanchada.

Para el cálculo de costos, se consideró la pavimentación de un tramo de 100 m de largo dentro de la pista de prueba. En la Tabla 6-1 se muestra un resumen con los espesores de las capas para cada uno de los diseños señalados.

Tabla 6-1.- Análisis de Costos – Resumen Dimensiones de Diseños en Pista de Prueba.

Diseño	Ancho Pista (m)	Espesores (mm)			
		Subbase	Base	Binder (Asf)	Rodadura (Ho/Asf)
Diseño 1	4	150	150	150	100
Diseño 2	4	150	-	-	160
Diseño 3	4,3	150	-	-	180
Diseño 4	4,3	150	-	-	190

6.2.2. Itemizado Alternativas

En forma previa a la presentación de los costos asociados a los diseños de pavimento realizados, se tienen las siguientes consideraciones:

- Para los diseños con hormigones HF 5,0 (Diseños 2, 3 y 4), se ha adoptado, para efectos de costos, un hormigón de resistencia a compresión cúbica de 50 MPa. Lo anterior se debe a que los hormigones suministrados en el área alta de la DET son especificados únicamente a la compresión cúbica.
- Los precios de hormigones y adiciones de fibra sintética se cobran en UF. El valor en pesos se calculó según el valor de la UF correspondiente al día 5 de diciembre de 2017, igual a \$26.757,79. El precio por metro cúbico de hormigón considera el suministro en obra, mediante camiones mixer (3,44 UF/m³).
- Para pavimentos de losas cortas se requieren subbases de mayor calidad, limitando el contenido de material fino, por lo que para los diseños de pavimentos nuevos de hormigón con losas cortas se ha aumentado en un 50% el precio por metro cúbico de subbase granular respecto del precio por metro cubico de subbases en la DET a diciembre de 2017.
- Las partidas de materiales correspondientes a mezclas asfálticas, riego de liga e imprimación, consideran precios unitarios de contratos de asfalto vigentes dentro de la DET.

- Los precios unitarios para las partidas correspondientes a capas granulares, excavaciones, cortes de pavimento, retiro de pavimentos existentes y preparación de la subrasante, incluyen tarifas de equipos a diciembre de 2017 dentro de la DET.
- Para los diseños en hormigón, el precio unitario de colocación se estimó en base a facturación de la empresa contratista encargada de ejecutar la obra.
- Información relativa al detalle de costos de cada partida, rendimientos, etc. se muestran en el Anexo D.

En las Tablas 6-2 a 6-5 se muestra el itemizado de costos asociados de los diseños de pavimento presentados en este trabajo.

Tabla 6-2.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 1: Diseño en Asfalto con la MEPDG.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales (Incluye Colocación)</i>				
Mezcla Asfáltica (Rodadura)	m3c	40	\$139.992	\$5.599.680
Mezcla Asfáltica (Binder)	m3c	60	\$126.731	\$7.603.860
Riego de Liga	m2	400	\$452	\$180.800
Base Granular	m3	60	\$32.828	\$1.969.668
Subbase Granular	m3	60	\$32.828	\$1.969.668
Riego de Imprimación	m2	400	\$452	\$180.800
Total Materiales				17.504.475
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento	ml	208	\$1.694	\$352.299
Retiro Pavimento Existente	m2	400	\$1.794	\$717.733
Excavación	m3	120	\$4.689	\$562.699
Preparación de la Subrasante	m2	400	\$3.914	\$1.565.535
Total Obras Complementarias				\$3.198.266
COSTO TOTAL				\$20.702.741
COSTO TOTAL/m²				\$51.757

Tabla 6-3.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 2: Losas Cortas H50 Ejecutado.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales</i>				
H50 puesto en Obra	m3	58	\$92.047	\$5.338.714
Adición Fibra (2,5kg/m3)	m3	58	\$13.887	\$805.463
Total Materiales				6.144.177
<i>Pavimentación</i>				
Ejecución Obra de Pavimentación	m3	58	\$62.950	\$3.651.100
Total Pavimentación				\$3.651.100
<i>Valores Proforma</i>				
Pago Patente por uso Losas Cortas	m2	400	\$937	\$374.609

Total Valores Proforma				\$374.609
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento de Asfalto	ml	208	\$1.651	\$343.482
Retiro Pavimento Existente	m2	400	\$1.319	\$527.468
Preparación de la Subrasante	m2	400	\$3.543	\$1.417.304
Cepillado de la Superficie	m2	400	\$12.500	\$5.000.000
Total Obras Complementarias				\$7.288.254
COSTO TOTAL				\$17.083.531
COSTO TOTAL/m²				\$42.709

Tabla 6-4.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 3: Losas Cortas HF5 Proyectado.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales</i>				
H50 puesto en Obra	m3	77	\$92.047	\$7.124.422
Adición Fibra (2,5kg/m3)	m3	77	\$13.887	\$1.074.876
Subbase Granular	m3	65	\$54.284	\$3.501.305
Geotextil	m2	430	\$1.461	\$628.231
Total Materiales				12.328.835
<i>Pavimentación</i>				
Colocación en Obra	m3	77	\$62.950	\$4.872.330
Total Pavimentación				\$4.872.330
<i>Valores Proforma</i>				
Pago Patente por uso Losas Cortas	m2	430	\$1.070	\$460.234
Total Valores Proforma				\$460.234
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento	ml	208,6	\$1.689	\$352.299
Retiro Pavimento Existente	m2	430	\$1.669	\$717.733
Excavación	m3	65	\$8.724	\$562.699
Preparación de la Subrasante	m2	430	\$3.641	\$1.565.535
Total Obras Complementarias				\$3.198.266
COSTO TOTAL				\$20.399.431
COSTO TOTAL/m²				\$47.441

Tabla 6-5.- Costos Iniciales Pista de Prueba – Diseño 5: Diseño MC 2017 Hormigón HF 5.0.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales</i>				
H50 puesto en Obra	m3	82	\$92.047	\$7.520.223
Subbase Granular	m3	65	\$44.864	\$2.893.715

Sello de Juntas	ml	124,7	\$3.093	\$385.639
Barras de Traspaso Diam 32 mm	ml	180,32	\$9.576	\$1.726.764
Total Materiales				12.526.341
<i>Pavimentación</i>				
Colocación en Obra	m3	82	\$62.950	\$5.143.015
Total Pavimentación				\$5.143.015
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento	ml	208,6	\$1.689	\$352.299
Retiro Pavimento Existente	m2	430	\$1.669	\$717.733
Excavación	m3	65	\$8.724	\$562.699
Preparación de la Subrasante	m2	430	\$3.641	\$1.565.535
Total Obras Complementarias				\$3.198.266
COSTO TOTAL				\$20.867.622
COSTO TOTAL/m²				\$48.529

6.2.3. Resumen de Costos Iniciales de Construcción

En la Figura 6-1 se muestra gráficamente un resumen de los costos totales de cada diseño de pavimento presentado.

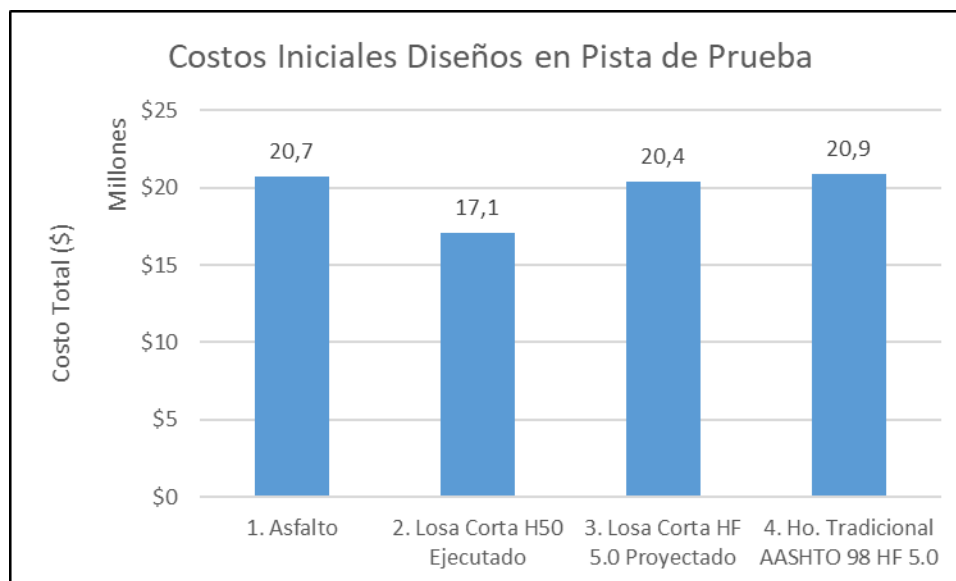


Figura 6-1: Pista de Prueba km 41 – Resumen Costos Iniciales Alternativas.

A partir de los costos totales mostrados en la Figura 6-1, en la Tabla 6-6 se muestran los porcentajes de ahorro de las alternativas de pavimentos de hormigón.

Tabla 6-6.- Ahorro de Costos Iniciales entre Alternativas de Pavimentos en Pista de Prueba.

Ahorro de Alternativa	Respecto de Alternativa	Ahorro
Pav. Losas Cortas Ejecutado	Pavimento Asfalto Nuevo	17,5%
Pav. Losas Cortas Proyectado	Pavimento Asfalto Nuevo	1,5%
Pavimento Asfalto Nuevo	Pav. Hormigón AASHTO 98	0,8%
Pav. Losas Cortas Proyectado	Pav. Hormigón AASHTO 98	2,2%

Con respecto al ahorro de los diseños de hormigón con losas cortas respecto del diseño de asfalto mostrado en la Tabla 6-6, se observa una diferencia considerable entre el ahorro del diseño de hormigón proyectado (1,5%) y el ahorro del diseño de hormigón ejecutado (17,5%), siendo este último mucho mayor, pese a incluir una actividad de cepillado del pavimento en el costo inicial. Esta diferencia se debe a las siguientes causas.

- Durante la ejecución de la obra se colocaron sólo 58 de los 64 m³ de hormigón contemplados para la obra, por lo que el espesor a hormigonar era inferior a los 16 cm de diseño.
- Durante la ejecución del proyecto no se realizó el reemplazo del material granular de la subbase.
- El ancho de pavimentación del diseño de hormigón en losas cortas proyectado es de 4,3 m, en comparación al ancho de pista de 4 m en la obra.

En la tabla anterior se observa, además, que la solución de asfalto es un 0,8% más barata que un pavimento de hormigón diseñado con el método del MC-V3 de 2017 (AASHTO 98).

Con respecto a la diferencia de costos entre el diseño de pavimento de hormigón tradicional (método MC-V3 de 2017) y el diseño de pavimento de hormigón con losas cortas proyectado, este último resulta ser sólo un 2,2% más barato. Es altamente probable que este porcentaje sería aún más pequeño si el pavimento de hormigón tradicional hubiera sido diseñado con la MEPDG calibrada para Chile, pues se hubiera obtenido un espesor de pavimento optimizado y no sobredimensionado como los diseños de pavimentos rígidos que ofrece el método de diseño AASHTO de 1998 y versiones anteriores. Sin embargo, también se debe tener en cuenta que el diseño de hormigón con losas cortas proyectado se realizó considerando un clima más extremo que el que efectivamente existe en la zona, con mayor porcentaje de alabeo de losas al año y, por ende, mayores índices de deterioro. Considerando este hecho, es posible que el espesor requerido por dicha alternativa sea menor al considerado, aumentando el porcentaje de ahorro con respecto a un pavimento tradicional con AASHTO 98.

6.3. Costos Iniciales Alternativas de Rehabilitación en Pista Principal

En esta sección se presenta una estimación de los costos iniciales de las alternativas de rehabilitación y reconstrucción de pavimentos en la pista principal del km 41 de la CEC (en dirección hacia Sewell), cuyos diseños estructurales fueron presentados en las secciones 4.9 a 4.12 del Capítulo 4 de este trabajo, las cuales se resumen a continuación:

- Alternativa 1: Fresado y recapado asfáltico, e = 100 mm (Sección 4.9, Figura 4-15).

- Alternativa 2: Fresado y recapado asfáltico, e = 150 mm (Sección 4.9, Figura 4-15).
- Alternativa 3: Fresado y recapado asfáltico, e = 180 mm (Sección 4.9, Figura 4-16).
- Alternativa 4: Reconstrucción en asfalto, e = 280 mm (Sección 4.9, Figura 4-16).
- Alternativa 5: Recapado no adherido con losas cortas de hormigón con fibra sintética, e = 210 mm (Sección 4.10, Figura 4-19).
- Alternativa 6: Reconstrucción con losas cortas de hormigón con fibra sintética, e = 240 mm (Sección 4.11, Figura 4-23).
- Alternativa 7: Reconstrucción con pavimento de hormigón tradicional (AASHTO 98), e = 240 mm, con berma de pista ensanchada (Sección 4.12, Figura 4-27).

6.3.1. Resumen de Costos Iniciales

Para la estimación de costos de las alternativas de rehabilitación en la pista principal, se tuvieron en cuenta las mismas consideraciones señaladas en la sección 6.2.2 para los diseños en la pista de prueba, salvo algunas modificaciones señaladas a continuación:

- El precio de colocación del hormigón para las alternativas 5, 6 y 7, el cual considera que la pavimentación se realiza con tren pavimentador. El precio unitario para la partida “Colocación Pavimentadora” corresponde al precio de pavimentación en la obra Repavimentación Ruta 60-Ch Camino La Pólvara (2016), reajustado según la variación del IPC entre junio de 2016 y diciembre de 2017 (3,3%), y aumentado en un 100%. El precio unitario estimado no incluye el costo del hormigón.
- En la obra de repavimentación del Camino La Pólvara, el hormigón fue transportado al frente de pavimentación mediante camiones tolva y esparcido con excavadoras (Del Río & Covarrubias V., 2016). En base a este antecedente, se considera que el costo asociado al transporte del hormigón desde la planta hasta la obra corre por parte de la empresa contratista y está incluido implícitamente en la partida “Colocación Pavimentadora”. Por esta razón se ha considerado el precio de suministro del hormigón en planta (2,89 UF).

En las Tablas 6-7 a 6-13 se muestran respectivamente los costos de las alternativas 1 a 7. Estos fueron calculados para una longitud de pista igual a 1 km. El ancho considerado para los recapados de asfalto es de 3,5 m. La reconstrucción en asfalto incluye el reemplazo de la pista y la berma, considerando un ancho total de 4,3 m. Las alternativas de recapado y reconstrucciones de hormigón (alternativas 5, 6 y 7) incluyen la construcción de la berma, por lo que el ancho de pavimentación de estas alternativas es de 4,3 m.

Tabla 6-7.- Costos Rehabilitación Alternativa 1 – Recapado Asfalto e = 100 mm.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales (Incluye Colocación)</i>				
Mezcla Asfáltica (Rodadura)	m3c	350	\$139.992	\$48.997.200
Riego de Liga	m2	3500	\$452	\$1.582.000
Total Materiales				50.579.200
<i>Obras Complementarias</i>				
Fresado Pav. Asf. (e = 5-10 cm)	m2	3500	\$1.681	\$5.883.500

Total Obras Complementarias	\$5.883.500
COSTO TOTAL	\$56.462.700
COSTO TOTAL/m²	\$16.132

Tabla 6-8.- Costos Rehabilitación Alternativa 2 – Recapado Asfalto e = 150 mm.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales (Incluye Colocación)</i>				
Mezcla Asfáltica (Rodadura)	m3c	525	\$139.992	\$73.495.800
Riego de Liga	m2	3500	\$452	\$1.582.000
Total Materiales				75.077.800
<i>Obras Complementarias</i>				
Fresado Pav. Asf. (e = 5-10 cm)	m2	7000	\$1.681	\$11.767.000
Total Obras Complementarias				\$11.767.000
COSTO TOTAL				\$86.844.800
COSTO TOTAL/m²				\$24.813

Tabla 6-9.- Costos Rehabilitación Alternativa 3 – Recapado Asfalto e = 180 mm.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales (Incluye Colocación)</i>				
Mezcla Asfáltica (Rodadura)	m3c	630	\$139.992	\$88.194.960
Riego de Liga	m2	3500	\$452	\$1.582.000
Total Materiales				89.776.960
<i>Obras Complementarias</i>				
Fresado Pav. Asf. (e = 5-10 cm)	m2	7000	\$1.681	\$11.767.000
Total Obras Complementarias				\$11.767.000
COSTO TOTAL				\$101.543.960
COSTO TOTAL/m²				\$29.013

Tabla 6-10.- Costos Rehabilitación Alternativa 4 – Reconstrucción Asfalto.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales (Incluye Colocación)</i>				
Mezcla Asfáltica (Rodadura)	m3c	430	\$139.992	\$60.196.560
Mezcla Asfáltica (Binder)	m3c	774	\$126.731	\$98.089.794
Riego de Liga	m2	4300	\$452	\$1.943.600
Base Granular	m3	860	\$26.256	\$22.580.268
Subbase Granular	m3	860	\$26.256	\$22.580.268
Riego de Imprimación	m2	4300	\$452	\$1.943.600

Total Materiales				207.334.090
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento	ml	2008,6	\$831	\$1.669.101
Retiro Pavimento Existente	m2	4300	\$2.640	\$11.353.017
Excavación	m3	1720	\$3.860	\$6.639.155
Preparación de la Subrasante	m2	4300	\$937	\$4.031.109
Total Obras Complementarias				\$23.692.382
COSTO TOTAL				\$231.026.472
COSTO TOTAL/m²				\$53.727

Tabla 6-11.- Costos Rehabilitación Alternativa 5 – Recapado Losas Cortas No Adherido.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales</i>				
H50 puesto en Planta	m3	903	\$77.330	\$69.829.002
Adición Fibra (2,5kg/m3)	m3	903	\$13.887	\$12.540.226
Geotextil	m2	4300	\$599	\$2.576.462
Total Materiales				\$84.945.689
<i>Pavimentación</i>				
Colocación Pavimentadora	m3	903	\$114.808	\$103.671.624
Total Pavimentación				\$103.671.624
<i>Valores Proforma</i>				
Patente por uso Losas Cortas	m2	4300	\$1.070	\$4.602.340
Total Valores Proforma				\$4.602.340
<i>Obras Complementarias</i>				
Fresado Pav. Asf. (e = 5-10 cm)	m2	8600	\$1.681	\$14.456.600
Total Obras Complementarias				\$14.456.600
COSTO TOTAL				\$207.676.253
COSTO TOTAL/m²				\$48.297

Tabla 6-12.- Costos Rehabilitación Alternativa 6 – Reconstrucción Ho. con Losas Cortas.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales</i>				
H50 puesto en Planta	m3	1032	\$77.330	\$79.804.574
Adición Fibra (2,5kg/m3)	m3	1032	\$13.887	\$14.331.686
Subbase Granular	m3	860	\$35.676	\$30.681.468
Geotextil	m2	4300	\$599	\$2.576.462
Total Materiales				127.394.190
<i>Pavimentación</i>				

Colocación Pavimentadora	m3	1032	\$114.808	\$118.481.856
Total Pavimentación				\$118.481.856
<i>Valores Proforma</i>				
Patente por uso Losas Cortas	m2	4300	\$1.070	\$4.602.340
Total Valores Proforma				\$4.602.340
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento	ml	2008,6	\$831	\$1.669.101
Retiro Pavimento Existente	m2	4300	\$2.640	\$11.353.017
Excavación	m3	860	\$6.261	\$5.384.155
Preparación de la Subrasante	m2	4300	\$937	\$4.031.109
Total Obras Complementarias				\$22.437.382
COSTO TOTAL				\$272.915.768
COSTO TOTAL/m²				\$63.469

Tabla 6-13.- Costos Rehabilitación Alternativa 7 – Reconstrucción Ho. Diseño AASHTO 98.

Partida	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	TOTAL (\$)
<i>Materiales</i>				
H50 puesto en Planta	m3	1032	\$77.330	\$79.804.574
Subbase Granular	m3	860	\$26.256	\$22.580.268
Sello de Juntas	ml	1229,8	\$2.720	\$3.345.076
Barras de Traspaso Diam. 32 mm	ml	1835,4	\$8.012	\$14.704.599
Total Materiales				\$120.434.516
<i>Pavimentación</i>				
Colocación Pavimentadora	m3	1032	\$114.808	\$118.481.856
Total Pavimentación				\$118.481.856
<i>Obras Complementarias</i>				
Corte Pavimento	ml	2008,6	\$831	\$1.669.101
Retiro Pavimento Existente	m2	4300	\$2.640	\$11.353.017
Excavación	m3	860	\$6.261	\$5.384.155
Preparación de la Subrasante	m2	4300	\$937	\$4.031.109
Total Obras Complementarias				\$22.437.382
COSTO TOTAL				\$261.353.754
COSTO TOTAL/m²				\$60.780

Los costos totales de construcción para cada una de las alternativas anteriores se muestran gráficamente en la Figura 6-2.

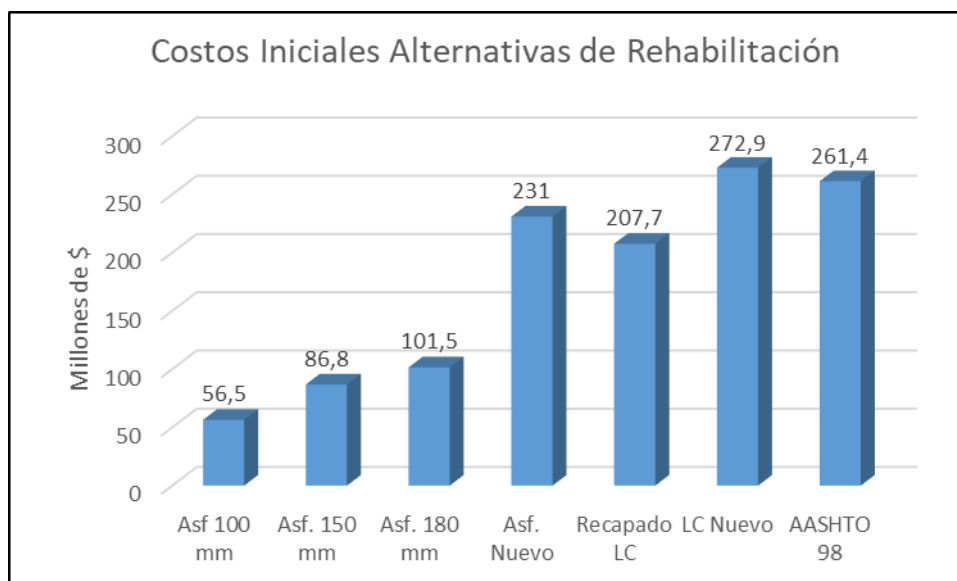


Figura 6-2: Rehabilitaciones Pista Principal - Costos Iniciales.

6.4. Costos del Ciclo de Vida de las Alternativas en la Pista Principal

Una vez calculados los costos iniciales de construcción (Figura 6-2), se requiere estimar los costos futuros de mantenimiento para las alternativas de rehabilitación en la pista principal, en términos de precios actuales, y así estimar los costos del ciclo de vida para estas alternativas. Para tal fin, se ha utilizado información histórica relativa al Índice de Precios al Consumidor (IPC).

Para el caso especial de partidas relacionadas con materiales asfálticos (mezclas asfálticas y riegos de liga), se ha utilizado la variación histórica del Índice de Precios al Productor (IPP) para mezclas bituminosas.

6.4.1. Proyección del Índice de Precios al Consumidor (IPC)

Para estimar la evolución del nivel de inflación de precios a futuro, se ha trabajado con los valores mensuales del IPC entre enero de 2010 y junio de 2018, datos disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Los valores mensuales del IPC entre los años 2010 y 2013 poseen un valor IPC base año 2009 (IPC=100), mientras que los valores mensuales entre 2014 hasta fecha, tienen un IPC base en el año 2013.

Para superar esta dificultad, se procedió a empalmar la serie de valores IPC base 2009 = 100 a valores IPC base 2013 = 100, empleando el siguiente factor de enlace (ec. 6.1):

$$\text{Factor de Enlace} = \frac{IPC_{base\ 2013}^{diciembre\ 2013}}{IPC_{base\ 2009}^{diciembre\ 2013}} = \frac{100}{111,88} = 0,893 \quad (6.1)$$

Una vez realizado el empalme, se procedió a representar de manera gráfica la serie de valores del IPC para el periodo mencionado (Figura 6-3), y se obtuvo la siguiente regresión lineal (ec. 6.2):

$$IPC_{mes\ i} = 0,30833 * i + 87,61465 \quad (6.2)$$

En la ecuación 6.2, se considera el mes $i = 1$ como el mes de enero del año 2010. Finalmente, mediante dicha ecuación se calculó el valor del IPC en el mes de junio para un periodo de 40 años comenzando en el año 2018 y se calcularon los factores de reajuste respectivos, dividiendo cada valor del IPC obtenido, por el valor del IPC a junio del año 2017 (año 0), igual a 115,18.

A pesar de que hay información disponible del IPC de años anteriores al año 2010, el INE no recomienda el empalme de estas series a valores base del año 2009 y más recientes, debido a que a contar de dicho año el cálculo de estos indicadores dejó de considerar sólo a la región metropolitana y se expandió a todo el territorio nacional.

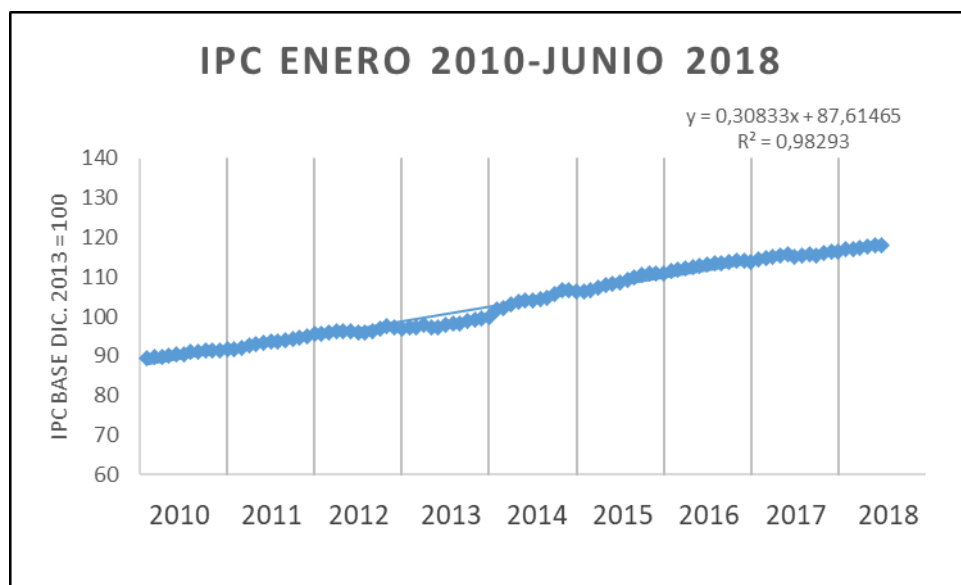


Figura 6-3: Serie de Valores Mensuales IPC Periodo 2010 – 2018.

6.4.2. Proyección del Índice de Precios al Productor para Mezclas Bituminosas (IPP)

Para la estimación de la inflación de los precios de materiales asfálticos, se dispone de la serie de valores mensuales del Índice de Precios al Productor (IPP) de mezclas bituminosas entre diciembre del año 2016 y marzo del año 2018, obtenidas desde el sitio web de la Dirección del Planeamiento (DIRPLAN) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Cabe destacar que este indicador reemplazó al Pitch Asfáltico, que fue discontinuado en diciembre de 2016. Al igual que para los valores del IPC, la DIRPLAN establece un método para calcular el valor Pitch Asfáltico en base al nuevo valor del IPP de mezclas bituminosas para periodos

posteriores. Sin embargo, en este análisis no será utilizado debido a la gran variabilidad que presenta este indicador discontinuado (Figura 6-4).

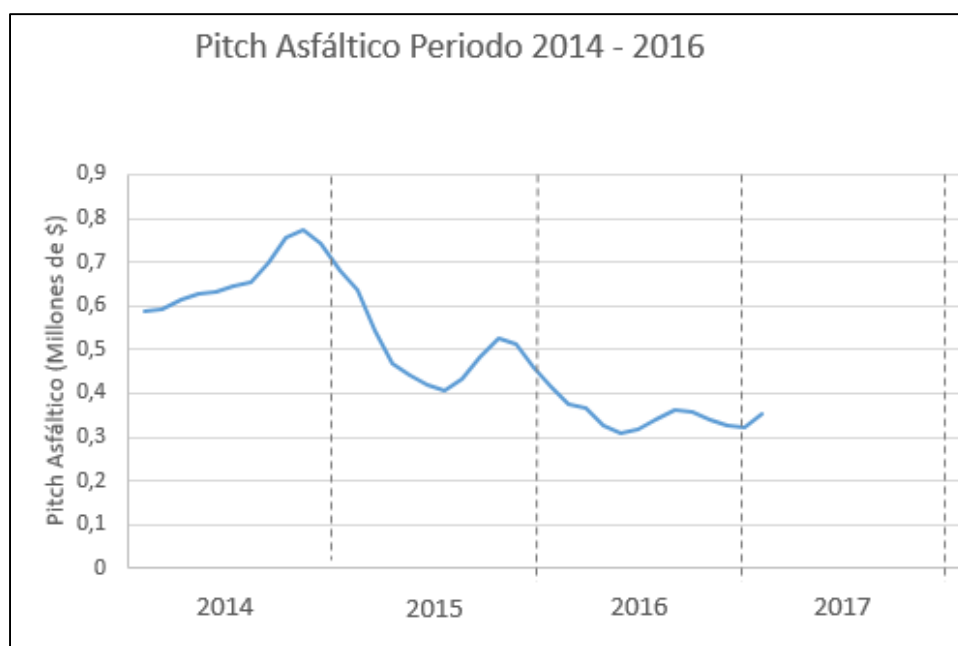


Figura 6-4: Pitch Asfáltico Periodo 2014 – 2016.

En la Figura 6-5 se muestra la serie de valores del IPP de mezclas bituminosas entre diciembre de 2016 y marzo de 2018. En la misma Figura se muestra, además, distintas proyecciones lineales del IPP, considerando un crecimiento mensual promedio de los valores de la serie, calculado según diferentes criterios:

- Criterio 1: Promedio de las variaciones mensuales del IPP entre meses consecutivos.
- Criterio 2: Variación de 3 meses consecutivos (media móvil promedio / 3).
- Criterio 3: Variación de 4 meses consecutivos (media móvil promedio / 4).
- Criterio 4: Variación de 6 meses consecutivos (media móvil promedio / 6).

Adicionalmente, en la Figura 6-5, se muestra la proyección lineal promedio de los 4 casos presentados anteriormente (recta verde). Se observa que esta proyección se asemeja a la proyección obtenida según el Criterio 2 (recta ploma), por lo que se utilizará esta última proyección para el reajuste de costos de mezclas asfálticas en los recapados futuros de asfalto,

La tasa de crecimiento mensual promedio de la proyección lineal escogida es de aproximadamente 0,25% mensual, lo que equivale a un 3% anual. Este valor es conservador si se compara con la variación real del IPP entre diciembre de 2016 y marzo de 2018, por lo que proporciona ciertas ventajas para las soluciones asfálticas con respecto a la solución de recado de hormigón con losas cortas.

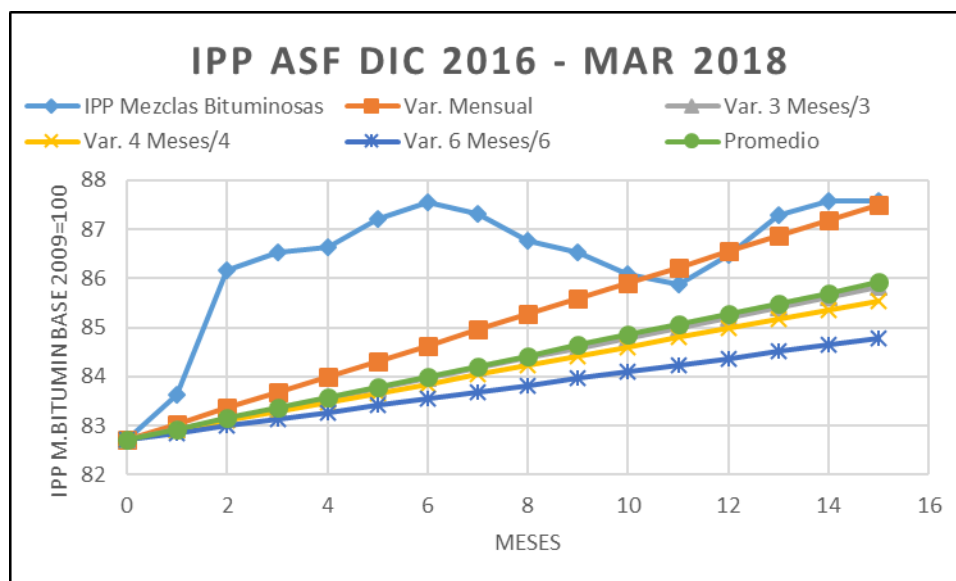


Figura 6-5: Variación IPP Mezclas Bituminosas Diciembre 2016 – Marzo 2018.

6.4.3. Costos Ciclo de Vida de Alternativas en Pista Principal

Considerando el resumen de costos iniciales de las alternativas de pavimentación en la pista principal (sección 6.3.1) y las proyecciones de los índices económicos IPC e IPP (secciones 6.4.1 y 6.4.2 respectivamente), se realizó una estimación acerca de los costos del ciclo de vida de las alternativas 1 a 7 señaladas al inicio de la sección 6.3, considerando un periodo de análisis de 40 años. Las fechas de intervención para cada alternativa de pavimento corresponden a las fechas estimadas en el Capítulo 4:

- Alternativas de Asfalto: Sección 4.9.3 (Tabla 4-15).
- Recapado no Adherido de Hormigón con Losas Cortas: Sección 4.10.3.
- Reconstrucción en Hormigón con Losas Cortas: Sección 4.11.3.
- Reconstrucción Pavimento Hormigón Tradicional AASHTO 98: Sección 4.12.3.

En las Figuras 6-6 y 6-7 se muestra gráficamente la evolución de los costos futuros de mantenimiento para las alternativas de recapados y para pavimentos nuevos respectivamente, en términos de costos actuales (a diciembre de 2017) y considerando los costos iniciales de construcción. Los costos del recapado de hormigón con losas cortas se han incluido intencionalmente en el gráfico de costos de pavimentos nuevos, a fin de realizar una comparación visual de costos entre estas alternativas.

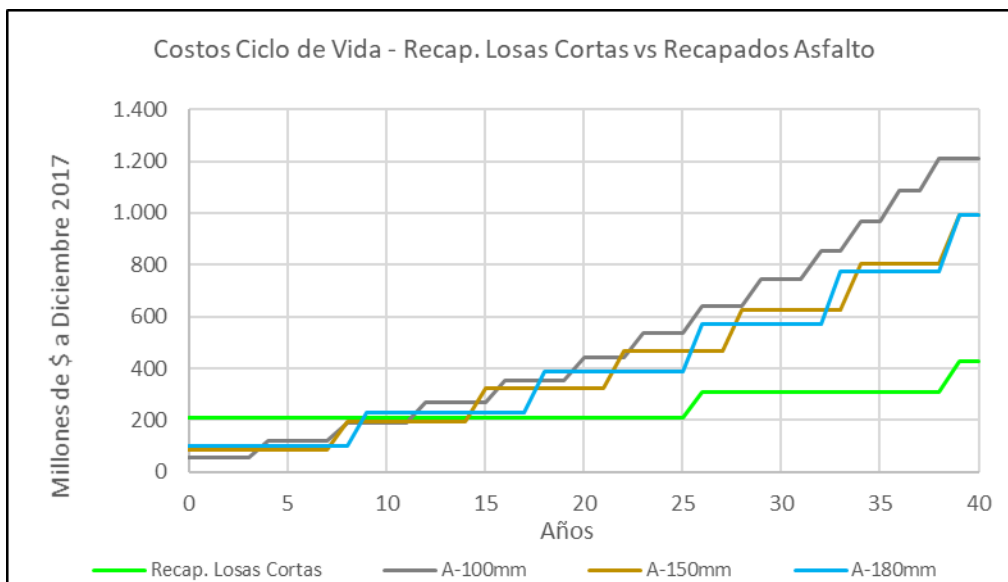


Figura 6-6: Costos Ciclo de Vida – Recapado de Losas Cortas vs Recapados Asfalto.

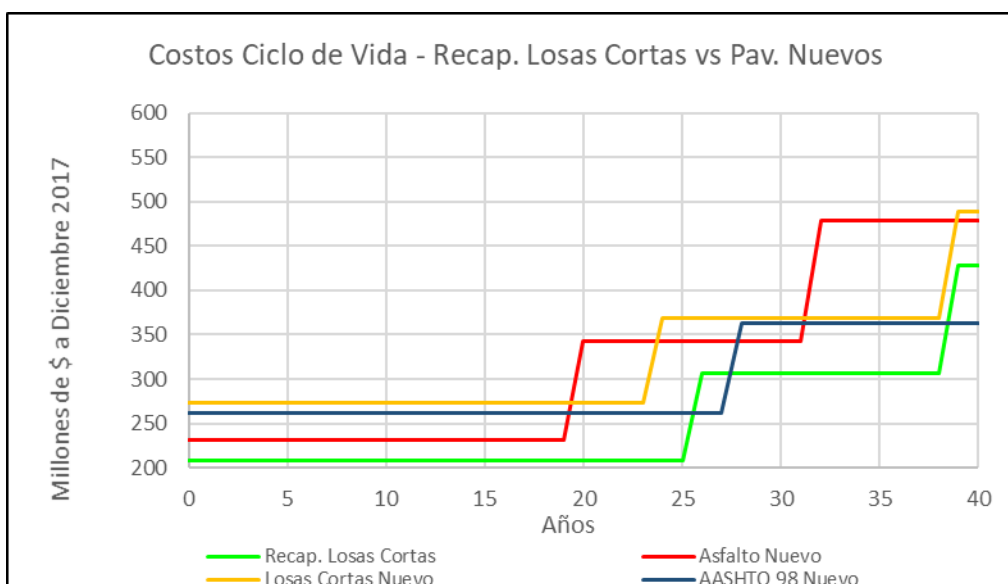


Figura 6-7: Costos Ciclo de Vida – Recapado de Losas Cortas vs Pavimentos Nuevos.

En la Tabla 6-14 se muestran los costos al año cero y al año 40 (final del periodo de análisis) de las alternativas mostradas en las Figuras 6-6 y 6-7, los cuales corresponden respectivamente a los costos iniciales de construcción y a los costos del ciclo de vida de estas alternativas en términos de Valor Presente Neto (VPN). Adicionalmente se presenta el Costo Anual Equivalente (CAE) asociado para cada alternativa. Estos costos se muestran gráficamente en las Figuras 6-8 y 6-9.

Tabla 6-14.- Resumen Costos Ciclo de Vida Rehabilitaciones en Pista Principal.

Alternativa	Costos Relevantes (en millones de pesos)		
	Costo Inicial	VPN año 40	CAE Año 40
1. Recapado Asfalto e = 100 mm	56,5	1209	30,2
2. Recapado Asfalto e = 150 mm	86,8	992,5	24,8
3. Recapado Asfalto e = 180 mm	101,5	993,7	24,8
4. Reconstrucción Asfalto	231	478,9	12
5. Recapado No Adherido Losas Cortas	207,7	427,6	10,7
6. Reconstrucción Losas Cortas.	272,9	489	12
7. Reconstrucción Ho. AASHTO 98	261,4	363,5	9,1

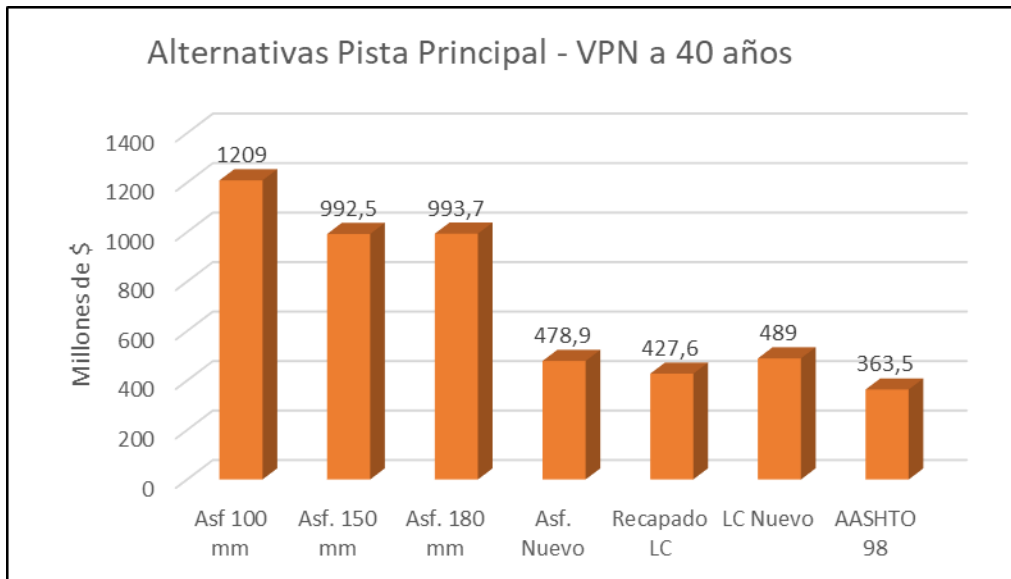


Figura 6-8: Alternativas de Pavimentación en Pista Principal – VPN en 40 Años.

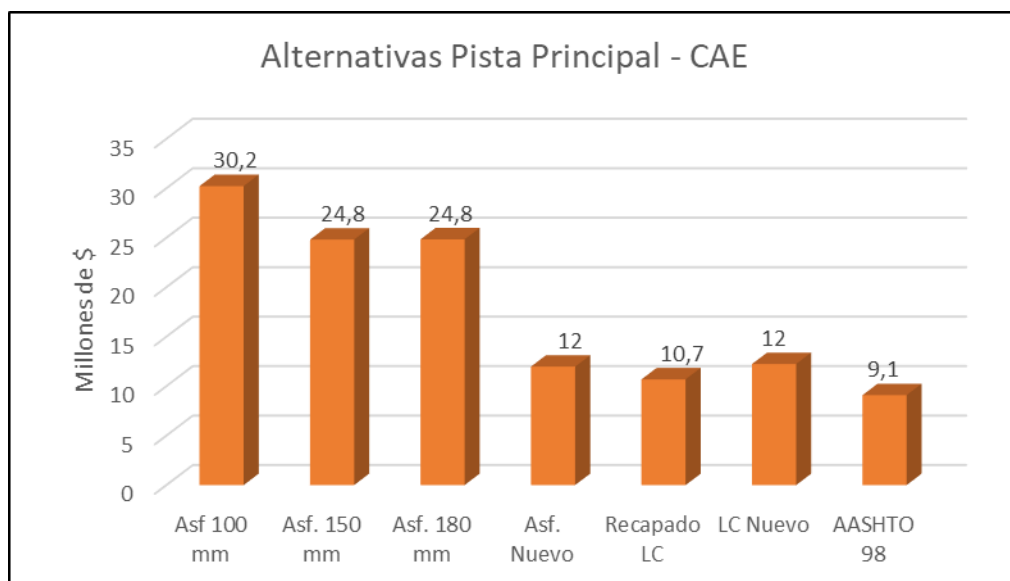


Figura 6-9: Alternativas de Pavimentación en Pista Principal – CAE en 40 años.

A partir de los resultados anteriormente obtenidos, en la Tabla 6-15 se muestra un resumen acerca de los porcentajes de ahorro relevantes entre alternativas de pavimentación de hormigón con losas cortas y de pavimentos asfálticos.

Tabla 6-15.- Costos en Pista Principal – Ahorro entre Alternativas de Pavimentación.

Costo	Ahorro de Alternativa	Respecto de Alternativa	Ahorro
Inicial	Recapado Losas Cortas	Reconstrucción Asfalto	10,1%
Ciclo de V.	Recapado Losas Cortas	Reconstrucción Asfalto	10,7%
Inicial	Reconstrucción Losas Cortas	Reconstrucción Asfalto	-18,1%
Ciclo de V.	Reconstrucción Losas Cortas	Reconstrucción Asfalto	-2,2%
Inicial	Recapado Losas Cortas	Recapado Asfalto 150 mm	56,9%
Ciclo de V.	Recapado Losas Cortas	Recapado Asfalto 150 mm	56,9%
Inicial	Recapado Losas Cortas	Reconstrucción Losas Cortas	23,9%
Ciclo de V.	Recapado Losas Cortas	Reconstrucción Losas Cortas	12,6%
Inicial	Reconstrucción Losas Cortas	Reconstrucción AASHTO 98	-4,4%
Ciclo de V.	Reconstrucción Losas Cortas	Reconstrucción AASHTO 98	-34,6%

En base a los porcentajes de ahorro de la Tabla 6-15, se puede observar que el costo inicial de un recapado de losas cortas de hormigón presenta un ahorro de 10,1% respecto del costo de una reconstrucción en asfalto. Al cabo de 40 años la situación es similar: el costo del recapado de losas cortas es un 10,7% más bajo que la reconstrucción completa de asfalto.

Por otro lado, una reconstrucción en losas cortas resulta ser cerca de un 18,1% más costosa que una reconstrucción en asfalto. Sin embargo, ambas alternativas presentan costos del ciclo de vida muy similares, con una diferencia de 2,2% a favor del asfalto.

Con respecto a los recapados de asfalto, el costo del ciclo de vida de un recapado de 150 mm de espesor presenta el costo más bajo al cabo de 40 años. Sin embargo, comparando el VPN de esta alternativa respecto del VPN de un recapado de losas cortas de hormigón, este último presenta un ahorro de 56,9% en 40 años.

Al comparar los costos iniciales entre pavimentos nuevos de hormigón tradicional y de losas cortas, el pavimento de hormigón tradicional presentó un ahorro de 4,4% en el costo inicial y de un 34,6% en el costo del ciclo de vida, pese a que a que ambas alternativas poseen el mismo espesor de losas. Esto se debe a varias razones. Por una parte, la confiabilidad adoptada en los diseños es relativamente baja (75%), lo cual favoreció a disminuir el espesor requerido del pavimento diseñado con AASHTO 98. La cantidad de EE de diseño en este método es altamente sensible al valor de confiabilidad adoptada, por lo que se dice que este método sobredimensiona el espesor requerido de las losas. Por esta razón, una comparación válida hubiera sido posible utilizando la MEPDG calibrada para Chile. Por otro lado, se tiene que en el diseño de losas cortas se utilizó una estación climática extrema, la cual castigó considerablemente el diseño. Otro factor que contribuyó a encarecer la alternativa de losas cortas corresponde al hecho de que se empleó una subbase granular un 50% más costosa a modo de reflejar la mayor calidad del material requerido en el diseño. Finalmente, la estimación del IRI para el pavimento de hormigón tradicional no posee ningún factor de confiabilidad. De haber aplicado alguno existe la posibilidad de haber requerido dos cepillados del pavimento en vez de sólo uno, lo que habría aumentado considerablemente el VPN al año 40. Además, no se puede predecir el agrietamiento de las losas durante el periodo de análisis, el cual podría ser mayor que en pavimentos de losas cortas debido al mayor alabeo que pueden experimentar en el tiempo.

6.4.4. Valor Residual

En este trabajo no se consideró la estimación del valor residual en el análisis de los costos del ciclo de vida de pavimentos debido a la falta de antecedentes al respecto para las losas cortas de hormigón. No obstante, en esta sección se realiza una estimación teórica acerca del valor de las capas de pavimento según su utilización al final del periodo de análisis (40 años), en términos de VPN. Se analizó el costo de las capas de las alternativas de reconstrucción de asfalto y hormigón con losas cortas (Alternativa 4 y Alternativa 6)

Para la solución de asfalto, se consideró una recuperación del 20% de la mezcla de las capas intermedia y de rodadura, para ser utilizadas en futuras pavimentaciones en asfalto.

Para el pavimento de hormigón con losas cortas, se consideró un 100% del reciclado de las losas de hormigón, considerando la reducción del espesor asociada a las dos actividades de cepillado contempladas durante el periodo de análisis (3 cm). El material reciclado se valorizó como subbase para un futuro pavimento de hormigón en la carretera.

Para la estimación del valor de las capas, se consideraron las proyecciones de los índices IPC e IPP de mezclas bituminosas (Secciones 6.4.1 y 6.4.2 respectivamente), para la valorización de subbases y capas asfálticas respectivamente. Los resultados se muestran en la Tabla 6-16.

Tabla 6-16.- Estimación Valor Residual – Costo Estimado de Capas de Pavimento.

Capa	m3	P.U. (40 años)	Valor Total
Asfalto Rodadura	86	\$308.262	\$26.510.565
Asfalto, Intermedia	154,8	\$279.062	\$43.198.745
Hormigón	903	\$43.087	\$38.907.633
Valor Total Capas Asfálticas			\$69.709.310
Valor Total Capas Hormigón			\$38.907.633

En base a los resultados teóricos mostrados en la tabla anterior, el valor útil estimado para el material asfáltico recuperado es un 79,2% mayor al valor que se le puede dar al hormigón como material de subbase. Sin embargo, se debe considerar el costo asociado a las actividades de extracción y recuperación de los materiales, separación por tamaño del agregado (para el caso de asfalto) y procesos de trituración (hormigón), del cual no se tiene antecedentes de precios dentro de la DET. Las actividades asociadas al reciclaje de hormigón son más complejas debido a la mayor rigidez del hormigón. Aun suponiendo que para ambos tipos de pavimento los costos de extracción y procesamiento sean equivalentes, el valor residual resultaría ser teóricamente menor que el valor residual del asfalto.

Finalmente, se desconoce el desempeño de pavimentos de hormigón con losas cortas en el largo plazo y, por lo tanto, el valor residual de este tipo de soluciones, por lo que este valor no se consideró en el análisis de costos del ciclo de vida.

6.4.5. Comentarios

En primer lugar, es necesario destacar que los resultados obtenidos anteriormente son sólo teóricos, ya que actualmente no se dispone de antecedentes de desempeño de pavimentos de hormigón con losas cortas para un periodo de análisis de 40 años en Chile, ya que estas soluciones comenzaron a ser implementadas y comercializadas en el país desde el año 2007¹. En base a esto, existe la posibilidad de que el mantenimiento considerado para los pavimentos de losas cortas en este trabajo (dos cepillados de la superficie en 40 años), se encuentre por debajo de la cantidad de actividades requeridas en un escenario real, en el que es probable que sea necesario incluir actividades de mantenimiento adicionales que contribuyan a aumentar el VPN para estas alternativas.

Por otro lado, los diseños de pavimentos asfálticos fueron realizados utilizando un ligante de grado PG 64-28 para las capas de rodadura. Docentes de la Universidad Técnica Federico Santa María, expertos en asfalto, indicaron que el ligante óptimo que se debe utilizar (en base a la velocidad y el tránsito considerado) corresponde al ligante PG 70-28. El ligante asfáltico utilizado en la MEPDG para modelar el pavimento asfáltico existente en las alternativas de pavimento en la pista principal corresponde al ligante especificado por viscosidad AC-20 debido a la presencia de bajas temperaturas y nieve en invierno. Sin embargo, debió utilizarse el ligante AC-30, que se ajusta de mejor manera al

¹ Según información expuesta en sitio web www.tcpavements.com.

ligante asfáltico CA24 especificado en el MC-V8, y el cual se utiliza en la mayoría de los pavimentos asfálticos del país. A esto se suma el hecho de que la estación virtual utilizada en MEPDG para el diseño de pavimentos asfálticos en la zona de estudio considera temperaturas mensuales promedio inferiores en alrededor de 1 °C para meses cálidos, e inferiores en alrededor de 4°C para los meses más fríos, lo que aumenta la rigidez del asfalto en la MEPDG. Si los diseños se hubieran realizado considerando el grado PG correcto para el ligante y una distribución de temperaturas más representativa de la estación Barahona (1500 msnm), el nivel de agrietamiento predicho en los resultados de la MEPDG disminuiría significativamente, mejorando el desempeño del pavimento y, eventualmente, prescindiendo de una o más actividades de rehabilitación al término del periodo de análisis.

Finalmente, y en contraposición a lo señalado en el párrafo anterior, el análisis de costos para las alternativas de hormigón consideró adoptando un precio de colocación considerablemente superior al precio de colocación de obras ya ejecutadas como la repavimentación del Camino La Pólvara en el año 2016), lo cual compensa de alguna forma la no utilización de parámetros de diseño óptimos (grado PG del asfalto, ligante asfáltico utilizado en el asfalto existente, distribución de temperaturas de estación virtual) en el diseño de mezclas asfálticas.

6.5. Análisis de Sensibilidad – Precio Máximo de Colocación

Tal como se señaló en la sección 6.3.1, para los análisis de costos de rehabilitaciones en la pista principal, se ha considerado un precio de colocación del hormigón con pavimentadora igual al precio de colocación estimado en la ejecución de la pavimentación del Camino La Pólvara (2016) aumentado en un 100%.

El proyecto de repavimentación del Camino La Pólvara corresponde a una de las obras de pavimentación de mayor envergadura en Chile en las que se han utilizado pavimentos de losas cortas de hormigón. Con un total de 15 km pavimentados en 4 pistas, y un costo total cercano a 15 mil millones de pesos, es muy probable que el precio de colocación por metro cúbico de hormigón haya bajado drásticamente debido a los volúmenes de obra involucrados. Por esta razón, se ha aumentado el precio de colocación de referencia en un 100%.

El precio adoptado para la colocación del hormigón con pavimentadora corresponde a \$114.808, y excluye el precio del hormigón. El precio máximo de colocación, para el cual el recapado de hormigón con losas cortas presenta el mismo VPN que la reconstrucción en asfalto al cabo de 40 años, es igual a \$171.667, que representa un aumento teórico igual a 49,5%.

6.6. Análisis Comparativo de Tiempos de Ejecución Asfalto/Hormigón

En esta sección se presenta una comparación de los tiempos de ejecución de obras para las alternativas de reconstrucción de hormigón con losas cortas y reconstrucción en asfalto sobre la pista principal. La estimación acerca de la duración de las actividades involucradas contempla la repavimentación de una pista de 1 km de longitud. Los tiempos estimados se muestran en las Tablas 6-17 y 6-18 para las reconstrucciones de asfalto y hormigón en losas cortas respectivamente. Para un

análisis más completo se han incluido los tiempos empleados para las actividades de mantenimiento de cada alternativa durante el periodo de análisis (40 años).

Tabla 6-17- Estimación Tiempos de Ejecución - Reconstrucción en Asfalto.

Actividad	Turnos Necesarios
Corte del Pavimento	3
Retiro del Pavimento Existente	7
Excavación	10
Preparación de la Subrasante	3
Subbase Granular	4
Base Granular	4
Pavimentación	1
Fresado y Recapado 1	1
Fresado y Recapado 2	1
Turnos Construcción	32
Turnos Mantención	2

Tabla 6-18- Estimación Tiempos de Ejecución – Reconstrucción con Losas Cortas.

Actividad	Turnos Necesarios
Corte del Pavimento	3
Retiro del Pavimento Existente	7
Excavación	5
Preparación de la Subrasante	3
Subbase Granular	4
Limpieza Rasante	0,5
Instalación Geotextil	0,5
Pavimentación	5
Apertura al Tránsito	4
Cepillado 1	2
Cepillado 2	2
Turnos Construcción	32
Turnos Mantención	4

Los tiempos de ejecución de actividades de remoción de pavimentos existentes, movimientos de tierra y preparación de la subrasante fueron calculados en base a rendimientos de maquinarias y equipos observados en la obra de pavimentación en la pista de prueba presentada en el Capítulo 5, considerando los rendimientos que se adjuntan en el Anexo E. Se consideró una cantidad de 6 horas efectivas de trabajo por turno.

Para la estimación de los turnos empleados de pavimentación, se consideró la capacidad máxima de suministro de la planta de hormigón ubicada en el área alta de la DET, igual a 35 m³ por

hora. Considerando el ancho de la pista y el espesor de las losas, se logra un avance máximo de pavimentación de alrededor de 34 m/hora, por lo cual la pavimentadora deberá tener un avance de 0,5 m/min, valor bajo de pavimentación considerando según fichas técnicas que la velocidad de avance oscila entre 0 y 6 m/min. Con esto se logra un avance diario de aproximadamente 200 m.

En cuanto al corte de juntas, el diseño contempla una longitud total de cortes de aproximadamente 4500 m lineales, casi 4 veces superior a la cantidad de cortes del diseño de pavimento tradicional de hormigón (1230 m lineales). Por esta razón se consideró el corte en fresco en el hormigón con cortadoras soffcut, cuyo rendimiento de corte oscila entre 2 y 7 m por minuto (120 a 420 m lineales por hora), dependiendo de la dureza del agregado y la profundidad del corte. Considerando tres cortadoras soffcut durante la pavimentación, con un avance promedio de 5 m por minuto, se logra un rendimiento de 900 m lineales diarios, con lo cual el corte de las juntas puede realizarse en paralelo a la pavimentación y sin turnos adicionales. El corte de juntas en seco posee un rendimiento mucho menor, del orden de 20 m por hora, por lo que efectuar cortes en seco en un pavimento de hormigón con losas cortas demanda una cantidad de tiempo considerablemente mayor.

Con respecto a los tiempos de apertura al tránsito, en el diseño de asfalto esta estimación no se consideró, ya que en esta materia el asfalto lleva una amplia ventaja, pudiendo entregar el pavimento al tránsito al cabo de algunas horas luego de la colocación y compactación de la carpeta de rodado. En cuanto al pavimento de hormigón, se adoptó un tiempo de apertura al tránsito de 4 días, considerando los resultados de laboratorio (Sección 5.8.2). La resistencia a la flexotracción a 3 días es de 3,6 MPa, equivalentes al 72% de la resistencia especificada a la flexotracción especificada para el hormigón en el diseño (5 MPa). Es necesario destacar que estos ensayos se realizaron sin incluir fibra en el hormigón, por lo que eventualmente la resistencia a la flexotracción de la mezcla podría ser mayor al día 3.

Finalmente se tiene que, para la actividad de cepillado del pavimento, el rendimiento promedio de las cepilladoras es de 1 km por pista por día (ICH, 1999). Como se ha adoptado un turno con dos horas menos de trabajo, se estimó una duración de 2 días para esta actividad.

En base a los resultados, se puede observar que los tiempos de construcción son los mismos para ambas alternativas de reconstrucción. Si bien el tiempo de apertura al tránsito y el tiempo empleado en pavimentación son mayores comparados con la alternativa de asfalto, estas diferencias se ven compensadas con los mayores tiempos empleados en movimiento de tierra para esta última alternativa, la cual considera una capa granular adicional de base.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la factibilidad técnico económica de implementar los pavimentos de hormigón en losas cortas como alternativa de mantenimiento y/o reconstrucción de pavimentos dentro de la CEC, mediante la comparación directa de costos iniciales y del ciclo de vida entre diseños de pavimento de hormigón con losas cortas y diseños de pavimentos asfálticos. Para esto se eligió una zona de estudio ubicada en el km 41 de la carretera, en la cual se ubica una pista auxiliar de tránsito lento, denominada pista de prueba.

En forma previa al estudio de factibilidad, se realizó un diseño de prueba en asfalto con el método del MC-V3 de 2017 (basado en su mayoría en el método AASHTO de 1993) en la pista de prueba, para luego evaluarlo con la MEPDG empleando ligantes asfálticos tradicionales y asfaltos especificados por desempeño (PG). Este diseño no se consideró en el análisis económico y solo se realizó para determinar el desempeño real de una alternativa de asfalto diseñada con métodos empíricos (AASHTO 93).

La evaluación económica se dividió en dos fases. La primera consiste en una comparación de costos iniciales de alternativas de pavimento diseñadas en un tramo de 100 m dentro de la pista de prueba. La segunda, consiste en una comparación de los costos del ciclo de vida para alternativas de rehabilitación y reconstrucción de pavimentos, considerando los costos iniciales de construcción y los costos futuros de mantenimiento para un periodo de análisis de 40 años.

Para la comparación de costos iniciales en la pista de prueba, se realizaron diseños de pavimentos nuevos de asfalto y hormigón con losas cortas, utilizando la MEPDG para pavimentos asfálticos y el software OptiPave2 para pavimentos de losas cortas. Adicionalmente, se llevó a cabo la ejecución de una obra de pavimentación de 100 m con losas cortas en la pista de prueba, cuyos costos fueron incluidos en esta evaluación.

Para la comparación de costos del ciclo de vida en la pista principal, se consideró la construcción de una pista de 1 km de longitud. Las mantenciones futuras consideradas consisten en el fresado y recapado asfáltico para las soluciones asfálticas, y cepillado de la superficie para pavimentos de hormigón con losas cortas. Dentro de este análisis se muestra una estimación acerca de los tiempos de ejecución para alternativas de reconstrucción de asfalto y de losas cortas de hormigón.

Tanto en la pista de prueba como en la pista principal se presentaron alternativas de pavimentos nuevos de hormigón tradicionales con losas de 3,5 m de largo y barras de traspaso de carga, diseñados con el método AASHTO de 1998, descrito en el MC-V3 de 2017. Para la alternativa de hormigón tradicional en la pista principal, se estimó un periodo en el cual se debe realizar el cepillado del pavimento. Dicho periodo fue estimado en base a la evolución de la serviciabilidad del pavimento en el tiempo, la cual fue relacionada con el IRI.

A continuación, se presentan las conclusiones de este trabajo, en función de los objetivos planteados.

Con respecto al estudio acerca del comportamiento de ligantes asfálticos especificados por viscosidad y por desempeño, se puede concluir lo siguiente:

El pavimento de prueba analizado con la MEPDG, diseñado con el método de diseño de asfaltos descrito en el MC-V3 de 2017 de acuerdo a las características de tránsito y clima en la pista de prueba, no logra mantener un desempeño adecuado durante la vida útil de servicio, independiente del ligante asfáltico utilizado, superando los umbrales máximos de deterioro en un periodo cercano inferior a la mitad de la vida útil proyectada.

Existen diferencias de comportamiento entre mezclas asfálticas con asfaltos especificados por métodos tradicionales (viscosidad, penetración) y mezclas asfálticas con asfaltos especificados por desempeño (Superpave). Mientras las primeras tienden a presentar mayor nivel de agrietamiento por fatiga, las segundas presentan mayor deformación permanente. Estos resultados, sin embargo, no son totalmente precisos, debido a para ligantes especificados por desempeño, no se consideró el ligante adecuado para la capa de rodadura según el nivel de tránsito y la velocidad de circulación. Con un ligante de grado PG 70-28 (en lugar del ligante PG 64-28), el desempeño del pavimento en el tiempo aumentará significativamente.

Las especificaciones de asfaltos por desempeño caracterizan los ligantes asfálticos de manera más completa comparadas con las especificaciones tradicionales por viscosidad vigentes en Chile, evaluando el comportamiento del ligante a un mayor rango de temperaturas, entre las cuales se encuentra la temperatura de la zona del proyecto.

Con respecto al análisis comparativo de costos iniciales entre alternativas de pavimentos de asfalto y hormigón con losas cortas en la pista de prueba, se puede concluir lo siguiente:

En la estimación del tránsito que circula en la pista de prueba, se consideró solo la circulación de camiones, dejando de lado el aporte de buses ya que, según observaciones en terreno, estos vehículos no hacen uso de estas pistas. Probablemente no las usen debido al estado avanzando de deterioro en el que se encuentran. Sin embargo, podrían utilizarlas en caso de realizar el mantenimiento de estas pistas.

Un diseño de pavimento de hormigón con losas cortas reportó un ahorro inicial de construcción de 1,5% con respecto a un diseño de pavimento asfáltico nuevo diseñado con la MEPDG.

La construcción del proyecto de losas cortas ejecutado reportó un ahorro cercano a 17,5% con respecto al pavimento asfáltico nuevo, pese a considerar los gastos de cepillado del pavimento. La diferencia de ahorro se debe a que en la obra la cantidad de hormigón pavimentado fue inferior al proyectado, además no se consideró el reemplazo de la subbase granular ni la colocación de geotextil.

El diseño de pavimento nuevo asfáltico debió considerar en la capa de rodadura, un ligante de grado PG 70-28, según el nivel de tránsito y la velocidad de circulación, (40 km/h). Además, en el diseño con la MEPDG se analizó la estructura con temperaturas significativamente menores,

modelando el asfalto con una rigidez mayor a la que tendrá en terreno. Corrigiendo estos problemas, el diseño de asfalto presentará menor índice de agrietamiento por fatiga y por lo tanto mejor desempeño. Con esto, los espesores de capas asfálticas requeridos podrían ser menores, lo que haría a la solución de asfalto más competitiva respecto a la solución de losas cortas.

Con respecto al diseño y análisis comparativo de costos del ciclo de vida de alternativas de pavimentos de asfalto y hormigón con losas cortas en la pista principal, se puede concluir lo siguiente:

En cuanto a las curvas de predicción de desempeño de la MEPDG para los recapados de asfalto sobre la pista principal de espesores 10, 15 y 18 cm (respectivamente alternativas 1, 2 y 3), todos fallan por reflexión de grietas en plazos inferiores a 10 años. Sin embargo, actualmente existen materiales asfálticos de alto desempeño, con vidas útiles muy superiores a los asfaltos convencionales considerados en este trabajo, los cuales están siendo actualmente utilizados en carreteras concesionadas sometidas a altos volúmenes de tránsito. Si se utilizaran estas mezclas, calibradas apropiadamente en MEPDG para el diseño de pavimentos asfálticos en el país, el desempeño de estas alternativas aumentaría notoriamente.

Una reconstrucción en asfalto presenta un menor costo del ciclo de vida en 40 años respecto de un recapado asfáltico al cabo de 40 años. El mayor costo inicial de construcción se ve compensado con un ahorro en la cantidad de actividades de mantención a largo plazo.

La alternativa de recapado de hormigón con losas cortas no adherido presentó un ahorro de 10,1% en el costo inicial con respecto a la alternativa de reconstrucción de asfalto. En el largo plazo la situación es similar, reportando un ahorro en el costo del ciclo de vida de 10,7% para un periodo de análisis de 40 años.

Una reconstrucción en hormigón con losas cortas es un 18,1% más costosa que una reconstrucción de asfalto. Sin embargo, en el largo plazo los costos del ciclo de vida se hacen similares, presentando una diferencia de 2,2% a favor del asfalto.

A partir de la estimación de los valores de material reciclado para las alternativas de reconstrucción en la pista principal, se puede deducir que el valor residual de las losas cortas de hormigón podría ser considerablemente más bajo que para la alternativa de asfalto. El valor de un 20% de asfalto recuperado para futuras capas asfálticas es un 79,2% más alto que el valor del hormigón reciclado, considerando que se recicla el 100% del hormigón. Estas estimaciones se realizaron sin considerar los costos asociados a la extracción y tratamiento de estos materiales, los cuales podrían ser más altos en el hormigón debido a la mayor dureza de este material.

En cuanto a los tiempos de ejecución de actividades para las reconstrucciones de asfalto y hormigón con losas cortas, se estimó en la misma cantidad de turnos requeridos para la construcción y el mantenimiento de ambas alternativas. El tiempo de apertura al tránsito estimado para el hormigón fue de 4 días, considerando el desarrollo de la resistencia del hormigón en las pruebas de laboratorio (72% de la resistencia especificada a flexotracción de diseño, al día 3), mientras que para el asfalto se consideró que el pavimento puede ser abierto al tránsito durante el mismo día. Estos tiempos se ven compensados con una mayor cantidad de movimientos de tierra para el caso del asfalto, el cual considera una capa granular extra (base granular).

Con respecto a la estimación del tiempo de colocación del pavimento con pavimentadora, dado el espesor del pavimento y el ancho de la pista, se logra un avance diario de pavimentación cercano a 200 m por día, trabajando con una velocidad de avance del tren pavimentador de 0,5 m/min.

Los resultados del análisis comparativo de costos entre asfalto y hormigón con losas cortas son sólo teóricos, puesto que no se tiene evidencia acerca del desempeño, ni de los requerimientos de mantenimiento, ni del valor residual de los pavimentos de losas cortas en Chile, para el periodo de análisis considerado en esta estimación (40 años).

Para modelar el asfalto existente, y a falta de información oportuna, se utilizó un ligante asfáltico AC-20, con lo cual disminuye la precisión de los resultados de desempeño para las alternativas de asfalto presentadas. Debió utilizarse un ligante asfáltico AC-30, el cual hubiera representado de mejor manera el ligante utilizado en la carretera (CA24).

Con respecto al diseño y análisis comparativo de costos entre pavimentos de hormigón con losas cortas y pavimentos de hormigón tradicionales diseñados con el método AASHTO 98, tanto para diseños en la pista de prueba como en la pista principal, se puede concluir lo siguiente:

Para los diseños en la pista de prueba, un diseño de hormigón con losas cortas presenta un ahorro de 2,2% con respecto a un pavimento de hormigón tradicional diseñado con AASHTO 98.

Para los diseños en la pista principal, una reconstrucción con losas cortas requiere el mismo espesor de losas que una reconstrucción con losas tradicionales diseñadas con una confiabilidad de 75% (22 cm). En ambos diseños se consideró un aumento de 2 cm en el espesor requerido a fin de amortiguar la reducción del espesor de las losas en futuros cepillados de la superficie.

El diseño de pavimento de hormigón tradicional con AASHTO 98 presentó un espesor relativamente bajo. Esto se debe a la confiabilidad de diseño seleccionada (75%). Los EE de diseño de este método son altamente sensibles a la confiabilidad adoptada, por lo cual este método sobreestima el espesor requerido para pavimentos de alto tránsito, que requieren una confiabilidad más alta.

La alternativa de reconstrucción con losas cortas resultó ser un 4,4% más costosa que una reconstrucción de pavimento de hormigón tradicional en cuanto a costos iniciales, y un 34,6% más costosa al cabo de 40 años. Esto se debe a que mediante el software OptiPave2 se pronosticaron dos actividades de cepillado para las losas cortas en 40 años, mientras que, en base a la proyección en el tiempo de la serviciabilidad e IRI del pavimento tradicional, se pronosticó sólo una actividad de cepillado. Sin embargo, la proyección de la serviciabilidad y posterior correlación con el IRI se realizaron con ecuaciones empíricas, y no contemplan factor de confiabilidad. De haber considerado algún factor de confiabilidad, es probable que se hayan requerido dos cepillados del pavimento, ya que al cabo del año 40 el valor del IRI se encontraba cerca del valor umbral. Por otro lado, es necesario señalar que con el método AASHTO 98 no se puede predecir la evolución del agrietamiento de las losas, el cual podría ser mayor que en pavimentos de hormigón con losas cortas.

El método AASHTO 98 no está calibrado para Chile y actualmente se encuentra obsoleto. En la actualidad, para el diseño de pavimentos de hormigón, se cuenta con la MEPDG calibrada en Chile, la cual permite obtener diseños optimizados para pavimentos de hormigón convencionales. A pesar

de contar con el uso de esta herramienta para el desarrollo de este trabajo, su utilización no fue posible debido a dificultades técnicas.

Con respecto a la experiencia en obra durante la ejecución de la pavimentación con losas cortas en el km 41 de la CEC:

La pavimentación se llevó a cabo con ayuda de personal inexperto en obras de pavimentación, en un lapso de tiempo reducido y con algunas dificultades en obra (retrasos en el suministro del hormigón, la falta de herramientas adecuadas, e imposibilidad de retirar parte del pavimento asfáltico existente sin comprometer la integridad de la pista principal), que condujeron a un acabado deficiente de la superficie. Debido a esto fue necesario realizar un cepillado superficial, el cual redujo el espesor del pavimento en aproximadamente 1,5 a 2 cm.

El hormigón colocado en obra (58 m^3) fue menor a la cantidad proyectada (64 m^3), por lo que el espesor resultante del pavimento es en promedio 1,3 cm inferior. Esto, sumado a la reducción de espesor por el cepillado de la superficie, reducirán significativamente la vida útil del pavimento de prueba.

Las características del hormigón utilizado, tales como el tamaño máximo del agregado (20 mm) y la dosificación del hormigón (420 kg/m^3) no se ajustan a las características de hormigones utilizados en obras anteriores de pavimentación con losas cortas, tales como la repavimentación del Camino La Pólvora (tamaño máximo de 40 mm y contenido de cemento de 340 kg/m^3 de hormigón). Esto se vio reflejado en la obra, presentándose algunas fisuras por retracción plástica en el hormigón fresco.

La incorporación de fibras sintéticas de polipropileno en el hormigón generó dificultades en el ajuste de docilidad del hormigón especificada en obra, lo cual generó retrasos en la llegada de los camiones. La consistencia poco trabajable del hormigón acarreó problemas de vibrado de la mezcla y problemas en la textura superficial.

Pese a todas las dificultades mencionadas anteriormente, el pavimento pudo ser abierto al tránsito en un plazo inferior a 24 horas. Incluso en un lapso inferior a 12 horas, lo cual se comprobó mediante dos acontecimientos importantes ocurridos durante la pavimentación: el paso de un camión pluma sobre las losas 7 horas después de que estas fueran pavimentadas, y el accidente ocurrido en el lugar durante la noche, en el cual un camión con batea colisionó una barrera de hormigón posicionada en la obra, interfiriendo en el área pavimentada.

Comentarios Finales

En base a los resultados de este trabajo se concluye que la solución más conveniente no es aquella que presenta los menores costos iniciales, sino la que presenta menores costos presentes en el tiempo, por lo que se recomienda, en base a los resultados de los costos del ciclo de vida de las alternativas de pavimentación presentadas en este trabajo, considerar los costos futuros de mantención, el desempeño en el largo plazo y la vida residual que tendrán los pavimentos al final de

su vida de diseño, antecedentes que deben estar claramente documentados para cada alternativa a considerar.

A partir de la experiencia en obra durante la ejecución de la pavimentación de prueba, se recomienda, en caso de ejecutar nuevamente este tipo de soluciones en el futuro, contar con el apoyo de profesionales y personal experto en pavimentos de hormigón, a fin de asegurar una colocación y terminación del pavimento adecuadas. Adicionalmente, se recomienda emplear hormigones con mayor tamaño máximo del agregado (40 mm) y menor contenido de cemento, a modo de prevenir agrietamiento plástico en la mezcla y asegurar una docilidad que permita la correcta colocación y compactación de la mezcla, que a su vez garantice un mejor comportamiento en presencia de fibra estructural, en caso de emplear hormigones con fibra.

La comparación de costos entre pavimentos de losas cortas y pavimentos de hormigón tradicionales debió realizarse utilizando la MEPDG calibrada para Chile. Sin embargo, esto no fue posible debido a las dificultades técnicas. Como alternativa, se decidió realizar diseños de hormigón tradicionales con el método de diseño que adopta el Manual de Carreteras de 2017 (basado en el método AASHTO de 1998), cuyos resultados se sabe que están muy sobredimensionados para pavimentos de alto tránsito. En base a esto, los porcentajes de ahorro entre losas cortas y pavimentos de hormigón tradicionales presentados en este trabajo podrían disminuir en caso de diseñar pavimentos de hormigón tradicionales con MEPDG debido a que esta entrega diseños con espesores optimizados.

Durante el análisis y diseño de pavimentos asfálticos con la MEPDG, para las capas de rodadura se utilizó una mezcla asfáltica con asfalto de grado PG 64-28, el cual resulta de elevar en un grado la alta temperatura el asfalto base requerido según la zona geográfica (PG 58-28). Carlos Wahr D., ingeniero civil experto en el área de vialidad, recomienda elevar otro grado la alta temperatura de la mezcla de las capas de rodadura considerando el nivel de tránsito y las condiciones del sector, adoptando así un asfalto de grado PG 70-28.

En síntesis, se hace hincapié en que todos los resultados presentados en este trabajo son solamente teóricos, puesto que, tal como se señaló en los párrafos anteriores, no se cuenta con antecedentes suficientes ni del desempeño, ni de los requerimientos de mantenimiento ni de la vida residual de las losas cortas en el largo plazo. La comparación de las losas cortas se realizó respecto de métodos de diseño obsoletos o no calibrados para Chile. Una comparación válida debería incluir tecnologías actuales de materiales asfálticos y métodos de diseño de pavimentos convencionales calibrados en el país.

Futuras Líneas de Investigación

Para la obtención del nivel de deterioro de las alternativas de pavimentos de hormigón con losas cortas mediante el software OptiPave2, se emplearon factores de calibración por defecto en las ecuaciones de predicción, de manera que, si se decide dar mantenimiento a la CEC con losas cortas de hormigón, se recomienda realizar un seguimiento en la obra de pavimentación ejecutada en el km 41 de la carretera, registrando la evolución de los deterioros en el tiempo (porcentaje de losas agrietadas, nivel de escalonamiento e IRI), a fin de calibrar las ecuaciones de predicción de deterioros de acuerdo a las condiciones climáticas y de tránsito locales presentes en el área alta de la DET. Se

recomienda, adicionalmente, realizar algunas mediciones de temperatura en las superficies superior e inferior del pavimento construido, a fin de determinar el gradiente real de temperatura y con ello el porcentaje del tiempo al año en que las losas se encuentran alabeadas.

Con respecto a la estimación del nivel de tránsito, se trabajó con información histórica acerca de los valores del TMDA de ingreso al área alta de la División, en conjunto a información disponible acerca del parque vehicular, utilizado para estimar la cantidad de camiones por categoría. Los pesos adoptados por camión corresponden a valores cercanos a los máximos admisibles según los modelos de camión adoptados por categoría, por lo que eventualmente los espesores de pavimento obtenidos para todas las alternativas presentadas en este trabajo son superiores a los requeridos considerando la distribución real de pesos por tipo de camión. Por esta razón, para futuras obras de pavimentación de hormigón con losas cortas, se recomienda realizar un estudio más detallado acerca del tránsito, de cara a encontrar el espesor óptimo de hormigón requerido.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- AASHTO. (1998). Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures Part II - Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- AASHTO. (2008). Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- ACPA. (2012). Analisis del Costo del Ciclo de Vida: Una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas en pavimentación. Boletín Técnico EB011, American Concrete Pavement Association.
- APSA. (2011). Plan de Conservación de Pavimentos Ruta H-25 Carretera El Cobre Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Santiago.
- Chang, C. (2017). Whitetopping. Una Realidad para Intervenir Pavimentos Antiguos. 8° Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Concreto. Antigua Guatemala, Guatemala.
- Covarrubias T., J., & Covarrubias V., J. (2007). Pavimentos de Concreto con Losas de Dimensiones Optimizadas. TCPavements.
- Covarrubias V., J. (2012). Diseño de Losas de Hormigón con Geometría Optimizada. Revista Ingeniería de Construcción, 181-197.
- CPTP. (2007). Thin Whitetopping - The Colorado Experience. Concrete Pavement Technology Program. Federal Highway Administration. Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/07025/07025.pdf>
- Darter, M. (1991, Julio-Diciembre). Evaluación de la Guía AASHTO 1986 para el Diseño de Pavimentos. Revista Ingeniería de Construcción N°11.
- Del Río, P., & Covarrubias V., J. (2016). Repavimentación Camino La Polvora, Ruta 60 Ch en Chile, Utilizando Hormigón Reforzado con Fibra Estructural y Diseñado con Sistema de Losas con Geometría Optimizada.
- Delatte, N. (2007). Concrete Pavement Design, Construction and Performance. USA: Taylor & Francis.
- Delgadillo, R. [et al]. (2014). Guía para la utilización del método AASHTO 2008 para el Diseño de Pavimentos Rígidos en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Delgadillo, R., Segovia, M., Wahr, C., & Thenoux, G. (2016). Zonificación SUPERPAVE para Chile. 12° Congreso Internacional PROVIAL. 08 al 12 de Agosto. Valparaíso.
- EMB. (2009). Pavimentos de Hormigón, Durabilidad y Resistencia. Revista EMB Construcción.
- Evensen, R. (2008). Axle Loads; Equivalent Axles or Load Spectrum? NVF 34-Baltic Symposium.
- FHWA. (1990). Concrete Pavement Joints, Technical Advisory, T 5040.30. Federal Highway Administration, Washington, DC.

- FHWA. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Federal Highway Administration. Publication NO. FHWA-HRT-11-021, U.S. Department of Transportation.
- Fick, G., & Harrington, D. (2014). Guide To Concrete Overlays. Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements.
- Huang, Y. (2004). Pavement Analysis and Design (2nd ed.). University of Kentucky, USA.
- Ibañez, W. (2010). Costos y Tiempos en Carreteras. Lima, Perú: Macro E.I.R.L.
- ICH. (1999). Cepillado para Mantenición de Pavimentos. Hormigón Al Día(16). Retrieved from http://ich.cl/descargas/wp-content/uploads/BHAD_16.pdf
- Lowery, G. (2005). Life Cycle Cost Analysis Thin Whitetopping. Proceedings, International Conference of Best Practices for Ultrathin and Thin Whitetoppings. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Meteodata. (2017, Mayo). Estaciones Meteorológicas División El Teniente. Retrieved from <http://det.meteodata.cl/SERNAGEOMIN/>
- Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2003). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fourth Revised Edition). Federal Highway Administration.
- MINVU. (2016). Código de Normas y Especificaciones para Obras de Pavimentación. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile.
- MOP. (2017). Manual de Carreteras. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas., Chile.
- Rioseco, R., & Tesser, C. (2006). Cartografía Interactiva de los climas de Chile. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Retrieved from http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/
- Staforelli, G. (2016). Actualización Norma NCh170:2016 "Hormigón Requisitos Generales" (Durabilidad). Melón.
- Synder, M. (2008). Lessons Learned from MnROAD (1992 – 2007): Whitetopping Design, Construction, Performance and Rehabilitation. Bridgeville, Pennsylvania, USA.
- TCPavements. (2014). Documentación y Guía de Diseño OptiPave 2. Retrieved from http://www.tcpavements.cl/docs/descargas/1509070653_OptiPave_2_esp.pdf
- Valverde, E. (2013). Introducción al Sistema de Corte SoffCutt. Expo Hormigón 2013. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.
- Westergaard, H. (1926). Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. In Public Roads (Vol. 7, pp. 225-235).
- Zúñiga, R. (2016). Mezcla Asfáltica en Caliente con Pavimento Asfáltico Recuperado RAP. Laboratorio Nacional de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas.

ANEXO A. PARÁMETROS DE DISEÑO

A.1. Parámetros de Diseño Software OptiPave2

En esta sección se describen brevemente los parámetros de diseño de OptiPave2, señalando además los valores recomendados y/o generalmente adoptados en los diseños, de acuerdo a la Guía de diseño OptiPave2 (TCPavements, 2014).

- **Parámetros de diseño del Tipo de Pavimento (Figura A-1)**

OptiPave 2

Archivo Configuración Ayuda

Proyecto Diseño Tráfico Hormigón Suelo Clima Resultados

Vida de Diseño 20 (años)

Largo de Losa 1,75 (m)

Espesor Losa 150 (mm)

☐ Calcular Espesor

Tipo de Borde Libre

Losa Exterior con Sobreancho No

Barras de Transferencia de Carga No

Interfaz Pavimento-Base No Adherido

IRI 1,8 (m/Km)

Umbral Máximo Admisibles de Diseño

Porcentaje de Losas Agrietadas 10 (%)

IRI 3,5 (m/Km)

Escalonamiento Promedio 5 (mm)

Confiability 80 (%)

OptiPave2
TCPavements

Figura A-1: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Tipo de Pavimento

- **Largo de Losa**

Corresponde al espaciamiento entre dos juntas transversales consecutivas. El largo de las losas que permite analizar OptiPave2 es de entre 1 a 2,5 m. Se recomienda limitar el largo de la losa a 1,75 m en pistas con tránsito en ambas direcciones, para prevenir que estas sean cargadas por más de un set de ruedas en forma diagonal.

- **Espesor Losa**

Se debe ingresar el espesor de la losa en milímetros. Adicionalmente se puede activar la casilla “Calcular Espesor”, para que el programa encuentre mediante iteraciones el espesor óptimo de la losa que cumpla con los Umbrales Máximos Admisibles de diseño adoptados.

- **Tipo de Borde**

Corresponde a la condición de borde del pavimento. El tipo de borde genera dos efectos. Por una parte, determina el grado de confinamiento lateral que aporta la berma al pavimento. Por otro lado, aleja el tráfico del borde. En el software OptiPave2 se definieron cuatro tipos de borde, los cuales se muestran en la Tabla A-1.

Tabla A-1: Tipos de Borde del Pavimento considerados en OptiPave2

Tipo de Borde	Soporte a la Estructura	¿Aleja el Tráfico del Borde?
Borde Libre	Nulo	No
Berma Granular/Asfáltica	Muy Leve	No
Berma de Hormigón	Leve	No
Vereda	Mediano	Si

Fuente: (Documentación y Guía de Diseño OptiPave 2, 2014)

- **Sobreancho en las Losas**

Se puede diseñar el pavimento considerando un sobreancho de la losa exterior, a fin de aumentar la distancia entre la línea de demarcación externa y el borde del pavimento, alejando a su vez la rueda exterior de los vehículos de dicho borde. Durante la generación de una base de datos de tensiones con ISLAB2000 durante la implementación de OptiPave, se consideraron dos anchos diferentes de las losas: 1,8 y 2,1 m (losa ensanchada).

- **Barras de Transferencia de Carga**

Permiten una mayor y más prolongada transferencia de carga en las juntas transversales (de contracción y construcción), con lo que se mejora el comportamiento estructural y se reduce el escalonamiento. Sin embargo, al considerar cortes más delgados en las juntas y, de esta forma, aumentar la transferencia de carga por trabazón de agregados, las barras de transferencia de carga no son parte del diseño estándar de pavimentos con losas de geometría optimizada.

- **IRI Inicial**

Corresponde al valor del IRI medido justo después de la apertura del pavimento al tráfico. El IRI inicial depende tanto del tipo de pavimento como de las técnicas empleadas durante la construcción. En la Tabla A-2 se muestran los rangos de IRI aceptables en Chile.

Tabla A-2: Valores recomendados de IRI inicial (MC-V7)

Tipo de Superficie	IRI inicial (m/km)
Pavimentos Asfálticos	0,9 – 1,5
Pavimentos de Hormigón	1,1 – 1,8
Tratamientos Superficiales	2,5 – 3,5

▪ **Porcentaje de Losas Agrietadas**

Corresponde al porcentaje máximo admisible de losas agrietadas en el pavimento al final de la vida de servicio. Los valores adoptados dependen de la importancia de la vía. Se recomienda emplear los valores mostrados en la Tabla A-3.

Tabla A-3: Máximo de Losas Agrietadas según la Importancia de la Vía (MINVU, 2016)

Clasificación de la Vía	Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas
Rutas Locales y Calles	50%
Calles principales y vías de mediano tráfico (<15*106 EE)	30%
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico (>15*106 EE)	10%

▪ **IRI Final**

Valor del IRI máximo admitido del pavimento una vez cumplida su vida de diseño. El valor máximo admisible para el IRI final de pavimentos de hormigón y asfalto en Chile es de 3,5 m/km.

▪ **Escalonamiento Promedio**

Corresponde al valor del asentamiento diferencial entre las caras laterales de dos losas de hormigón vecinas en las juntas transversales. Se expresa en términos de escalonamiento promedio. El valor máximo permitido para el escalonamiento promedio al final de la vida de servicio es de 5 mm.

▪ **Confiabilidad**

Corresponde al grado de confiabilidad con la que se espera que el pavimento no falle al final de su vida de servicio. La confiabilidad debe aumentar conforme aumenta la importancia de la vía, a fin de reducir los costos en las actividades de mantenimiento. OptiPave permite seleccionar el grado de confiabilidad para los umbrales máximos de deterioro: Porcentaje de Losas Agrietadas, Escalonamiento Promedio e IRI Final.

En la Tabla A-4 se muestran valores de confiabilidad a adoptar para los distintos umbrales de deterioro, según la clasificación de la vía.

Tabla A-4: Valores de Confiabilidad Recomendados para Tipos de Deterioro en OptiPave2 (TCPavements, 2014).

Clasificación de la Vía	Urbanas	Rurales	
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico	85% – 97%	80% – 97%	
Calles Principales y Vías de Mediano Tráfico	80% – 95%	75% – 90%	
Calles de Bajo Tráfico	75% – 85%	70% – 80%	
Pasajes	50 – 75%	50 – 75%	

- **Parámetros de diseño del Tráfico (Figura A-2)**

The screenshot shows the OptiPave 2 software interface with the 'Tráfico' (Traffic) tab selected. The interface includes a menu bar (Archivo, Configuración, Ayuda) and a toolbar with icons for various functions. The main area contains several input fields and dropdown menus for traffic design parameters:

- Método de Análisis de Tráfico:** Ejes Equivalentes (dropdown)
- Clasificación del Tipo de Tráfico:** FHWA TTC 1 (dropdown)
- Tasa de Crecimiento Anual de Tráfico:** 5 (%)
- EE Totales en Pista de Diseño:** 1,000,000
- Distribución Lateral del Tránsito:**
 - Distancia de la Huella a Línea de Demarcación: 450 (mm)
 - Dev. 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 (%)

The OptiPave 2 logo and 'TCPavements' text are visible in the bottom right corner of the window.

Figura A-2: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Tráfico

- **Método de Análisis de Tráfico**

El tráfico se puede ingresar en Ejes Equivalentes o utilizando Espectros de Carga. Estos últimos no fueron utilizados en los diseños realizados con OptiPave2.

- **Distribución del Tráfico**

OptiPave2 incluye las clasificaciones de tránsito y espectros de carga estándar desarrollados por la Federal Highway Administration (FHWA) y la American Concrete Pavement Association (ACPA). Las clasificaciones de tráfico se describen en el Anexo B.

▪ Tasa de Crecimiento

Corresponde al crecimiento anual promedio del tráfico, expresado en porcentaje. La tasa de crecimiento no es relevante cuando el tráfico es calculado mediante EE. Solo cambian las formas de las curvas de deterioro, pero los valores iniciales y finales se mantienen.

▪ Distribución Lateral del Tráfico

En el software se debe ingresar la distribución lateral del tráfico, representada por la media y la desviación estándar de la distancia que existe entre el borde externo de la rueda externa del eje, y el borde interno de la línea de demarcación, tal como se muestra en la Figura A-3.

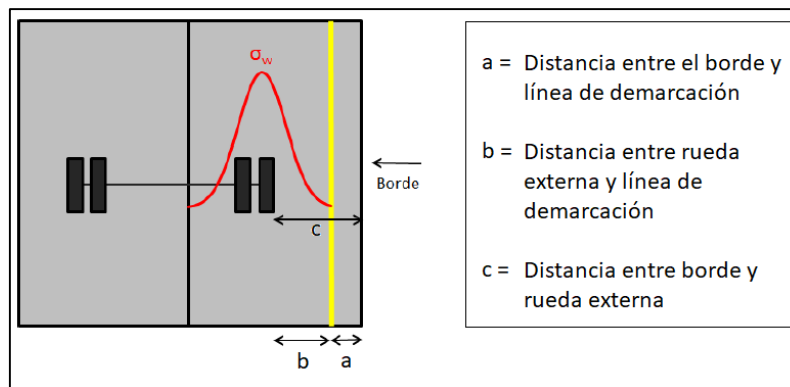


Figura A-3: Distribución Lateral típica del Tránsito de un Pavimento de Hormigón (TCPavements, 2014).

Los valores recomendados para las distancias a , b y c de la Figura A-3, según el tipo de borde del pavimento, y sus valores de desviación estándar, se muestran en la Tabla A-5:

Tabla A-5: Valores recomendados de Distribución Lateral del Tráfico en OptiPave2 (TCPavements, 2014).

Tipo de Borde	a (mm)	b (mm)	c (mm)	Desv. Est. (mm)
Borde Libre/berma de hormigón /berma granular o asfáltica	150	450	600	250
Solera de borde	150	550	700	200
Losa con Sobreancho	300	450	750	250

- **Parámetros de Diseño del Hormigón (Figura A-4)**

Figura A-4: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Hormigón

- **Tipo de Ensayo de Resistencia y Edad de Ensayo**

OptiPave2 permite ingresar las resistencias del hormigón a la flexotracción, compresión cúbica y compresión cilíndrica y compresión cúbica y cilíndrica. Se puede seleccionar una edad de ensayo de 28 y 90 días.

- **Confiabilidad de la Mezcla de Hormigón**

Es el nivel de confianza (expresado en porcentaje) de la mezcla para el cual se asegura que alcance la resistencia especificada. El software adopta por defecto un valor de confianza de 80%.

- **Desviación Estándar del Diseño de Hormigón**

Desviación que tiene el proceso de fabricación del hormigón. El software utiliza por defecto valores de 3 MPa para compresión cúbica, 3,3 MPa para compresión cilíndrica y 0,4 MPa para flexotracción. Mientras menores sean estos valores, la resistencia del hormigón a 90 días calculada por el programa, disminuye, haciendo más conservador el diseño.

- **Aumento de la resistencia de 28 a 90 Días**

Es el aumento de la resistencia a la flexotracción del hormigón desde el día 28 al día 90 contabilizados a partir de la colocación y terminado de las losas. Aumento de resistencia depende de cada mezcla, pero se recomienda utilizar un valor de 1,1 (10% de aumento).

- **Módulo de Elasticidad del Hormigón**

El valor del módulo de elasticidad puede ser obtenido mediante ensayos de laboratorio o por correlaciones con el valor de la resistencia a la compresión. Se recomienda utilizar para hormigones de características normales un valor de 29000 MPa (MINVU, 2016 y MC, 2017).

- **Peso específico del Hormigón**

Es el peso de la mezcla de hormigón por unidad de volumen. Si no se posee información del peso específico de la mezcla, se recomienda utilizar un valor de 2400 kg/m³.

- **Módulo de Poisson**

Corresponde a la razón entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial, causada por la aplicación de una carga en sentido axial. Su valor varía entre 0,1 y 0,25. En general se utilizar un valor de 0,15.

- **Coefficiente de Expansión Térmica**

Corresponde es una medida de contracción o expansión que sufre un material ante cambios de temperatura. Se expresa en °C⁻¹. Para el hormigón se utiliza generalmente un valor de $1 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹, salvo que sea determinado en laboratorio.

- **Retracción del Hormigón a los 365 Días**

Corresponde al acortamiento que sufre el hormigón conforme se va endureciendo. La retracción afecta a la transferencia de carga de las losas en las juntas. El valor de la retracción se mide en términos de deformación unitaria y se expresa microstrain (µε). En el panel de ayuda del software se recomienda un valor por defecto de 0,007 (700 µε).

- **Contenido de Aire**

Corresponde al volumen de aire en el hormigón con respecto al volumen de la mezcla. OptiPave2 adopta un valor por defecto del contenido de aire igual a 3%.

- **Relación Agua/Cemento**

Cantidad de agua utilizada por unidad de cemento en la mezcla de hormigón (en peso), expresada como proporción. OptiPave2 adopta un valor por defecto igual a 0,45.

- **Resistencia Residual de Fibra (para diseños de hormigón con fibra estructural)**

En el caso de diseñar pavimentos de hormigón con fibra estructural, la resistencia residual de la fibra se puede ingresar por tres métodos de ensayo.

- ASTM 1609-10
- Ensayo de Barcelona (UNE 83515 – 2010)

- ASTM C1399-10

En general se utiliza el método de ensayo de la ASTM 1609-10 y se adopta un valor de resistencia residual de la fibra de 1 MPa para el diseño.

- **Parámetros de Diseño del Suelo (Figura A-5)**

	Tipo de Suelo	Módulo Resiliente Invierno (MPa)	Módulo Resiliente Verano (MPa)	Módulo de Poisson	Espesor (mm)
Base	A-1-a	300	300	0,35	150
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-1-a	60	72	0,35	

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

Coeficiente de Fricción Pavimento-Base: 0,65

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

Figura A-5: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Hormigón

Fuente: Archivo Personal

- **Número de Capas**

Se puede seleccionar hasta un máximo de seis capas en el diseño. La capa “Base” es aquella capa situada inmediatamente bajo el pavimento de hormigón. La subrasante no se considera como capa. El espesor de cada capa se debe ingresar en milímetros.

- **Módulo Resiliente y Módulo de Poisson de las Capas**

Se debe ingresar el módulo resiliente (M_R) de cada capa en MPa. El software cuenta con una tabla resumen de valores representativos de módulos resiliente y módulos de Poisson para cada tipo de suelo de las clasificaciones USCS y AASHTO, a la cual se puede acceder desde el botón ayuda en la parte inferior izquierda (Figura A-5).

- **Resistencia a la Erosión (Capa bajo el Pavimento)**

La resistencia a la erosión se caracteriza mediante valores que varían de 1 a 5 según el grado de erosión del material, siendo 1 un material muy resistente a la erosión y 5 un material muy erosionable. A cada valor se asocian tipos de materiales según la Tabla A-6, a la cual se accede presionando el botón con el signo “?” en la parte inferior (Figura A-5). La resistencia a la erosión de la base incide directamente en la aparición de deterioros en el pavimento, especialmente el escalonamiento.

Tabla A-6: Factores de Resistencia a la Erosión de Capas bajo el Pavimento

Nivel de Resistencia a la erosión	Factor
Materiales extremadamente resistentes a la erosión: Hormigón pobre 8% de cemento app. sobre base granular o estabilizada, o geotextil entre base tratada y subrasante. Mezcla asfáltica en caliente con 6% de cemento asfáltico sobre base granular o suelo estabilizado. Capas drenantes tales como bases tratadas con cemento (BTC) o asfalto (BTA) con geotextil entre base y subrasante.	1
Materiales muy resistentes a la erosión: BTC con 5% cemento sobre subbase granular o capa estabilizada, o geotextil entre BTC y subrasante. BTA con 4% de cemento asfáltico sobre subbase granular o geotextil entre BTA y subrasante.	2
Materiales resistentes a la erosión: BTC con app. 3,5% de cemento y resistencia a la compresión entre 7 y 14 MPa. BTA con 3% de cemento asfáltico que cumpla con ensayo de adherencia de la mezcla. Base granular de muy buena calidad. Bases granulares típicas chilenas.	3
Materiales poco resistentes a la erosión: Material Granular chancado no consolidado de gradación densa y agregados de Buena calidad:	4
Materiales muy erosionables: Suelos no tratados. (optar por este valor cuando la losa de hormigón se coloque directamente sobre el pavimento).	5

- **Coefficiente de Fricción Pavimento-Base**

Corresponde al coeficiente de fricción entre el pavimento y la capa que lo soporta. Para bases granulares se recomienda adoptar un valor de 0,65, mientras que, para bases tratadas con cemento, un valor de 0,8.

- **Porcentaje de Material Fino de la Subrasante**

Porcentaje de material fino de la subrasante que pasa por el Tamiz #200 (abertura de 0,075 mm).

- **Parámetros de Diseño del Clima (Figura A-6)**

Parámetro	Valor	Unidad
País	Chile	
Zona	CALAMA	
Gradiente Equivalente de Construcción	-10	(°C)
Temperatura Media de Invierno	15	(°C)
Temperatura Media de Verano	25	(°C)
Temperatura de Fraguado del Hormigón	45	(°C)
Número de Días al Año con Precipitaciones	10	
Índice de Congelamiento de la Base	5	(%)

Figura A-6: Software OptiPave2 – Parámetros de diseño del Clima

- **Zona Climática:**

OptiPave2 permite seleccionar 12 tipos de clima de Chile, cuya base de datos contiene información acerca de la distribución del diferencial de temperatura entre las superficies superior e inferior de las losas de hormigón durante el año según la Tabla A-6.

En caso de que el tipo de clima del proyecto no se adapte a ninguno de estos climas, OptiPave2 permite seleccionar cuatro climas genéricos:

- Húmedo – Heladizo
- Húmedo – No Heladizo
- Seco – Heladizo
- Seco – No Heladizo

Tabla A-6: Factores de Resistencia a la Erosión de Capas bajo el Pavimento (MINVU, 2016).

ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	ZONA 7	ZONA 8	ZONA 9	ZONA 10	ZONA 11	ZONA 12
DESÉRTICO CON NUBES ABUNDANTES	DESÉRTICO MARGINAL DE ALTURA (+1000 MIS)	DESÉRTICO (150-700 MIS)	DESÉRTICO BAJO	TEMPERADO CALIENTE CON ESTACIÓN SECA PROLONGADA DE 7 A 8 MESES	TEMPERADO CALIENTE CON LLUVIAS INVERNALES Y GRAN HUMEDAD ATMOSFÉRICA	TEMPERADO CALIENTE CON LLUVIAS INVERNALES	POLAR POR EFECTO DE ALTURA	TEMPERADO CALIENTE LLUVIOSO CON INFLUENCIA A MEDIO ALTA NEA (INTERIOR)	TEMPERADO CALIENTE LLUVIOSO CON INFLUENCIA A MEDIO ALTA NEA (COSTERO)	TEMPERADO FRÍO LLUVIOSO CON INFLUENCIA A MEDIO ALTA NEA (COSTERO)	TEMPERADO FRÍO CON LLUVIAS INVERNALES
ARICA IQUIQUE TACAPILLA PUNTA GORDA LA SERENA	PUERTO CARMEN	COPIAPO TAHITI	CHACABAL	VALPARAÍSO VALDIVIA LA LIGUA LAMPAREJA	VALPARAÍSO PICHILEMU CONCEPCIÓN CIILLAN	SANTIAGO RANCAGUA VALDIVIA LOS ANGELES	PORTAFO CIILLAN	ANGOL PTO. MONTE OSORNO ANCUD	VALDIVIA PTO. MONTE CASERO ANCUD	CHAITEN PTO. AYSEN	COPIAPO PTA. ARFANAS
°C/cm PORCENTAJE DEL TIEMPO ANUAL CON CADA GRADIENTE											
-0,9	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-0,8	0%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-0,7	0%	0%	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-0,6	0%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-0,5	1%	2%	3%	8%	3%	1%	5%	3%	0%	3%	1%
-0,4	12%	9%	15%	11%	13%	13%	18%	11%	4%	11%	6%
-0,3	16%	17%	19%	13%	16%	13%	15%	15%	15%	10%	10%
-0,2	15%	18%	10%	11%	16%	17%	12%	14%	19%	10%	14%
-0,1	14%	13%	12%	9%	12%	10%	8%	12%	18%	20%	21%
0	6%	6%	14%	8%	5%	5%	4%	7%	8%	10%	13%
0,1	5%	5%	5%	6%	6%	6%	5%	6%	8%	8%	11%
0,2	6%	4%	5%	5%	5%	6%	5%	5%	7%	7%	7%
0,3	6%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	5%	7%	5%	4%
0,4	6%	5%	4%	3%	4%	4%	4%	5%	6%	3%	3%
0,5	6%	5%	4%	3%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	3%
0,6	5%	5%	4%	2%	6%	5%	4%	4%	3%	3%	3%
0,7	2%	4%	3%	1%	5%	5%	3%	3%	1%	3%	2%
0,8	1%	2%	3%	0%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%
0,9	0%	1%	1%	0%	0%	1%	2%	1%	1%	1%	0%
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
1,1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%

▪ **Gradiente Equivalente de Construcción:**

Es una estimación del alabeo inicial en el pavimento a edad temprana, el cual se produce debido a retracciones diferenciales entre la parte superior e inferior de las losas. Este valor se expresa como el gradiente necesario para mantener la losa plana. El gradiente equivalente depende en gran medida de la época del año en la que se construye el pavimento y del clima de la zona. Se recomienda utilizar los valores mostrados en la Tabla A-7.

Tabla A-7: Gradiente Equivalente de Construcción para Distintas Condiciones Climáticas (TCPavements, 2014).

Zonas Climáticas	Gradiente de construcción (°C)
Zonas Húmedas sin Viento	-5
Zonas Húmedas con Viento o Zonas Secas sin Viento	-10
Zonas Secas con Viento o Zona en Altura	-15
Condiciones con Extrema Evaporación de Agua	-20

- **Temperaturas Medias de Invierno y Verano:**

Las temperaturas medias de invierno y verano corresponden respectivamente al promedio de las temperaturas mensuales de los seis meses más cálidos y los seis meses más fríos en el año.

- **Temperatura de Fraguado del Hormigón:**

Temperatura máxima de construcción del hormigón durante el fraguado durante las primeras 24 horas. El software adopta una temperatura por defecto de 45°C.

- **Número de Días al Año con Precipitaciones:**

Número de días en un año promedio, en los que se registran precipitaciones acumuladas mínimas de 5 mm.

- **Índice de Congelamiento de la Base:**

Es el porcentaje del tiempo al año durante el cual la base se encuentra a una temperatura por debajo de los 0°C.

A.2. Método de Diseño de Pavimentos Flexibles del MC de 2017 – Variables de Diseño

- **Coefficientes de Drenaje**

Los coeficientes de drenaje (m_i) permiten estimar el aporte estructural de las capas no tratadas (base y subbase). La selección de los coeficientes utilizar depende tanto de la calidad de drenaje (función del tiempo que demora el pavimento en evacuar el 50% del agua, según AASHTO) como del tiempo en el cual el pavimento se verá expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación (en la práctica, con más del 50% de humedad).

En la Tabla A-11 se presentan los coeficientes de drenaje para bases propuestos en el volumen 3 del Manual de Carreteras en Chile, para las regiones V y VI.

Tabla A-11: Coeficientes de Drenaje para Bases – Regiones V y VI (MC-V3)

Precip.	Base Permeable	Base: Finos hasta 10%		Base: Más de 10% Finos	
		Subras. Granular	Subras. Finos	Subras. Granular	Subras. Finos
≤ 150 mm	1,40 – 1,35	1,35 – 1,25	1,35 – 1,25	1,15 – 1,00	1,00
> 150 mm			1,25 – 1,15	1,00	1,00 – 0,80

- **Coefficientes Estructurales**

Los coeficientes estructurales (a_i) de las diferentes capas del pavimento, dependen directamente del módulo elástico de los materiales que las componen. Para bases y subbases

granulares no tratadas, esta propiedad se determina según el ensayo descrito en la norma AASHTO T 294-92. Para concretos asfálticos se determina según las normas internacionales ASTM 4123 o ASTM C 469.

A modo de referencia, en la Tabla A-12 se indican algunos valores de coeficientes estructurales utilizados para condiciones normales de diseño, con especificaciones de construcción habituales. No obstante, para condiciones especiales, debidamente justificadas, se deberán utilizar los coeficientes estructurales apropiados para cada situación.

Tabla A-12: Coeficientes Estructurales para Capas de Pavimento Asfáltico (MC-V3)

Capa	Características	Coef. Estructural (a_i)
Subbase granular	CBR = 40%	0,12
Base granular	CBR = 80%	0,13
Concreto asfáltico, capa intermedia	EM: 8000 N	0,41
Concreto asfáltico de superficie	EM: 9000 N	0,43

- **Número Estructural Total (NE_t)**

Corresponde al valor del número estructural resultante de aplicar la ec. 2.x para los parámetros de confiabilidad, serviciabilidad, ejes equivalentes (EE) y módulo resiliente de la subrasante (M_R) seleccionados para el diseño del pavimento. En base al espesor resultante del NE_T se deben definir los espesores de capas asfálticas y capas de base y subbase a utilizar.

- **Numero estructural Mínimo (NE_a)**

Corresponde a la fracción mínima del número estructural total (NE_t), que debe asignarse a las capas asfálticas. El espesor mínimo de las capas asfálticas se calcula a partir de la Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (TMAPA), los EE de diseño y el módulo resiliente de la subrasante.

La TMAPA se calcula a partir de las temperaturas medias mensuales del aire (TMMA) de la zona donde se emplaza el proyecto. Se deben utilizar datos de la estación meteorológica más cercana a la obra, en un periodo mínimo de 10 años. Para cada mes del año, se calcula un factor de ponderación (W_i) según la ec. A.1

$$TMMA (^{\circ}C) = 20,348 + 17,5683 \log W_i \quad (A.1)$$

donde:

TMMA ($^{\circ}C$) : Temperatura media mensual del aire
 W_i : Factor de ponderación

Se calcula el factor de ponderación promedio (W_{ip}) de los factores de ponderación (W_i) de los 12 meses del año. Finalmente, la TMAPA se obtiene al aplicar la ec. A.1 a la inversa utilizando el valor de ponderación promedio W_{ip} .

Una vez obtenido el valor de la TMAPA, y conocido el número de EE presupuestados y el valor del Módulo Resiliente de la subrasante M_R , se obtiene el NE_a de las capas asfálticas utilizando los gráficos disponibles en el volumen N°3 del Manual de Carreteras para TMAPA 6°C, 14°C y 19°C. A modo de ejemplo se muestra uno de estos gráficos en la Figura A-7. El procedimiento de obtención del NE es el que indican las flechas de la figura, comenzando con el número de EE de diseño, y luego del valor del módulo resiliente de la subrasante.

Al momento de obtener el número estructural gráficamente, se debe considerar lo siguiente:

- Los ejes equivalentes en el eje de las abscisas están asociados a una confiabilidad del 50% ($F_R = 1$), por lo que se debe ingresar con los EE estimados, multiplicados por el factor de confiabilidad F_R según el nivel de confiabilidad adoptado (ec. A.2).

$$\text{Log } F_R = -Z_R \cdot S_0 \quad (\text{A.2})$$

- Si el valor del módulo resiliente no coincide con ninguna de las curvas de la figura, se debe interpolar un valor intermedio entre las dos curvas más cercanas.
- Si el valor obtenido de la TMAPA no coincide con ninguno de los valores asociados a los gráficos, se debe obtener el NE_a a partir de los dos gráficos más cercanos y luego interpolar linealmente.

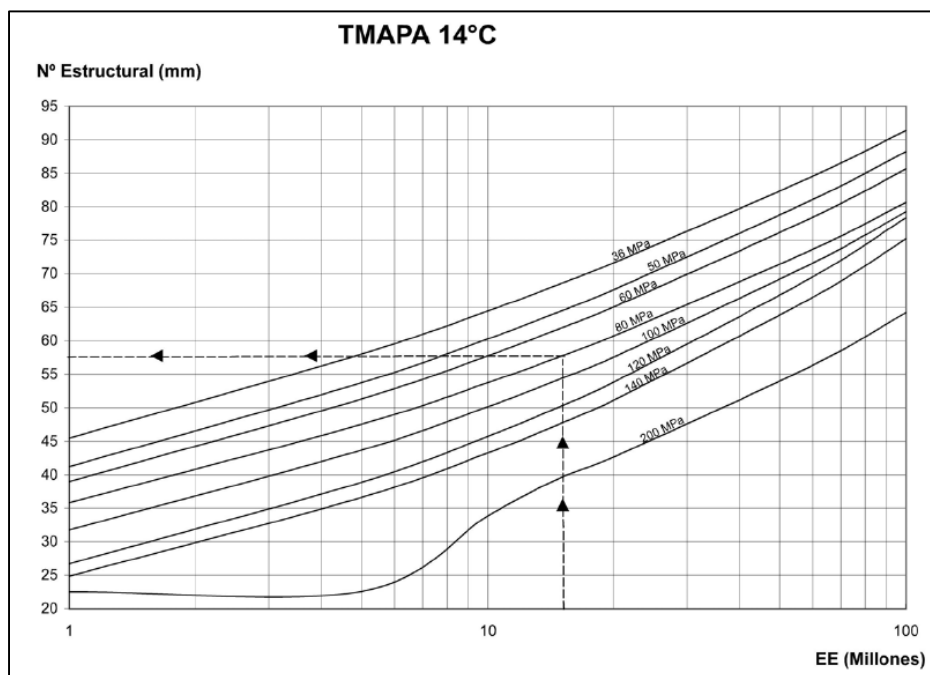


Figura A-7: Ábaco de obtención de NE mínimo de Asfalto, TMAPA 14°C (MC-V3).

• Estructuración de Capas

Existen muchas combinaciones de espesores que satisfacen el número estructural. No obstante, en el Manual de Carreteras se recomienda lo siguiente:

- El espesor mínimo de la capa asfáltica individual será de 50 mm. Las capas de rodadura de mezclas especiales (drenantes, microaglomerados y Stone Mastic Asphalt) pueden ser aplicadas utilizando espesores menores.
- El espesor mínimo de las capas granulares no ligadas será de 150 mm.
- Los espesores de las capas asfálticas se redondearán a los 5 mm superiores, mientras que los espesores de las capas no ligadas, a los 10 mm superiores. Esto con el objetivo de evitar la proliferación excesiva de diferentes diseños.
- La relación entre los módulos elásticos de dos capas no ligadas no deberá ser mayor que 4.

A.3. Método de Diseño de Pavimentos Rígidos del MC de 2017 – Tensiones de Borde y Verificación de Escalonamiento

En esta sección se incluye la determinación de las tensiones en la losa con carga de borde y métodos de verificación de escalonamiento para pavimentos con barras de traspaso de carga. No se incluye el método de verificación de carga de esquina ya que las soluciones de hormigón diseñadas con este método incluyen solamente diseños con barras de traspaso de cargas.

- **Tensión de Tracción Máxima en la Losa con Carga de Borde, Considerando el Efecto de la Temperatura.**

La tensión de tracción máxima considerando carga de borde y los efectos de temperatura, σ_t' , se determina mediante la ec. A.3:

$$\sigma_t' = \sigma_l \cdot TB \cdot F \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9} \right) \cdot b \cdot \Delta T(+) \right) \quad (A.3)$$

con:

$$\sigma_l = \frac{80.012,743}{D^2} \cdot \left[4,227 - 4,547 \cdot \left(\frac{180}{l} \right)^{0,2} - 0,00158 \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b}{k} \right)^{0,5} - 0,0308 \cdot \left(H_b \cdot \left(\frac{E_b}{E_c} \right)^{0,75} \right)^{0,5} \right] \quad (A.4)$$

$$l = 5,622 \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot D^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad [mm] \quad (A.5)$$

donde:

- D : Espesor de la Losa (mm).
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón (utilizar 29.000 MPa).
- E_b : Módulo de elasticidad de la base (MPa)
- H_b : Espesor de la base (mm)
- k : Módulo de Reacción de la Subrasante (MPa/m).
- μ : Razón de Poisson del Hormigón (salvo casos especiales utilizar 0,15).
- TB : Factor de Ajuste por tipo de Berma.
- F : Factor de ajuste por fricción (ec. A.6).

b : Factor de ajuste por longitud de losa (ec. A.7).

$$F = 1,117 - 2,457 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot E_b - 4,519 \cdot 10^{-4} \cdot D + 9,1 \cdot 10^{-5} \cdot E_b - 0,000315 \cdot f \quad (A.6)$$

$$\log b = -1,944 + 2,279 \cdot \frac{D}{l} + 91,7 \cdot \frac{L}{l} - 75718996,95 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^4} + \left(\frac{0,731}{l}\right) \cdot \left(\frac{E_b \cdot H_b^{1,5}}{k}\right)^{0,5} \quad (A-7)$$

$$-118,872 \cdot \frac{D^2}{k \cdot l^2} - 8,711 \cdot 10^{10} \cdot \frac{D^3 \cdot L}{k \cdot l^6}$$

con:

- L : Distancia entre juntas de contracción (m).
- f : Coeficiente de fricción entre la losa y la base. Para bases granulares generalmente se adopta un valor de 0,65.
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón (utilizar 29.000 MPa).

$\Delta T(+)$: Diferencial efectivo de temperatura positivo. Se define como la diferencia de temperatura entre las fibras superior e inferior de la losa, °C (ec A.8)

$$\Delta T(+) = 12,33 - \frac{2385,715}{D} + 0,707 \cdot WIND + 0,596 \cdot TEMP - 5,924 \cdot 10^{-4} \cdot PRECIP \quad (A.8)$$

con:

- WIND : Velocidad media anual del viento, nudos.
- TEMP : Temperatura media anual del ambiente, °C.
- PRECIP : Precipitación media anual, mm.

- **Tensión de Tracción Máxima en la Losa con Carga de Borde, Considerando el Efecto de la Temperatura, en las condiciones de prueba AASHO**

La tensión de tracción máxima considerando carga de borde y los efectos de temperatura en las condiciones de prueba AASHO, σ_t , se determina mediante la ec. A.9:

$$\sigma_t = \sigma_{l(AASHO)} \cdot F_{(AASHO)} \cdot \left(1,0 + \left(\frac{5}{9}\right) \cdot b_{(AASHO)} \cdot \Delta T(+)(AASHO)\right) \quad (A.9)$$

donde:

$$F_{(AASHO)} = 1,192 + 0,000497 \cdot D \quad (A.10)$$

$$\log b_{(AASHO)} = -1,944 + 0,134 \cdot D^{0,25} - 0,0137 \cdot D^{0,5} + \frac{29,0679}{D^{0,75}} - \frac{30,150}{D} - \frac{546,638}{D^{1,5}} \quad (A.11)$$

$$\Delta T(+)(AASHO) = 25,308 - \frac{2527,859}{D} \quad (A.12)$$

Valores recomendados para el factor de ajuste por tipo de berma (TB) se muestran en la Tabla A-13

Tabla A-12: Pavimentos de Hormigón AASHTO 98 - Factor de ajuste por tipo de berma (MC-V3).

Tipo de Berma	Factor TB
Borde Libre	1,00
Berma de Hormigón Amarrada	0,94
Berma de Pista ensanchada	0,92

- **Verificación del Escalonamiento con Barras de Traspaso de Carga en las Juntas**

El modelo de verificación utilizado en el método de diseño de pavimentos de hormigón adoptado en el MC-V3 está dado por la ec. A.13.

$$\begin{aligned} \text{FAULTD} = & 2,54 \cdot \text{CESAL}^{0,25} \cdot (0,0628 - 0,0628 \cdot C_d + 7,7245023 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Bstress}^2 \\ & + 4,424617 \cdot 10^{-11} \cdot \text{Jtspace}^2 + 1,4814 \cdot 10^{-10} \cdot (1,8 \cdot \text{FI} + 32)^2 \cdot \text{PRECIP}^{0,5} \\ & - 0,009503 \cdot \text{Basetype} - 0,01917 \cdot \text{Widelane} + 0,0009217 \cdot \text{Age}) \end{aligned} \quad (A.13)$$

donde:

- FAULTD : Escalonamiento promedio predicho para pavimentos de hormigón simple con juntas con barras de traspaso de carga, mm.
- CESAL : Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño, en millones.
- C_d : Coeficiente de Drenaje AASHTO Modificado (Tabla A-13)

Tabla A-13: Coeficientes de Drenaje AASHTO modificado (MC-V3).

Drenaje Longitudinal	Clima	Subrasante Suelos finos		Subrasante Suelos Granulares	
		Base No-Permeable	Base Permeable	Base No-Permeable	Base 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

Notas:

Suelos Granulares: Clasificación AASHTO A-1 a A-3

Suelos Finos: Clasificación AASHTO A-4 a A-8

Base Permeable: $k = 305$ m/día. Coeficiente de Uniformidad (C_u) ≤ 6

Clima Húmedo : Precipitación > 635 mm/año

Clima Seco: Precipitación ≤ 635 mm/año

Bstress : Tensión de compresión máxima en el hormigón debido a la flexión de la barra, en MPa (ec. A.14)

$$B_{\text{stress}} = 32,560631 \cdot f_d \cdot P \cdot T \cdot \left(\frac{K_d \cdot \left(2 + \text{BETA} \cdot \frac{\text{OPENING}}{2,54} \right)}{4 \cdot E_s \cdot I \cdot \text{BETA}^3} \right) \quad (\text{A.14})$$

$$\text{BETA} = 4,5188379 \cdot \sqrt[4]{\frac{K_d \cdot \text{DOWEL}}{4 \cdot E_s \cdot I}} \quad (\text{A.15})$$

f_d : Factor de distribución

$$f_d = \frac{2 \cdot 12}{\frac{(l/10)}{2,54} + 12} \quad (\text{A.16})$$

l : radio de rigidez relativo losa-suelo de fundación (cm).

I : Momento de inercia de una barra de transferencia de carga, mm^4 .

$$I = 0,25 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\text{DOWEL}}{2} \right)^4 \quad (\text{A.17})$$

P : Carga aplicada, 4082,56 kg.

T : Porcentaje de transferencia de carga. Adoptar 45% (0,45).

K_d : Módulo de reacción de la barra, 405 MPa/mm.

BETA : Rigidez relativa del sistema hormigón - barra

DOWEL : Diámetro de la barra, mm.

E_s : Módulo de elasticidad de la barra, MPa.

OPENING : Abertura promedio de la junta transversal, mm (ec. A.18).

$$\text{OPENING} = 0,997 \cdot \text{CON} \cdot \text{Jtspace} \cdot \left(\frac{1,08 \cdot 10^{-5} \cdot \text{TRANGE} + 1,92 \cdot 10^{-4}}{2 + e} \right) \quad (\text{A.18})$$

con:

- Jtspace : Longitud de losa promedio, cm
- CON : Factor de ajuste debido a la fricción base/losa), 0,65 para base estabilizada, 0,8 para base granular o base de hormigón pobre agrietada.
- TRANGE : Rango de temperatura anual, °C
- e : Rigidez relativa del sistema hormigón - barra
- FI : Índice de congelamiento medio anual, °C- días.
- PRECIP : Precipitación anual, mm.
- Basetype : 0 para base no estabilizada, 1 para base estabilizada
- Widelane : 0 si se trata de pista ensanchada, 1 si no se trata de pista ensanchada.
- Age : edad del pavimento, años.

ANEXO B. ESTIMACIONES EN ZONA DE ESTUDIO

- Ejes Equivalentes por Vehículo y Factores de Ejes Equivalentes Manual de Carreteras

Tipo Vehículo	Modelo	Ejes	Carga (kg)	Carga (kN)	FEE Flex.	FEE. Rig.	FEE Totales	
							Flexible	Rígido
Camión Tipo 1	Ford Cargo 1722	ESRS	5913	58	3,08	3,08	6,25	6,31
		ESRD	10800	105,9	3,17	3,23		
Camión Tipo 2	Ford Cargo 2429	ESRS	6000	58,8	3,28	3,28	4,88	6,08
		Eje Tandem	17160	168,3	1,60	2,80		
Semirremolque	Freighliner Cascadia 113 6x4 60k	ESRS	5000	49	1,54	1,54	4,57	7,77
		Eje Tandem	18000	176,5	2,00	3,60		
		Eje Tridem	22000	215,7	1,03	2,63		
Camión Menor	Mitsubishi Fuso Canter 7.5 4x2	ESRS	2500	24,5	0,09	0,09	0,12	0,12
		ESRD	3646	35,8	0,03	0,03		
Bus Transporte	Marcopolo Viaggio 1050 G7	ESRS	5650	55,4	2,55	2,55	5,72	5,78
		ESRD	10485	102,8	3,17	3,23		

- Factores de Ejes Equivalentes MC-V3

MANUAL DE CARRETERAS		FACTORES DE EJES EQUIVALENTES EJES SIMPLES - RUEDA DOBLE		3.603.202 A1
VOL. N° 3 DISEÑO				Junio 2002
RANGOS KN	FLEXIBLES		RIGIDOS	
	pf = 2,0	pf = 2,5	pf = 2,0	pf = 2,5
< 30	0,007	0,008	0,008	0,008
30 - 40	0,028	0,032	0,030	0,030
40 - 50	0,083	0,092	0,085	0,086
50 - 60	0,20	0,21	0,198	0,200
60 - 70	0,41	0,43	0,406	0,409
70 - 80	0,76	0,77	0,753	0,756
80 - 90	1,29	1,27	1,30	1,29
90 - 100	2,07	1,95	2,10	2,07
100 - 110	3,17	2,85	3,23	3,14
110 - 120	4,70	4,00	4,80	4,60
120 - 130	6,60	5,50	6,80	6,40
130 - 140	9,20	7,20	9,40	8,70
140 - 150	12,4	9,50	12,8	11,5
150 - 160	16,5	12,3	17,0	15,0
160 - 170	21,6	15,6	22,2	19,3
170 - 180	27,9	19,7	28,6	24,6
Los factores de pavimentos flexibles son para NE = 120 mm (5") y los rígidos para H = 230 mm (9")				

MANUAL DE CARRETERAS		FACTORES DE EJES EQUIVALENTES EJES DOBLES - RUEDA DOBLE		3.603.202 A2
VOL. N° 3 DISEÑO				Diciembre 2001
RANGOS KN	FLEXIBLES		RIGIDOS	
	pf = 2,0	pf = 2,5	pf = 2,0	pf = 2,5
< 50	0,004	0,004	0,008	0,008
50 - 60	0,014	0,016	0,029	0,029
60 - 70	0,03	0,03	0,06	0,06
70 - 80	0,05	0,06	0,10	0,10
80 - 90	0,09	0,10	0,17	0,17
90 - 100	0,14	0,16	0,27	0,27
100 - 110	0,22	0,24	0,41	0,41
110 - 120	0,33	0,36	0,60	0,61
120 - 130	0,47	0,50	0,86	0,86
130 - 140	0,66	0,69	1,20	1,19
140 - 150	0,89	0,92	1,63	1,61
150 - 160	1,20	1,21	2,16	2,13
160 - 170	1,60	1,50	2,80	2,70
170 - 180	2,00	2,00	3,60	3,50
180 - 190	2,60	2,40	4,60	4,40
190 - 200	3,20	3,00	5,70	5,40
200 - 210	3,90	3,60	7,10	6,60
210 - 220	4,80	4,30	8,60	7,90
220 - 230	5,80	5,10	10,50	9,50
230 - 240	7,00	6,00	12,60	11,3
240 - 250	8,40	7,00	15,00	13,30
250 - 260	9,90	8,10	17,80	15,60
260 - 270	11,7	9,30	21,00	18,2
270 - 280	13,60	10,70	24,60	21,10
280 - 290	15,90	12,30	28,70	24,50
Los factores de pavimentos flexibles son para NE = 120 mm (5") y los rígidos para H = 230 mm (9")				

MOP - DGP - DIRECCION DE VIALIDAD - CHILE

MANUAL DE CARRETERAS VOL. N° 3 DISEÑO	FACTORES DE EJES EQUIVALENTES EJES TRIPLES - RUEDA DOBLE		3.603.202 A3 Junio 2002	
RANGOS KN	FLEXIBLES		RIGIDOS	
	pf = 2,0	pf = 2,5	pf = 2,0	pf = 2,5
< 60	0,002	0,002	0,007	0,007
60 - 70	0,007	0,008	0,019	0,020
70 - 80	0,012	0,013	0,034	0,034
80 - 90	0,020	0,022	0,055	0,056
90 - 100	0,031	0,035	0,087	0,087
100 - 110	0,047	0,053	0,130	0,131
110 - 120	0,069	0,078	0,189	0,191
120 - 130	0,10	0,11	0,27	0,27
130 - 140	0,14	0,15	0,37	0,37
140 - 150	0,19	0,21	0,50	0,50
150 - 160	0,25	0,27	0,66	0,66
160 - 170	0,33	0,36	0,86	0,86
170 - 180	0,42	0,46	1,10	1,10
180 - 190	0,54	0,57	1,39	1,38
190 - 200	0,68	0,71	1,74	1,72
200 - 210	0,84	0,88	2,15	2,11
210 - 220	1,03	1,06	2,63	2,56
220 - 230	1,25	1,28	3,19	3,08
230 - 240	1,51	1,52	3,83	3,67
240 - 250	1,80	1,80	4,60	4,30
250 - 260	2,10	2,10	5,40	5,10
260 - 270	2,50	2,40	6,30	5,90
270 - 280	3,00	2,80	7,40	6,80
280 - 290	3,40	3,20	8,60	7,90
290 - 300	4,00	3,70	9,90	9,00
300 - 310	4,60	4,20	11,4	10,2
310 - 320	5,30	4,70	13,1	11,6
320 - 330	6,00	5,50	14,9	13,2
Los factores de pavimentos flexibles son para NE = 120 mm (5") y los rígidos para H = 230 mm (9")				

- **Ejes Equivalentes Acumulados en Pista de Prueba (Sin Buses)**

Año	TMDA				EE Acumulados
	Cam. Tipo 1 (Clase 5)	Cam. Tipo 2 (Clase 6)	Semirremolque (Clase 10)	Cam. Menor (Clase 5)	
2017	113	113	94	6	
2018	115	115	96	6	627.579
2019	117	117	98	6	639.045
2020	119	119	100	6	650.511
2021	121	121	102	6	661.978
2022	123	123	104	7	673.444
2023	125	125	106	7	684.911
2024	128	128	108	7	700.440
2025	131	131	110	7	715.970
2026	134	134	112	7	731.499
2027	137	137	114	7	747.029
2028	140	140	116	7	762.559
2029	143	143	118	8	778.088
2030	146	146	120	8	793.618
2031	149	149	122	8	809.149
2032	152	152	124	8	824.679
2033	155	155	126	8	840.209
2034	158	158	129	8	857.408
2035	161	161	132	9	874.607
2036	164	164	135	9	891.806
2037	167	167	138	9	909.005
TOTAL					15.173.534

- **Ejes Equivalentes Acumulados en Pista Principal Adyacente (Con Buses)**

Año	TMDA					EE Acumulados
	Cam. Tipo 1 (Clase 5)	Cam. Tipo 2 (Clase 6)	Semirremolque (Clase 10)	Cam. Menor (Clase 5)	Buses (Clase 4)	
2017	113	113	94	6	293	
2018	115	115	96	6	296	1.245.567
2019	117	117	98	6	299	1.263.297
2020	119	119	100	6	302	1.281.027
2021	121	121	102	6	305	1.298.757
2022	123	123	104	7	308	1.316.487
2023	125	125	106	7	311	1.334.217
2024	128	128	108	7	314	1.356.010
2025	131	131	110	7	317	1.377.802
2026	134	134	112	7	320	1.399.595
2027	137	137	114	7	323	1.421.388
2028	140	140	116	7	326	1.443.181
2029	143	143	118	8	329	1.464.975
2030	146	146	120	8	332	1.486.768
2031	149	149	122	8	335	1.508.562
2032	152	152	124	8	338	1.530.355
2033	155	155	126	8	341	1.552.149
2034	158	158	129	8	344	1.575.611
2035	161	161	132	9	347	1.599.073
2036	164	164	135	9	350	1.622.536
2037	167	167	138	9	354	1.648.086
TOTAL						28.725.443

- **Relleno Temperaturas Medias Mensuales Barahona**

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2009	18,8	17,8	17,8	16,5	12,0	9,2	6,3	8,3	7,0	11,6	12,0	16,0
2010	18,5	17,3	16,9	13,0	10,6	6,8	3,6	7,8	8,7	11,6	13,9*	15,2
2011	17,6	17,6	15,2	13,1	12,3	6,7	5,3	5,3	11,0	10,7	15,8*	19,2*
2012	17,8*	16,7*	18,1*	13,4	11,7	8,8	7,6	7,1	12,1	10,9	15,8*	14,8
2013	19,0	17,6	15,6	13,6	9,7	9,2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2014	18,5	16,9	15,5	12,6	9,6	6,7	7,7	9,6	9,0	14,0	14,6	16,7
2015	20,1	18,6	18,4	16,2	12,5	11,0	8,8	8,9	9,8	9,6	13,3	17,8
2016	18,7	23,7*	18,1*	12,0	10,9	9,1	7,9	10,9	13,2	11,8	16,0	17,2
2017	20,7	19,0	16,0	12,1	8,9	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	18,9	18,4	16,9	13,6	10,9	8,4	6,7	8,3	10,1	11,5	14,5	16,7
Est. Usada	Colón	Colón	Colón	-	-	-	-	Colón	Colón	Colón y E. Sapo	Colón y E. Sapo	E. Sapo

(*): Datos Rellenados con Correlación.

N/A: Sin Datos en la estación ni en las estaciones vecinas.

- **Correlaciones Mensuales Barahona - Colón**

Mes	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Pendiente	1,400	4,146	1,008	0,554	0,704	1,137	0,762	1,049	0,917	0,531	1,135	1,461
Intercepto	-4,508	-49,009	1,050	6,479	3,556	-0,531	2,497	0,971	2,386	6,461	0,873	-4,184
R ²	0,970	0,998	0,999	0,739	0,671	0,875	0,360	0,903	0,954	0,714	0,910	0,944

- **Correlaciones Mensuales Barahona – Embalse El Sapo**

Mes	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Pendiente	1,332	1,758	1,336	0,983	0,919	1,163	0,978	0,931	0,908	0,796	1,140	1,362
Intercepto	-2,242	-8,342	-1,856	3,060	3,706	2,872	4,401	4,301	4,437	4,886	1,815	-1,611
R ²	0,946	0,369	0,843	0,904	0,892	0,958	0,923	0,847	0,948	0,949	0,938	0,989

• **Temperaturas Medias Mensuales Barahona (Sin Rellenar)**

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2009	18,8	17,8	17,8	16,5	12,0	9,2	6,3	8,3	7,0	11,6	12,0	16,0
2010	18,5	17,3	16,9	13,0	10,6	6,8	3,6	d/i	s/d	s/d	s/d	15,2
2011	17,6	17,6	15,2	13,1	12,3	6,7	5,3	5,3	11,0	10,7	s/d	s/d
2012	s/d	s/d	d/i	13,4	11,7	8,8	7,6	7,1	d/i	s/d	d/i	14,8
2013	19,0	17,6	15,6	13,6	9,7	9,2	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d	d/i
2014	18,5	16,9	15,5	12,6	9,6	6,7	7,7	9,6	9,0	14,0	14,6	16,7
2015	20,1	18,6	18,4	16,2	12,5	11,0	8,8	8,9	9,8	9,6	13,3	17,8
2016	18,7	d/i	d/i	12,0	10,9	9,1	7,9	10,9	13,2	11,8	16,0	17,2
2017	20,7	19,0	16,0	12,1	8,9	-	-	-	-	-	-	-

• **Días con Precipitaciones Menores a 0°C Estación Barahona**

AÑO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	TOTAL
2009			3	49,5	21,5	53,5			127,5
2010		11,5	39,5	212,5	d/i	s/d	s/d	s/d	263,5
2011			25	133	95,5	14	2	s/d	269,5
2012			15,5	65	54,5	d/i	s/d	d/i	135
2013		8,5	8	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d	16,5
2014		7	88	46,5	22	6			169,5
2015			4,5	8		7	4		23,5
2016	7,5			12,5	9,5	11,5	4	4,5	49,5
2017		8,5	-	-	-	-	-	-	8,5

s/d: Sin datos en todo el mes.

d/i: Datos insuficientes

(-): Periodo Posterior a recopilación de información.

• **Temperaturas Medias Mensuales Estación Colón**

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2009	16,7	16,1	16,6	15,9	11,2	8,6	5,5	7,3	5,5	10,2	10,3	14,1
2010	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	d/i	6,6	6,8	10,0	11,8	13,2
2011	15,7	16,1	14,0	12,7	12,5	6,3	4,9	4,3	9,9	6,9	13,1	16,0
2012	16,0	15,8	16,9	12,8	11,3	8,3	7,5	6,3	10,6	8,4	13,2	d/i
2013	s/d	s/d	d/i	13,5	10,2	8,8	7,7	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d
2014	s/d	s/d	s/d	12,5	9,0	6,7	7,3	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d
2015	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	6,0	6,5	7,2	7,1	10,4	14,9
2016	16,8	17,5	16,9	8,1	9,3	7,8	6,3	9,5	11,7	9,4	13,3	14,6
2017	17,9	16,4	14,9	11,1	d/i	-	-	-	-	-	-	-

• **Días con Precipitaciones Menores a 0°C Estación Colón**

AÑO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
2009			33	68,5	73	126,5	0,5			301,5
2010	s/d	s/d	s/d	d/i	66,5	62	23,5	17,5	9,5	179
2011			55	180,5	173,5	29,5	140			578,5
2012	4,5		14,5	72	61,5	15,5	10		d/i	178
2013		4,5	21,5	50	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d	76
2014		24,5	131,5	108,5	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d	264,5
2015	s/d	s/d	s/d	61	53,5	33,5	40	8,5		196,5
2016	104	2,5	26,5	41	16,5	16,5	11,5	6		224,5
2017	0,5	d/i	-	-	-	-	-	-	-	0,5

s/d: Sin datos en todo el mes.

d/i: Datos insuficientes

(-): Periodo Posterior a recopilación de información.

- Temperaras Medias Mensuales Embalse El Sapo**

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2009	s/d	s/d	s/d	d/i	9,1	5,5	2,1	4,1	2,9	8,6	9,3	13,0
2010	15,8	14,9	14,4	10,7	7,3	3,7	-0,9	3,3	4,6	8,4	10,6	12,3
2011	14,7	15,0	12,6	10,5	9,8	3,4	1,2	1,8	7,4	7,9	12,2	15,3
2012	15,6	14,8	d/i	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d
2013	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d
2014	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	3,2	3,9	6,7	5,8	11,4	11,4	13,5
2015	16,6	14,9	14,7	12,9	9,1	7,2	3,4	3,8	5,1	5,8	9,6	14,2
2016	16,0	s/d	15,3	8,4	7,3	4,8	3,8	6,5	9,5	8,1	12,3	13,8
2017	17,1	15,5	13,7	9,5	6,2	-	-	-	-	-	-	-

s/d: Sin datos en todo el mes.

d/i: Datos insuficientes

(-): Periodo Posterior a recopilación de información.

- Precipitaciones Acumuladas Estación Barahona**

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2009	0,0	0,0	0,0	0,6	57,2	232,1	44,5	255,3	255,3	49,5	0,1	0,0
2010	0,0	0,2	1,5	3,4	103,2	241,3	65,1	6,1*	38,2*	12,4*	78,1*	8,7
2011	0,0	3,4	8,3	56,1	0,0	219,3	84,8	110,6	25,9	27,9	0,0*	0,0*
2012	0,5*	0,4*	0,2*	63,8	185,7	357,4	47,5	77,1	3,3*	61,1*	0,3*	116,0
2013	0,8	0,0	0,0	0,0	309,8	58,9	13,8*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2014	0,1	0,0	5,7	8,5	73,3	114,9	106,5	126,9	97,0	10,7	21,5	7,0
2015	0,1	12,8	51,5	0,0	13,5	0,6	43,5	336,5	111,8	202,2	36,9	0,0
2016	17,9	0,0*	0,0*	584,2	119,9	110,9	158,4	1,4	0,0	74,9	13,8	29,9
2017	0,0	0,0	0,1	92,8	121,4	-	-	-	-	-	-	-

• **Días con Precipitación Acumulada sobre 5 mm, Estación Barahona**

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
2009	0	0	0	0	2	7	4	8	5	2	0	0	28
2010	0	0	0	0	4	8	5	1*	3*	1*	2*	1	25
2011	0	0	1	2	0	6	6	7	3	2	0*	0*	27
2012	0*	0*	0*	2	3	9	5	5	0*	3*	0*	3	30
2013	0	0	0	0	8	4	1*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-
2014	0	0	1	1	6	8	3	7	4	1	1	1	33
2015	0	1	2	0	1	0	3	11	3	4	1		26
2016	1	0*	0*	7	5	3	5	0	0	2	1	2	26
2017	0	0	0	2	5	-	-	-	-	-	-	-	-

(*): Datos Rellenados mediante promedio aritmético entre valores de estaciones vecinas.

N/A: Sin Datos en la estación ni en las estaciones vecinas.

- **Humedad Relativa Estación Barahona**

Humedad Relativa Barahona 2014-2017 (%)						
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Noviembre	Diciembre
2014	68,0	65,2	62,4	49,7	69,1	74,4
2015	66,3	69,2	64,9	50,6	82,7	72,1
2016	80,6	s/d	s/d	77,7	71,9	76,6
2017	65,6	73,8	66,8	73,5	-	-
Promedio	70,1	69,4	64,7	62,9	74,6	74,3

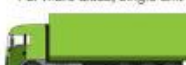
- **Velocidad Máxima del Viento Estación Barahona**

Velocidad Máxima del Viento 2014-2017 (m/s)						
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Noviembre	Diciembre
2014	3,5	3,5	3,4	2,7	3,4	3,3
2015	3,3	3,2	3,0	2,6	3,5	3,4
2016	3,4	s/d	s/d	3,9	3,5	3,5
2017	3,4	3,4	3,2	2,9	-	-
MAXIMO	3,5	3,5	3,4	3,9	3,5	3,5

ANEXO C. PARÁMETROS MEPDG

C.1. Caracterización del Tránsito de la FHWA

- Clasificación de Vehículos de la FHWA

1. Motorcycles 2 axles, 2 or 3 tires 	2. Passenger Cars 2 axles, can have 1- or 2-axle trailers 	3. Pickups, Panels, Vans 2 axles, 4-tire single units Can have 1 or 2 axle trailers 	4. Buses 2 or 3 axles, full length 
5. Single Unit 2-Axle Trucks 2 axles, 6 tires (dual rear tires), single-unit 	6. Single Unit 3-Axle Trucks 3 axles, single unit 	7. Single Unit 4 or More-Axle Trucks 4 or more axles, single unit 	8. Single Trailer 3- or 4-Axle Trucks 3 or 4 axles, single trailer 
9. Single Trailer 5-Axle Trucks 5 axles, single trailer 	10. Single Trailer 6 or More-Axle Trucks 6 or more axles, single trailer 	  	
11. Multi-Trailer 5 or Less-Axle Trucks 5 or less axles, multiple trailers 	12. Multi-Trailer 6-Axle Trucks 6 axles, multiple trailers 		
13. Multi-Trailer 7 or More-Axle Trucks 7 or more axles, multiple trailers 			

Fuente: (Documentación y Guía de Diseño OptiPave 2, 2014)

- **Clasificación de Tipos de Tráfico de la FHWA**

Grupo TTC	Descripción TTC	Distribución por tipo de vehículo (Porcentaje)									
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple (Tipo I)	1,3	8,5	2,8	0,3	7,6	74,0	1,2	3,4	0,6	0,3
2	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple (Tipo II)	2.4	14.1	4.5	0.7	7.9	66.3	1.4	2.2	0.3	0.2
3	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple y remolque múltiple (Tipo I)	0.9	11.6	3.6	0.2	6.7	62.0	4.8	2.6	1.4	6.2
4	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple (Tipo III)	2.4	22.7	5.7	1.4	8.1	55.5	1.7	2.2	0.2	0.4
5	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple y remolque múltiple (Tipo II)	0.9	14.2	3.5	0.6	6.9	54.0	5.0	2.7	1.2	11.0
6	Ruta intermedia camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo I)	2.8	31.0	7.3	0.8	9.3	44.8	2.3	1.0	0.4	0.3
7	Ruta Principalmente camiones mixtos (Tipo I)	1.0	23.8	4.2	0.5	10.2	42.2	5.8	2.6	1.3	8.4
8	Ruta principalmente camiones con remolques múltiples (Tipo I)	1.7	19.3	4.6	0.9	6.7	44.8	6.0	2.6	1.6	11.8
9	Ruta intermedia camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo II)	3.3	34.0	11.7	1.6	9.9	36.2	1.0	1.8	0.2	0.3
10	Ruta Principalmente camiones mixtos (Tipo II)	0.8	30.8	6.9	0.1	7.8	37.5	3.7	1.2	4.5	6.7
11	Ruta Principalmente camiones con remolques múltiples (Tipo II)	1.8	24.6	7.6	0.5	5.0	31.3	9.8	0.8	3.3	15.3
12	Ruta intermedia camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo III)	3.9	40.8	11.7	1.5	12.2	25.0	2.7	0.6	0.3	1.3
13	Ruta Principalmente camiones mixtos (Tipo III)	0.8	33.6	6.2	0.1	7.9	26.0	10.5	1.4	3.2	10.3
14	Ruta Principalmente de camiones livianos (Tipo I)	2.9	56.9	10.4	3.7	9.2	15.3	0.6	0.3	0.4	0.3
15	Ruta Principalmente de camiones livianos (Tipo II)	1.8	56.5	8.5	1.8	6.2	14.1	5.4	0.0	0.0	5.7
16	Ruta principalmente camiones livianos y múltiples remolques.	1.3	48.4	10.8	1.9	6.7	13.4	4.3	0.5	0.1	12.6
17	Ruta Predominada por Buses	36.2	14.6	13.4	0.5	14.6	17.8	0.5	0.8	0.1	1.5

Fuente: (Documentación y Guía de Diseño OptiPave 2, 2014)

C.2. Especificaciones Agregados Pétreos

- Especificaciones Límites de Consistencia Bases y Subbases (MC-V8)

TABLA 8.101.1.A LÍMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG		
	Límite Líquido	Índice de Plasticidad
Subbase	Máx. 35	Máx. 8
Base Estabilizada	Máx. 25	Máx. 6 (Ver 4.1)
Capa de Rodadura		
- Regiones I a III	Máx. 35	5 - 10
- Regiones IV a VI	Máx. 35	4 - 9
- Regiones VII a X	Máx. 35	3 - 8
- Regiones XI a XII	Máx. 35	Máx. 7

- Especificaciones Granulometrías Bases y Subbases (MC-V8)

TABLA 8.101.1.B BANDAS GRANULOMETRICAS PARA SUBBASE, BASES Y CAPAS DE RODADURA							
Tamiz (mm)	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70 - 100	-	100	100	100	
25	55 - 100	55 - 85	70 - 100	70 - 100	80 - 100	80 - 100	100
20	-	45 - 75	60 - 90	50 - 80	-	-	70 - 100
10	30 - 75	35 - 65	40 - 75	25 - 50	50 - 80	50 - 80	50 - 80
5	20 - 65	25 - 55	30 - 60	10 - 30	35 - 65	35 - 65	35 - 65
2.5	-	-	-	5 - 15	-	-	-
2	10 - 50	15 - 45	15 - 45	-	25 - 50	25 - 50	25 - 50
0,5	5 - 30	5 - 25	10 - 30	0 - 5	10 - 30	15 - 30	10 - 30
0,08	0 - 20	0 - 10	0 - 15	0 - 3	5 - 15	5 - 20	0 - 15

- Bandas Granulométricas para Asfaltos MC-V5 (Granulometría Semidensa)

TABLA 5.408.201.F GRANULOMETRIA DE ARIDOS: GRANULOMETRIA SEMIDENSA			
DENOMINACION		IV - A - 12	IV - A - 20
TAMICES (mm)	(ASTM)	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO	
25	(1")		100
20	(3/4")	100	80 - 95
12,5	(1/2")	80 - 95	65 - 80
10	(3/8")	70 - 85	57 - 73
5	(N° 4)	43 - 58	40 - 55
2,5	(N° 8)	28 - 42	28 - 42
0,63	(N° 30)	13 - 24	13 - 24
0,315	(N° 50)	8 - 17	8 - 17
0,16	(N° 100)	6 - 12	6 - 12
0,08	(N° 200)	4 - 8	4 - 8

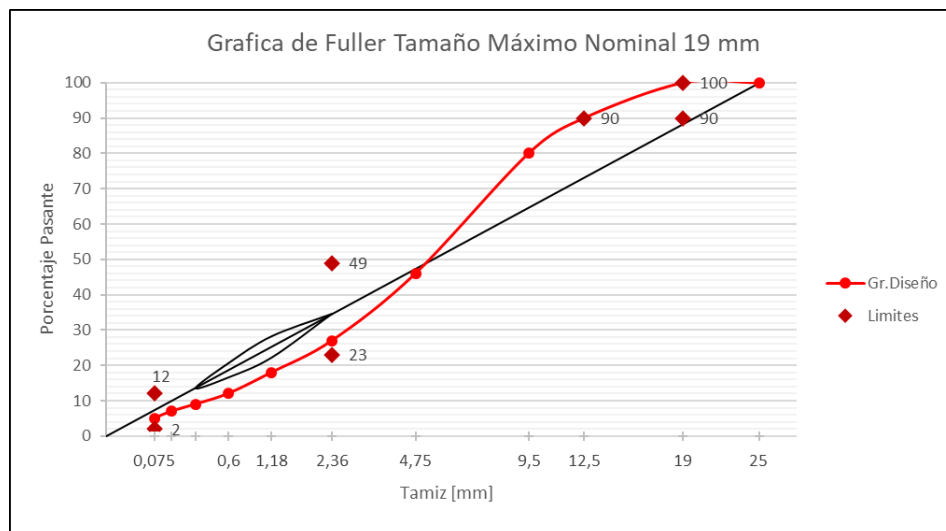
- **Bandas Granulométricas para Asfaltos MC-V5 (Granulometría Gruesa)**

DENOMINACION	III - 10	III - 12a	III - 12b	III - 20
TAMICES (mm) (ASTM)	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO			
25 (1")				100
20 (3/4")		100	100	75 - 100
12,5 (1/2")	100	75 - 100	75 - 100	—
10 (3/8")	75 - 100	60 - 85	60 - 85	45 - 70
5 (Nº 4)	35 - 55	35 - 55	30 - 50	30 - 50
2,5 (Nº 8)	20 - 35	20 - 35	20 - 35	20 - 35
0,63 (Nº 30)	10 - 22	10 - 22	5 - 20	5 - 20
0,315 (Nº 50)	6 - 16	6 - 16	3 - 12	3 - 12
0,16 (Nº 100)	4 - 12	4 - 12	2 - 8	2 - 8
0,08 (Nº 200)	2 - 8	2 - 8	0 - 4	0 - 4

- **Especificación Gráfica de Fuller para Mezclas SUPERPAVE Tamaño Máximo 19 mm**

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25,0		100,0		
19,0	90,0	100,0		
12,5		90,0		
2,36	23,0	49,0	34,6	34,6
1,18			22,3	28,3
0,600			16,7	20,7
0,300			13,7	13,7
0,075	2,0	8,0		

- **Granulometría Adoptada para Mezclas Asfálticas SUPERPAVE según Gráfica de Fuller**



ANEXO D. INFORMES Y CERTIFICADOS

• Informe de Ensayo Mecánica de Suelos km 41 (Pista de Prueba)

SISA Ltda.		SERVICIOS DE INGENIERIA Y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA.		SISTEMA NACIONAL DE ACREDITACION	
LABORATORIO DE ENSAYOS - MECANICA DE SUELOS		LE 1249 - LE 1250 - LE 1251 - LE 1252		COD: FT-SISA-SU-022	
FECHA REVISIÓN 08-08-2017	Página 1 de 1	Nº DE INFORME	13102	Nº CONTROL	4420
REVISIÓN 12					
1. ANTECEDENTES GENERALES					
OBRA	PAVIMENTACION PRUEBA KM 41000			ATENCIÓN Sr.(a)	LUIS CORTES
SOLICITANTE	XTREME MINING LTDA			COTIZACIÓN Nº	--
Nº SISA	106			FECHA DE EMISIÓN	18/12/2017
DIRECCIÓN DE LA OBRA	CODELCO VARIANTE CALETONES Y COLON				
2. ANTECEDENTES DE LA MUESTRA					
LUGAR DE MUESTREO	KM 41 CODELCO			MÉTODO DE MUEST.	Nch 164.E Of 76
PROCEDENCIA MATERIAL	CALICATA 2			ENSAYADO POR	DANIEL PEREZ J.
EFFECTUADO POR	SISA LTDA. - MIGUEL PÉREZ S.			FECHA RECEPCIÓN	16/11/2017
TIPO DE M./EMPLEADO EN	SUELO NATURAL/OTROS			FECHA MUESTREO	16/11/2017
3. RESULTADOS					
DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRIA MC 8.102.1 MC-V8 2014 (LE 1249)		COMPACTACIÓN METODO PROCTOR MODIFICADO - Nch 1534/2 OF 1979 - (LE 1249)		LIMITES DE ATTERBERG - Nch 1517/1 Of 79 y Nch 1517/2 Of 79 - (LE 1249)	
TAMICES	FECHA ENSAYO	18/11/2017	FECHA DE ENSAYO	18/11/2017	FECHA DE ENSAYO
ASTM	NCH (mm)	PASA (%)	Densidad Máxima Compactada Seca DMCS (g/cm3)	2,08	Límite Líquido (%)
6"	150	--	Densidad Máxima Compactada Húmeda DMCH (g/cm3)	2,28	Límite Plástico (%)
5"	125	--	Humedad Optima (%)	9,8	Índice de plasticidad
4"	100	100	Método Modificado (A,B,C,D)	D	Tipo de Acanalador
3"	80	93	Material retenido en malla 3/4" (%)	60	Método de ensayo
2 1/2"	63	86	DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD - Nch 1515 Of. 1979 (LE 1249)		DENSIDAD DE PARTICULAS SOLIDAS - Nch 1532 Of 1980 - (LE1249)
2"	50	78	FECHA DE ENSAYO		18/11/2017+N80
1 1/2"	40	69	Humedad (%)		6,9
1"	25	49	CUBICIDAD DE PARTICULAS - 8.202.6 MC-V8 2014 - (LE 1251)		FECHA DE ENSAYO
3/4"	20	40	FECHA DE ENSAYO		--
3/8"	10	27	Chancado (%)		--
Nº 4	5	17	Rodado (%)		--
Nº 10	2	11	Laja (%)		--
Nº 40	0,5	5	FECHA DE ENSAYO		--
Nº 200	0,08	4	FECHA DE ENSAYO		--
4. RAZON DE SOPOTE C.B.R - Nch 1853 OF 1981 - LE (1249)					
ANTECEDENTES DE ENSAYO DE SOPORTE C.B.R		PROBETAS 56 GOLPES		PROBETAS 25 GOLPES	
Densidad seca de la muestra antes de la inmersión (g/cm3)		2,07		1,94	
Densidad seca de la muestra después de la inmersión (g/cm3)		2,39		2,26	
1. Humedad de la muestra		9,2		9,5	
1.1. Antes de la compactación (%)		9,6		9,4	
1.2. Después de la compactación (%)		14,0		15,8	
1.3. Capa superior 25 mm después de la inmersión (%)		9,4		11,1	
Promedio después de la inmersión (%)		0,09		0,33	
Expansión (%)		85		41	
Razón de soporte de la muestra (%)		18		14	
Sobrecarga		--		--	
Observaciones		SUMERGIDA		SUMERGIDA	
Acondicionamiento de la muestra		SUMERGIDA		SUMERGIDA	
Penetración al 95% Proctor (%)		48		48	
FECHA DE ENSAYO		18/11/2017		18/11/2017	
CLASIFICACIÓN DE SUELO AASTHO - ASTM D 3282-2009*		CLASIFICACIÓN USCS - ASTM D 2487 - 2011*		CLASIFICACIÓN	
FECHA DE ENSAYO		18/11/2017		18/11/2017	
CLASIFICACIÓN		A-2-6 (0)		GW	
DESGASTE LOS ANGELES - Nch 1369:2010*		DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA EN SUELOS NO COHESIVOS - Nch 1726 OF 1980*		Tamaño molde	
FECHA DE ENSAYO		FECHA DE ENSAYO		--	
Grado de ensayo (Nº)		Método empleado para densidad mínima		Densidad mínima (g/cm3)	
Perdida de masa de la muestra (%)		Método empleado para densidad máxima		Densidad máxima (g/cm3)	
SALES SOLUBLES - 8.202.14 (MC-V8) 2014*		EQUIVALENTE DE ARENA - 1325 OF 2010		OBSERVACIONES	
FECHA DE ENSAYO		FECHA DE ENSAYO		--	
Sales solubles (%)		--		SIN OBSERVACIONES	
* Los ensayos marcados no están incluidos en el alcance de acreditación					
MIGUEL IGNACIO PEREZ VIDAL		MIGUEL ANGEL PEREZ SOTO			
JEFE DE CALIDAD		JEFE DE LABORATORIO			
SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones.					
Dirección: Sargento Aldea #128, Población San Francisco, Rancagua. Teléfonos: (72) 2225490 Celular (9) 84183775 E-mail: contacto@sisalimitada.cl					

• Informes Ensayos de Hormigón – Ensayos de Laboratorio

SISA Ltda.		SERVICIOS DE INGENIERIA Y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA. LABORATORIO DE ENSAYOS		FT-SISA-HO-004 REVISIÓN II Fecha revisión 29/08/2017 Página 1 de 1	
Emisión de Informe Rancagua, 05/12/2017		INFORME N° 24516		CONTROL N° 4516	
SISA Ltda. Servicios de Ingeniería y Servicios Asociados		Hormigón			
OBRA		PRUEBA DE LABORATORIO			
DIRECCIÓN		POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTO ALDEA N° 128 RANCAGUA			
SISA N°		106			
SOLICITANTE		LUIS CORTES			
CORRELATIVO		6			
EMPRESA CONSTRUCTORA		XTREME MINING LTDA			
MATERIA		RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO			
MUESTREO		MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.			
ANÁLISIS		EFECTUADO POR SISA LTDA.			
REFERENCIA		M-6			
1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)					
Serie Muestra	4388	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	24 de noviembre de 2017
2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)					
Procedimiento de Curado		CAMARA HUMEDA			
Grado del Hormigón		H 50			
Resistencia Especificada (Mpa.)		50 (Mpa.) en cubo de 20 (cm.) a 28 días			
Tipo del Hormigón		H 50(90)20-10			
Procedencia del Hormigón		INSITU			
N° Guía de Despacho		No informada			
Docilidad del Hormigón (cm.)		8,5			
Volumen Amasada (m³)		0,014			
Elemento Hormigonado		HM C I			
Ubicación		No informada			
Faja / Lado		No informada			
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh:mm)		25,7 °C / 27,8 °C / 16,00			
Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.					
3. Resistencia a la Compresión (NCh 1037 Of. 2009)					
N° Probeta	1	2	3	-	-
Tipo Probeta	CILINDRO	CILINDRO	CILINDRO	-	-
Fecha de Ensayo	25-nov-17	25-nov-17	25-nov-17	-	-
Edad al Ensayar (días)	1	1	1	-	-
Área (cm²)	176,71	176,71	176,71	-	-
Carga Máxima (kN)	381	411	421	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.451	2.346	2.450	-	-
Resistencia Individual (Kg/cm²)	270	287	293	-	-
Resistencia Individual (Mpa.)	26,5	28,1	28,7	-	-
Resistencia Promedio (Mpa.)	27,7				
Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal					
4. Observaciones relativas al hormigon después de la rotura					
N° Probeta	1	2	3	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-
5. Características generales de las probetas - Observaciones					
Sin Observaciones					
MIGUEL IGNACIO PÉREZ S. Jefe de Calidad			MIGUEL ANGEL PÉREZ S. Jefe de Laboratorio		
SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones					

INFORME DE ENSAYOS

Hormigón

FT-SISA-HO-004
REVISIÓN 11
Fecha revisión 29/08/2017
Página 1 de 1



Emisión de Informe
Rancagua, 05/12/2017

INFORME N° 24515

CONTROL N° 4516

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTO ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	5
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA.
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREADO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-5

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4387	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	24 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	H 50
Resistencia Especificada (Mpa.)	50 (Mpa.) en cubo de 20 (cm.) a 28 días
Tipo del Hormigón	H 50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	8,5
Volumen Amasada (m³)	0,014
Elemento Hormigonado	HM C 2
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	25,7 °C / 27,8 °C / 16.00

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia a la Compresión (NCh 1037 Of. 2009)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	CILINDRO	CILINDRO	CILINDRO	-	-	-
Fecha de Ensayo	26-nov-17	26-nov-17	26-nov-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	2	2	2	-	-	-
Área (cm²)	176,71	176,71	176,71	-	-	-
Carga Máxima (kN)	568	587	617	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.438	2.471	2.447	-	-	-
Resistencia Individual (Kg/cm²)	378	389	406	-	-	-
Resistencia Individual (Mpa.)	37,1	38,1	39,8	-	-	-
Resistencia Promedio (Mpa.)	38,3					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL IGNACIO PÉREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones



Servicios de Ingeniería y Servicios Asociados

SERVICIOS DE INGENIERIA Y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA.
LABORATORIO DE ENSAYOS

INFORME DE ENSAYOS

Hormigón

FT-SISA-HO-004

REVISIÓN 11

Fecha revisión 29/08/2017

Página 1 de 1



Emisión de Informe
Rancagua, 05/12/2017

INFORME N° 24514

CONTROL N° 4516

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTO ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	4
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-4

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4386	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	24 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	H 50
Resistencia Especificada (Mpa.)	50 (Mpa.) en cubo de 20 (cm.) a 28 días
Tipo del Hormigón	H 50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	8,5
Volumen Amasado (m³)	0,014
Elemento Hormigonado	HM C 3
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	25,7 °C / 27,8 °C / 16.00

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia a la Compresión (NCh 1037 Of. 2009)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	CILINDRO	CILINDRO	CILINDRO	-	-	-
Fecha de Ensayo	27-nov-17	27-nov-17	27-nov-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	3	3	3	-	-	-
Área (cm²)	176,71	176,71	176,71	-	-	-
Carga Máxima (kN)	666	676	685	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.430	2.453	2.477	-	-	-
Resistencia Individual (Kg/cm²)	434	440	445	-	-	-
Resistencia Individual (Mpa.)	42,6	43,1	43,6	-	-	-
Resistencia Promedio (Mpa.)	43,0					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL IGNACIO PÉREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones

INFORME DE ENSAYOS

Hormigón

FT-SISA-HO-004
REVISIÓN 11
Fecha revisión 29/08/2017
Página 1 de 1



Emisión de Informe
Rancagua, 05/12/2017

INFORME N° 24511

CONTROL N° 4516

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTO ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	3
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREADO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-3

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4383	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	24 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	H 50
Resistencia Especificada (Mpa.)	50 (Mpa.) en cubo de 20 (cm.) a 28 días
Tipo del Hormigón	H 50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	8,5
Volumen Amasado (m³)	0,014
Elemento Hormigonado	HM C 4
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	25,7 °C / 27,8 °C / 16.00

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia a la Compresión (NCh 1037 Of. 2009)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	CILINDRO	CILINDRO	CILINDRO	-	-	-
Fecha de Ensayo	1-dic-17	1-dic-17	1-dic-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	7	7	7	-	-	-
Área (cm²)	176,71	176,71	176,71	-	-	-
Carga Máxima (kN)	685	695	725	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.449	2.454	2.439	-	-	-
Resistencia Individual (Kg/cm²)	445	451	468	-	-	-
Resistencia Individual (Mpa.)	43,6	44,2	45,9	-	-	-
Resistencia Promedio (Mpa.)	45,0					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL IGNACIO PÉREZ
Jefe de Calidad

MIGUEL ANGEL PÉREZ
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones

INFORME DE ENSAYOS

Flexotracción

FT-SISA-HO-019

REVISIÓN 01

01/12/2017

Página 1 de 1

Emisión de Informe
Rancagua, 14/12/2017

INFORME N° 24506

CONTROL N° 4517

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTE ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	7
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-7

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4378	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	26 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	HN 50
Tipo del Hormigón	HN50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	9,0
Volumen Amasado (m³)	0,771
Elemento Hormigonado	HM V 1
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	No informada

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia de Ensayo de tracción por flexión (NCh 1038 Of. 1977)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	PRISMATICA	PRISMATICA	PRISMATICA	-	-	-
Fecha de Ensayo	27-nov-17	27-nov-17	27-nov-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	1	1	1	-	-	-
Altura media (mm)	150,00	150,00	150,00	-	-	-
Ancho medio (mm)	150,00	150,00	150,00	0,00	0,00	0,00
Luz de ensayo	450					
Carga Máxima (N)	22000	22000	21000	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.407	2.394	2.411	-	-	-
Resistencia Individual (N/mm² o Mpa)	2,9	2,9	2,8	-	-	-
Resistencia Promedio (N/mm² o Mpa)	2,8					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Quedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL IGNACIO PEREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ANGEL PEREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones

INFORME DE ENSAYOS

Flexotracción

FT-SISA-HO-019
REVISIÓN 01
01/12/2017
Página 1 de 1



Emisión de Informe
Rancagua, 14/12/2017

INFORME N° 24507

CONTROL N° 4517

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTO ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	8
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-8

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4379	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	26 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	HN 50
Tipo del Hormigón	HN50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	9,0
Volumen Amasado (m³)	0,771
Elemento Hormigonado	HM V 2
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	No informada

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia de Ensayo de tracción por flexión (NCh 1038 Of. 1977)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	PRISMATICA	PRISMATICA	PRISMATICA	-	-	-
Fecha de Ensayo	28-nov-17	28-nov-17	28-nov-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	2	2	2	-	-	-
Altura media (mm)	150,00	150,00	150,00	-	-	-
Ancho medio (mm)	150,00	150,00	150,00	0,00	0,00	0,00
Luz de ensayo	450					
Carga Máxima (N)	25000	25000	24000	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.394	2.356	2.398	-	-	-
Resistencia Individual (N/mm² o Mpa)	3,3	3,3	3,2	-	-	-
Resistencia Promedio (N/mm² o Mpa)	3,2					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL IGNACIO PEREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ANGEL PÉREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones



Servicios de Ingeniería y Servicios Asociados

SERVICIOS DE INGENIERIA Y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA.
LABORATORIO DE ENSAYOS

INFORME DE ENSAYOS

Flexotracción

FT-SISA-HO-019

REVISIÓN 01

01/12/2017

Página 1 de 1



Emisión de Informe
Rancagua, 14/12/2017

INFORME N° 24509

CONTROL N° 4517

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTO ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	9
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-9

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4381	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	26 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	HN 50
Tipo del Hormigón	HN50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	9,0
Volumen Amasado (m³)	0,771
Elemento Hormigonado	HM V 3
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	No informada

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia de Ensayo de tracción por flexión (NCh 1038 Of. 1977)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	PRISMATICA	PRISMATICA	PRISMATICA	-	-	-
Fecha de Ensayo	29-nov-17	29-nov-17	29-nov-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	3	3	3	-	-	-
Altura media (mm)	150,00	150,00	150,00	-	-	-
Ancho medio (mm)	150,00	150,00	150,00	0,00	0,00	0,00
Luz de ensayo	450					
Carga Máxima (N)	27000	27000	26000	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.465	2.147	2.412	-	-	-
Resistencia Individual (N/mm2 o Mpa)	3,6	3,6	3,5	-	-	-
Resistencia Promedio (N/mm2 o Mpa)	3,5					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL ANGEL PÉREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ANGEL PÉREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones



Servicios de Ingeniería y Servicios Asociados

SERVICIOS DE INGENIERIA Y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA.
LABORATORIO DE ENSAYOS

INFORME DE ENSAYOS

Flexotracción

FT-SISA-HO-019

REVISIÓN 01

01/12/2017

Página 1 de 1



Emisión de Informe
Rancagua, 14/12/2017

INFORME N° 24508

CONTROL N° 4517

OBRA	PRUEBA DE LABORATORIO
DIRECCIÓN	POBLACION SAN FRANCISCO SARGENTE ALDEA N° 128 RANCAGUA
SISA N°	106
SOLICITANTE	LUIS CORTES
CORRELATIVO	10
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-10

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4380	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	26 de noviembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	-------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	HN 50
Tipo del Hormigón	HN50(90)20-10
Procedencia del Hormigón	INSITU
N° Guía de Despacho	No informada
Docilidad del Hormigón (cm.)	9,0
Volumen Amasado (m³)	0,771
Elemento Hormigonado	HM V 4
Ubicación	No informada
Faja / Lado	No informada
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	26,7 °C / 29,2 °C / 13.40

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia de Ensayo de tracción por flexión (NCh 1038 Of. 1977)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	PRISMATICA	PRISMATICA	PRISMATICA	-	-	-
Fecha de Ensayo	3-dic-17	3-dic-17	3-dic-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	7	7	7	-	-	-
Altura media (mm)	150,00	150,00	50,00	-	-	-
Ancho medio (mm)	150,00	150,00	150,00	0,00	0,00	0,00
Luz de ensayo	450					
Carga Máxima (N)	30000	31000	33000	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.394	2.403	2.436	-	-	-
Resistencia Individual (N/mm² o Mpa)	4,0	4,1	4,4	-	-	-
Resistencia Promedio (N/mm² o Mpa)	4,1					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

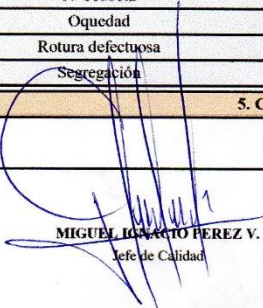
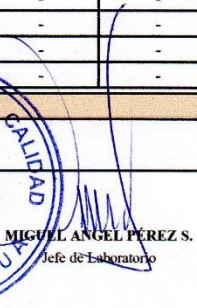
Sin Observaciones

MIGUEL IGNACIO PÉREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones

• Informes de Ensayos de Hormigón – Muestreo de Hormigón En Obra (km 41)

SERVICIOS DE INGENIERIA Y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA. LABORATORIO DE ENSAYOS		INFORME DE ENSAYOS		FT-SISA-HO-004 REVISIÓN 11 Fecha revisión 29/08/2017 Página 1 de 1	
 Servicios de Ingeniería y Servicios Asociados		Hormigón		 ACREDITACIÓN LE 1250	
Emisión de Informe Rancagua, 07/12/2017		INFORME N° 24526		CONTROL N° 4530	
OBRA	PAVIMENTACION HORMIGON KM 41 CARRETERA EL COBRE TRAMO 2				
DIRECCIÓN	CARRETERA EL COBRE TRAMO 2 KM 41				
SISA N°	106				
SOLICITANTE	CRISTOBAL JORQUERA				
CORRELATIVO	56				
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA				
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO				
MUESTREO	MUESTREADO POR PERSONAL DE SISA LTDA.				
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.				
REFERENCIA	M-56				
1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)					
Serie Muestra	4398	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	5 de diciembre de 2017
2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)					
Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA				
Grado del Hormigón	HN 50				
Resistencia Especificada (Mpa.)	50 (Mpa.) en cubo de 20 (cm.) a 28 días				
Tipo del Hormigón	HN50(90)20-10 FIBRA				
Procedencia del Hormigón	PLANTA				
N° Guía de Despacho	108012				
Docilidad del Hormigón (cm.)	9,0				
Volumen Amasada (m³)	7				
Elemento Hormigonado	PISTA DE PRUEBA				
Ubicación	LADO NORTE				
Faja / Lado	No informada				
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh:mm)	28 °C / 29,2 °C / 17.00				
Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.					
3. Resistencia a la Compresión (NCh 1037 Of. 2009)					
N° Probeta	1	2	3	-	-
Tipo Probeta	CILINDRO	CILINDRO	CILINDRO	-	-
Fecha de Ensayo	6-dic-17	6-dic-17	6-dic-17	-	-
Edad al Ensayar (días)	1	1	1	-	-
Área (cm²)	176,71	176,71	176,71	-	-
Carga Máxima (kN)	607	636	695	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.460	2.459	2.464	-	-
Resistencia Individual (Kg/cm²)	400	417	451	-	-
Resistencia Individual (Mpa.)	39,2	40,9	44,2	-	-
Resistencia Promedio (Mpa.)	41,4				
Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal					
4. Observaciones relativas al hormigon después de la rotura					
N° Probeta	1	2	3	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-
5. Características generales de las probetas - Observaciones					
Sin Observaciones					
 					
SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones					

INFORME DE ENSAYOS

Flexotracción

FT-SISA-HO-019

REVISIÓN 01

01/12/2017

Página 1 de 1

Emisión de Informe
Rancagua, 18/12/2017

INFORME N° 24528

CONTROL N° 4530

OBRA	PAVIMENTACION HORMIGON KM 41 CARRETERA EL COBRE TRAMO 2
DIRECCIÓN	CARRETERA EL COBRE TRAMO 2 KM 41
SISA N°	106
SOLICITANTE	CRISTOBAL JORQUERA
CORRELATIVO	58
EMPRESA CONSTRUCTORA	XTREME MINING LTDA
MATERIA	RESISTENCIA DE HORMIGÓN FRESCO
MUESTREO	MUESTREO POR PERSONAL DE SISA LTDA.
ANÁLISIS	EFECTUADO POR SISA LTDA.
REFERENCIA	M-58

1. Identificación de Muestra (NCh 171 Of. 1975)

Serie Muestra	4400	N° Probetas	3	Fecha de Muestreo	5 de diciembre de 2017
---------------	------	-------------	---	-------------------	------------------------

2. Antecedentes del Hormigón (NCh 1017 Of. 2009) - Determinación de la Docilidad (NCh 1019 Of. 2009)

Procedimiento de Curado	CAMARA HUMEDA
Grado del Hormigón	HN 50
Tipo del Hormigón	HN50(90)20-10 FIBRA
Procedencia del Hormigón	PLANTA
N° Guía de Despacho	108012
Docilidad del Hormigón (cm.)	9,0
Volumen Amasado (m³)	7
Elemento Hormigonado	PISTA DE PRUEBA
Ubicación	No informada
Faja / Lado	LADO NORTE
T. °C Hormigón / T. °C Ambiental / Hora (hh.mm)	No informada

Nota 1: El número de serie de la muestra corresponde al dado por SISA Ltda.

3. Resistencia de Ensayo de tracción por flexión (NCh 1038 Of. 1977)

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Tipo Probeta	PRISMATICA	PRISMATICA	PRISMATICA	-	-	-
Fecha de Ensayo	6-dic-17	6-dic-17	6-dic-17	-	-	-
Edad al Ensayar (días)	1	1	1	-	-	-
Largo (mm)	530,00	530,00	530,00	-	-	-
Ancho (mm)	150,00	150,00	150,00	0,00	0,00	0,00
Luz de ensayo	450					
Carga Máxima (N)	26000	27000	29000	-	-	-
Densidad (Kg/m³)	2.407	2.423	2.428	-	-	-
Resistencia Individual (N/mm2 o Mpa)	3,5	3,6	3,9	-	-	-
Resistencia Promedio (N/mm2 o Mpa)	3,60					

Nota 2: Se informa resistencia corregida a 28 días de edad en cubo normal

4. Observaciones relativas al hormigón después de la rotura

N° Probeta	1	2	3	-	-	-
Oquedad	NO	NO	NO	-	-	-
Rotura defectuosa	NO	NO	NO	-	-	-
Segregación	NO	NO	NO	-	-	-

5. Características generales de las probetas - Observaciones

Sin Observaciones

MIGUEL KINACIO PÉREZ V.
Jefe de Calidad

MIGUEL ANGEL PÉREZ S.
Jefe de Laboratorio

SISA LTDA. Mecánica de suelo y hormigones

• **Certificado Bitumix Diseño de Mezcla Asfáltica con Asfalto Modificado Polybit 60**

7/2015

CERTIFICADO A 3090/15-B

Hoja

Informe sobre : **Estudio de dosificación de CONCRETO ASFALTICO en caliente con Polybit 60/80 y un tamaño máximo de 20 mm Tránsito Pesado.**

Producto : **Carpeta 20mm (3/4") TP Vialidad Banda IV-A-12; Polybit 60/80; Gultro.**

Obra : **"Servicio de Mantenimiento de Pavimentos Carretera El Cobre y otros DET Contrato N°4501615472"**

Mandante : **CODELCO CHILE, División El Teniente.**

Ubicación : **Varios Sectores Carretera El Cobre e Interior Mina, CODELCO CHILE, División El Teniente, Provincia de Cachapoal, Región de O'Higgins.**

Solicitante Diseño : **Constructora Bitumix S.A.**

Empresa Produce : **Bitumix S.A., Planta Gultro.**

Empresa Coloca : **Constructora Bitumix S.A.**

Laboratorio Diseña : **Centro de Desarrollo e Investigación, CDI Constructora Bitumix S.A.**

A) IDENTIFICACION

Muestra N°	1	2	3	4
Material	Gravilla 11-17	Gravilla 6-11	Polvo Roca 0-6	Arena 0-6
Procedencia	Gultro	Gultro	Gultro	Gultro

B) GRANULOMETRIAS

Tamiz	de 25,0 mm (1")	de 19,0 mm (3/4")	de 12,5 mm (1/2")	de 9,5 mm (3/8")	de 4,75 mm (N°4)	de 2,36 mm (N°8)	de 1,18 mm (N°16)	de 0,6 mm (N°30)	de 0,3 mm (N°50)	de 0,15 mm (N°100)	de 0,075 mm (N°200)
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
61			100								
12			85								
8				95							
2				68							
1				50							
1				37							
1				26							
1				18							
1				12							

C) CONSTANTES FISICAS E HIDRICAS

	(Kg/m³)	1490	1430	1725	1663
Densidad aparente	(Kg/m³)	2723	2698	2675	2710
Densidad real seca	(Kg/m³)	2798	2767	2773	2837
Densidad neta	(%)	93	100	100	60
Partículas chancadas	(%)	0	1	0,4	5
Partículas lajeadas	(%)	10,4	20	14,7	13,5
Índice de Lajas	(%)	11	16	18	20
Desgaste Los Ángeles	Grado N°	5	6	7	7
Índice de plasticidad	(%)	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

Centro de Desarrollo e Investigación CDI Constructora Bitumix S.A.
 Oficina Central: Obispo Arturo Espinoza 3172, Macul - Santiago, Fono 6803000. www.bitumix.cl
 CDI - Cerro Sombrero 1020, Maipo - Santiago, Fono 5305528 - cdi@bitumix.cl

D) DOSIFICACION ARIDOS EN PESO :**CERTIFICADO A 3090/15-B**

Hoja 2

De acuerdo a las características de los áridos, estos se mezclaron como sigue :

1 Gravilla 11-17	Gulstro	=	15 %
2 Gravilla 6-11	Gulstro	=	40 %
3 Polvo Roca 0-6	Gulstro	=	35 %
4 Arena 0-6	Gulstro	=	10 %

E) CARACTERISTICA DE LA MEZCLAEspecificación

Banda IV-A-12

Granulometría :

Tamiz de 25,0 mm (1")	100	-
" de 19,0 mm (3/4")	100	100 - 100
" de 12,5 mm (1/2")	94	80 - 95
" de 9,5 mm (3/8")	81	70 - 85
" de 4,75 mm (Nº4)	46	43 - 58
" de 2,36 mm (Nº8)	32	28 - 42
" de 1,18 mm (Nº16)	24	-
" de 0,6 mm (Nº30)	18	13 - 24
" de 0,3 mm (Nº50)	13	8 - 17
" de 0,15 mm (Nº100)	9	6 - 12
" de 0,075 mm (Nº200)	6	4 - 8

Partículas chancadas (2 caras)	(%)	95	mín. 90
Partículas lajeadas	(%)	1	máx. 10
Índice de Lajas	(%)	16	
Desgaste Los Ángeles	(%)	16	máx. 25
Índice de plasticidad	(%)	N.P.	N.P.
Sales solubles	(%)	no contiene	máx. 2
Adherencia Método Estático :	(%)	+95	mín. 95
Adherencia Método Dinámico :	(%)	+95	mín. 95
Adherencia Riedel - Weber	(%)	6-10	mín. 0-5
Equivalente de Arena	(%)	55	mín. 50
Desintegración en Sulfato de Sodio F. Gruesa	(%)	0,66	máx. 12
Desintegración en Sulfato de Sodio F. Fina	(%)	1,36	máx. 15
Densidad real seca ponderada	(Kg/m³)	2695	
Densidad efectiva	(Kg/m³)	2727	
Absorción de asfalto	(%)	0,45	

F) PARAMETROS MARSHALL
CERTIFICADO A 3090/15-B

Hoja

		75 golpes por cara						Rangos
		(% ref. ag.)						
Polybit 60/80*	(% ref. ag.)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5		
Asfalto Total	(% ref. ag.)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5		
DMM	(Kg/m ³)	2.545	2.527	2.510	2.493	2.476		
Densidad	(Kg/m ³)	2.387	2.408	2.409	2.406	2.403		
Huecos	(%)	6,2	4,7	4,0	3,5	3,0		4 - 6
V.A.M.	(%)	15,2	14,9	15,3	15,8	16,3		Mín. 14
Huecos Llenos	(%)	59	68	74	78	82		
Fluencia	(0,01")	13,7	14,5	15,3	15,8	16,6		8 - 16
Estabilidad	(N)	15.586	15.863	15.689	15.529	15.383		Mín. 9.000
Razón Filler/Asfalto		1,33	1,20	1,09	1,00	0,92		
Relac Estab/Fluencia	(Kg/cm)	4.648	4.476	4.171	4.011	3.784		

*Procedencia: Probisa con P.E.

(Batch 2038)

=

1.026

 (gr/cm³)

Temperatura mezclado probetas en laboratorio

=

193 °C +/- 3 °C

Temperatura compactación probetas en laboratorio

=

181 °C +/- 3 °C

Según M.C.V.8 8.302.47 :

Óptimo por densidad

=

5,2

Óptimo por estabilidad

=

5,0

Óptimo para 5,0 % de huecos

=

4,9

Óptimo a usar

=

5,0 +/- 0,3

G) MEZCLA DE TRABAJO

(% en peso que pasa)

Tamiz	de 25,0	mm	(1")	-		
"	de 19,0	mm	(3/4")	100	-	100
"	de 12,5	mm	(1/2")	89	-	99
"	de 9,5	mm	(3/8")	76	-	86
"	de 4,75	mm	(Nº4)	41	-	51
"	de 2,36	mm	(Nº8)	28	-	36
"	de 1,18	mm	(Nº16)	-		
"	de 0,6	mm	(Nº30)	15	-	21
"	de 0,3	mm	(Nº50)	10	-	16
"	de 0,15	mm	(Nº100)	7	-	11
"	de 0,075	mm	(Nº200)	4,5	-	7,5

Polybit 60/80

(% ref. agregado)

5,0 +/- 0,3

Densidad Marshall

 (Kg/m³)

2408

Rango temperatura de mezclado en Planta

(°C)

170 - 185

Rango temperatura de compactación en Obra

(°C)

135 - 180

Obs.: La dosificación de los áridos para efecto de la alimentación es en frío, puede modificarse de acuerdo a la dispersión de sus granulometrías en el transcurso de la obra.

Juan Cea Chacón

Ingeniero Civil OO.CC. USACH

Jefe Área Mezclas Asfálticas

Centro de Desarrollo e Investigación

Constructora Bitumix S.A.

Santiago, 8 de abril de 2016.

ANEXO E. COSTOS KM 41

E.1. Costos Pavimentación km 41

- Resumen Costos en Obra a Diciembre 2017

Partida	Costo Total
<i>Mano de Obra</i>	
Capataz	\$577.467
Maestro	\$786.042
Ayudante	\$714.578
Vehículo	\$750.407
Total Mano de Obra	\$2.828.494
<i>Materiales</i>	
Antisol (Martes 5 dic.)	\$189.544
Antisol (Miércoles 6 dic.)	\$113.160
Varios	\$255.900
Total Materiales	\$558.604
<i>Equipos</i>	
Cercha Vibradora	\$90.000
Regla	\$54.000
Cortadora de Asfalto	\$120.000
Total Equipos	\$264.000
TOTAL GENERAL	\$3.651.098

- Costo Maquinarias a Diciembre 2017

Maquinaria	Turnos	Precio x Turno	TOTAL
Excavadora	1	\$251.000	\$251.000
Retroexcavadora	2	\$138.000	\$276.000
Motoniveladora	1	\$521.000	\$521.000
Rodillo Compactador	1	\$267.572	\$267.572
Camión Tolva	1	\$192.400	\$192.400
Camión Aljibe	1	\$405.675	\$405.675
TOTAL			\$1.913.647

- **Costos Hormigón y Actividad de Cepillado**

Ítem	Precio (U.F./m3)	Cantidad	Precio Total
Hormigón H50	3,44	58	\$5.338.714
Adición Fibra (2,5 kg/m3)	0,519	58	\$805.463
TOTAL			\$6.144.177

E.2. Rendimientos

Máquina	Rendimiento x Hora		Rendimiento 1 Turno	
Excavadora (Retiro Pavimento)	80	m2	480	m2
Excavadora (Excavación)	122	m3	732	m2
Retroexcavadora (Excavación)	87	m3	522	m3
Camión Aljibe	1500	m2	9000	m2
Motoniveladora (Acabado Subras. Corte)	421	m2	2526	m2
Motoniveladora (Base e =15 cm)	325	m3	1950	m3
Motoniveladora (Base e = 20 cm)	298	m3	1788	m3
Motoniveladora (Subbase e =15 cm)	376	m3	2256	m3
Motoniveladora (Subbase e = 20 cm)	339	m3	2034	m3
Rodillo	599	m2	3594	m2
Cortadora Pavimento Asfáltico	30	ml	180	ml
Corte Juntas Hormigón Corte en Seco	20	ml	120	ml
Corte Juntas Hormigón (Corte en Fresco)	300	ml	1800	ml
Corte Juntas Hormigón (Tradicional)	25	ml	150	ml
Sellado de Juntas	720	ml	4320	ml

E.3. Costos Partidas – Pista de Prueba

- **Corte Pavimento Asfáltico Existente (para posterior retiro)**

Longitud Total		=	208	m
Tiempo de Ejecución		=	1	Turno
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Ejecución Cortes</i>				
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
Cortadora	Arr/Día	2	\$60.000	\$120.000
<i>Total Ejecución Cortes</i>				\$268.231
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$84.068

TOTAL	\$352.299
--------------	------------------

- Retiro Pavimento Existente**

Área Total	=	400	m2	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Retiro del Pavimento</i>				
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	3	\$42.034	\$126.102
Excavadora	Arr/Turno	1	\$251.000	\$251.000
Camión Tolva	Arr/Turno	1	\$192.400	\$192.400
<i>Total Retiro del Pavimento</i>				\$633.665
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$84.068
TOTAL				\$717.733

- Excavación (Solución en Asfalto, para remplazo Base y Subbase e = 15 cm)**

Volumen Total	=	120	m3	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Excavación</i>				
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
Retroexcavadora	Arr/Turno	1	\$138.000	\$138.000
Camión Tolva	Arr/Turno	1	\$192.400	\$192.400
<i>Total Excavación</i>				\$478.631
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$84.068
TOTAL				\$562.699

- **Preparación de la Subrasante**

Superficie Total		=	400	m2
Tiempo Ejecución		=	1	Turno
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Preparación de la Subrasante</i>				
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
Retroexcavadora	Arr/Turno	1	\$138.000	\$138.000
Motoniveladora	Arr/Turno	1	\$521.989	\$521.989
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	\$405.675	\$405.675
Rodillo	Arr/Turno	1	\$267.572	\$267.572
<i>Total Preparación de la Subrasante</i>				\$1.481.467
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$84.068
TOTAL				\$1.565.535

- **Subbase Granular / Base Granular – Pavimento Asfáltico.**

Superficie Total		=	400	m2
Volumen Total		=	60	m3
Espesor Capa		=	15	cm
Tiempo Ejecución		=	0,5	Turno
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Preparación de la Subrasante</i>				
Subbase Granular (Base Granular)	m3	60	\$18.840	\$1.130.400
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$32.082
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$42.034
Excavadora	Arr/Turno	1	\$251.000	\$125.500
Motoniveladora	Arr/Turno	1	\$521.989	\$260.995
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	\$405.675	\$202.838
Rodillo	Arr/Turno	1	\$267.572	\$133.786
<i>Total Excavación</i>				\$1.927.634
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$42.034
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$42.034
TOTAL				\$1.969.668

- **Subbase Granular – Pavimento de Hormigón Tradicional (AASHTO 98).**

Superficie Total	=	430	m2	
Volumen Total	=	64,5	m3	
Espesor Subbase	=	15	cm	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Subbase Granular</i>				
Subbase Granular	m3	64,5	\$18.840	\$1.215.180
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	64163
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	84068
Excavadora	Arr/Turno	1	\$251.000	251000
Motoniveladora	Arr/Turno	1	\$521.989	521989
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	\$405.675	405675
Rodillo	Arr/Turno	1	\$267.572	267572
<i>Total Subbase Granular</i>				\$2.809.647
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	84068
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$84.068
TOTAL				\$2.893.715

- **Subbase Granular – Pavimento de Hormigón de Losas Cortas.**

Superficie Total	=	430	m2	
Volumen Total	=	64,5	m3	
Espesor Subbase	=	15	cm	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Subbase Granular</i>				
Subbase Granular	m3	64,5	\$28.260	\$1.822.770
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	64163
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	84068
Excavadora	Arr/Turno	1	\$251.000	251000
Motoniveladora	Arr/Turno	1	\$521.989	521989
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	\$405.675	405675
Rodillo	Arr/Turno	1	\$267.572	267572
<i>Total Subbase Granular</i>				\$3.417.237
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	84068
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$84.068
TOTAL				\$3.501.305

- **Geotextil**

Área Total	=	430	m2	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Geotextil</i>				
Geotextil	Rollo180x4m	1	\$360.000	\$360.000
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$84.068
Camión Plano	Arr/Turno	1	\$120.000	\$120.000
<i>Total Geotextil</i>				\$628.231
TOTAL				\$628.231

- **Corte de Juntas (Pavimento de Hormigón Tradicional)**

Longitud Total de Juntas	=	120,4	m	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Corte de Juntas</i>				
Cortadora de Pavimento en Fresco	Arr/Turno	1	\$100.000	\$100.000
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	1	\$42.034	\$42.034
<i>Total Corte de Juntas</i>				\$206.197
TOTAL				\$206.197

- **Sello de Juntas (Solución de Pavimento de Hormigón AASHTO 98)**

Longitud Total de Juntas	=	124,7	m	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Profundidad Sello (D)	=	1,2	cm	
Ancho Sello (W)	=	1,1	cm	
cc Totales	=	18106,4	cc	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Sello de Juntas</i>				
Sello de Juntas (poliuretano)	Envase 600cc	31	\$11.084	\$343.605
Ayudante	H/Turno	1	\$42.034	\$42.034
<i>Total Sello de Juntas</i>				\$385.639
TOTAL				\$385.639

- **Barras de Traspaso de Carga (Pavimento de Hormigón Tradicional)**

N° de Juntas	=	28	m	
Espaciamiento Horizontal Barras	=	30	cm	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Barras de Traspaso de Carga</i>				
Barras Acero Lisas Diam. 32 mm	Barras 6 m	32	\$27.566	\$882.112
Canastillos Prefabricados Pasajuntas	un	28	\$17.584	\$492.353
Camión Plano	Arr/Turno	1	\$120.000	\$120.000
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$64.163
Ayudante	H/Turno	4	\$42.034	\$168.136
<i>Total Barras de Traspaso de Carga</i>				\$1.726.764
TOTAL				\$1.726.764

E.4. Costos Partidas – Pista Principal

- **Corte Pavimento (para posterior retiro)**

Longitud Total	=	2008,6	m	
Tiempo Ejecución	=	3	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Ejecución Cortes</i>				
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$192.489
Ayudante	H/Turno	4	\$42.034	\$504.408
Cortadora	Arr/Día	4	\$60.000	\$720.000
<i>Total Ejecución Cortes</i>				\$1.416.897
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$252.204
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$252.204
TOTAL				\$1.669.101

- **Remoción del Pavimento Existente**

Área Total	=	4300	m2		
Tiempo Ejecución	=	7	Turno		
Partidas	Unidad	Cantidad	Turnos	P.U.	Total
<i>Retiro del Pavimento</i>					
Capataz	H/Turno	1	7	\$64.163	\$449.141
Excavadora (Retiro)	Arr/Turno	3	6	\$251.000	\$4.518.000
Excavadora (Carguío a Camión)	Arr/Turno	1	7	\$251.000	\$1.757.000
Camión Tolva	Arr/Turno	3	7	\$192.400	\$4.040.400
<i>Total Retiro del Pavimento</i>					\$10.764.541
<i>Control de Tránsito</i>					
Ayudante	H/Turno	2	7	\$42.034	\$588.476
<i>Total Control de Tránsito</i>					\$588.476
TOTAL					\$11.353.017

- **Excavación (Pavimentos de Hormigón Nuevos Losas Cortas y Tradicional)**

Volumen Total	=	860	m3		
Tiempo Ejecución	=	5	Turno		
Partidas	Unidad	Cantidad	Turnos	P.U.	Total
<i>Excavación</i>					
Capataz	H/Turno	1	5	\$64.163	\$320.815
Excavadora (Sólo Excavación)	Arr/Turno	1	2	\$251.000	\$502.000
Excavadora (Carguío)	Arr/Turno	1	5	\$251.000	\$1.255.000
Camión Tolva	Arr/Turno	3	5	\$192.400	\$2.886.000
<i>Total Excavación</i>					\$4.963.815
<i>Control de Tránsito</i>					
Ayudante	H/Turno	2	5	\$42.034	\$420.340
<i>Total Control de Tránsito</i>					\$420.340
TOTAL					\$5.384.155

- **Excavación (Pavimento Asfáltico Nuevo)**

Volumen Total		=	1720	m3	
Tiempo Ejecución		=	10	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	Turnos	P.U.	Total
<i>Excavación</i>					
Capataz	H/Turno	1	10	\$64.163	\$320.815
Excavadora (Sólo Excavación)	Arr/Turno	1	3	\$251.000	\$502.000
Excavadora (Carguío)	Arr/Turno	1	10	\$251.000	\$2.510.000
Camión Tolva	Arr/Turno	3	10	\$192.400	\$2.886.000
<i>Total Excavación</i>					\$6.218.815
<i>Control de Tránsito</i>					
Ayudante	H/Turno	2	10	\$42.034	\$420.340
<i>Total Control de Tránsito</i>					\$420.340
TOTAL					\$6.639.155

- **Preparación de la Subrasante**

Superficie Total		=	4300	m2	
Tiempo Ejecución		=	3	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	Turnos	P.U.	Total
<i>Preparación de la Subrasante</i>					
Capataz	H/Turno	1	3	\$64.163	\$192.489
Retroexcavadora	Arr/Turno	1	2	\$138.000	\$276.000
Camión Tolva	Arr/Turno	1	2	\$192.400	\$384.800
Motoniveladora	Arr/Turno	1	2	\$521.989	\$1.043.978
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	2	\$405.675	\$811.350
Rodillo	Arr/Turno	2	2	\$267.572	\$1.070.288
<i>Total Preparación de la Subrasante</i>					\$3.778.905
<i>Control de Tránsito</i>					
Ayudante	H/Turno	2	3	\$42.034	\$252.204
<i>Total Control de Tránsito</i>					\$252.204
TOTAL					\$4.031.109

- **Subbase y Base Granular (Pavimentos Asfálticos y de Hormigón Tradicional)**

Volumen Total	=	860	m3		
Espesor Subbase	=	20	cm		
Tiempo Ejecución	=	4	Turno		
Partidas	Unidad	Cantidad	Turnos	P.U.	Total
<i>Subbase Granular</i>					
Subbase Granular	m3	860		\$18.840	\$16.202.400
Capataz	H/Turno	1	4	\$64.163	\$256.652
Excavadora	Arr/Turno	1	4	\$251.000	\$1.004.000
Motoniveladora	Arr/Turno	1	4	\$521.989	\$2.087.956
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	4	\$405.675	\$1.622.700
Rodillo	Arr/Turno	1	4	\$267.572	\$1.070.288
<i>Total Subbase Granular</i>					\$22.243.996
<i>Control de Tránsito</i>					
Ayudante	H/Turno	2	4	\$42.034	\$336.272
<i>Total Control de Tránsito</i>					\$336.272
TOTAL					\$22.580.268

- **Subbase Granular (Pavimento de Hormigón de Losas Cortas)**

Volumen Total	=	860	m3		
Espesor Subbase	=	20	cm		
Tiempo Ejecución	=	4	Turno		
Partidas	Unidad	Cantidad	Turnos	P.U.	Total
<i>Subbase Granular</i>					
Subbase Granular	m3	860		\$28.260	\$24.303.600
Capataz	H/Turno	1	4	\$64.163	\$256.652
Excavadora	Arr/Turno	1	4	\$251.000	\$1.004.000
Motoniveladora	Arr/Turno	1	4	\$521.989	\$2.087.956
Camión Aljibe	Arr/Turno	1	4	\$405.675	\$1.622.700
Rodillo	Arr/Turno	1	4	\$267.572	\$1.070.288
<i>Total Subbase Granular</i>					\$30.345.196
<i>Control de Tránsito</i>					
Ayudante	H/Turno	2	4	\$42.034	\$336.272
<i>Total Control de Tránsito</i>					\$336.272
TOTAL					\$30.681.468

- **Geotextil (Pavimento de Hormigón de Losas Cortas)**

Área Total	=	4300	m2	
Tiempo Ejecución	=	2	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Geotextil</i>				
Geotextil	Rollo 180x4m	6	\$360.000	\$2.160.000
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$128.326
Ayudante	H/Turno	2	\$42.034	\$168.136
Camión Plano	Arr/Turno	1	\$120.000	\$120.000
<i>Total Geotextil</i>				\$2.576.462
<i>Control de Tránsito</i>				
Ayudante	H/Turno	0	\$42.034	\$0
<i>Total Control de Tránsito</i>				\$0
<i>TOTAL Materiales</i>				\$2.160.000
<i>Total Mano de Obra</i>				\$416.462
<i>TOTAL</i>				\$2.576.462

- **Sello de Juntas (Pavimento de Hormigón Tradicional)**

Longitud Total de Juntas	=	1229,8	m	
Tiempo Ejecución	=	1	Turno	
Profundidad Sello (D)	=	1,2	cm	
Ancho Sello (W)	=	1,1	cm	
cc Totales	=	178567	cc	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Sello de Juntas</i>				
Sello de Juntas (poliuretano)	Envase 600 cc	298	\$11.084	\$3.303.042
Ayudante	H/Turno	1	\$42.034	\$42.034
<i>Total Sello de Juntas</i>				\$3.345.076
<i>TOTAL</i>				\$3.345.076

- **Barras de Traspaso de Carga (Pavimento de Hormigón Tradicional)**

N° de Juntas	=	285		
Espaciamiento	=	30	cm	
Tiempo Ejecución	=	3	Turno	
Partidas	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
<i>Barras de Traspaso de Carga</i>				
Barras Acero Lisas Diam. 32 mm	Barras 6 m	322	\$27.566	\$8.876.252
Canastillos Prefabricados Pasajuntas	un	285	\$17.584	\$5.011.450
Camión Plano	Arr/Turno	1	\$120.000	\$120.000
Capataz	H/Turno	1	\$64.163	\$192.489
Ayudante	H/Turno	4	\$42.034	\$504.408
<i>Total Barras de Traspaso</i>				\$14.704.599
TOTAL				\$14.704.599