



UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL  
SEDE CONCEPCIÓN**

**ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN EN CAMINOS DE  
BAJO TRÁNSITO, CONSIDERANDO ASPECTOS ESTRUCTURALES,  
ECONÓMICOS Y AMBIENTALES.**

Tesis para optar al Título en Ingeniería Civil

**Profesor tutor: Dr. Mauricio Alejandro Pradena Miquel**

**Estudiante: Matia Cerda Pérez**

**© Matia Ignacio Cerda Pérez**

**Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.**

**Concepción, Chile**

**2025**

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En \_\_\_\_\_, el \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_ los abajo firmantes dejan constancia que el estudiante \_\_\_\_\_ de la carrera de \_\_\_\_\_ ha aprobado la tesis para optar al título o grado académico de \_\_\_\_\_ con una nota de \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Profesor Evaluador

\_\_\_\_\_  
Profesor Evaluador

\_\_\_\_\_  
Profesor Evaluador

## **Dedicatoria**

Por sobre todo, a mi madre. Como agradecimiento a su esfuerzo, amor y entrega incondicional.

A mi pareja Francisca, mi amada, mi amiga, mi compañera de ruta. Eres fuente inagotable de esperanza.

A mis padrinos por el apoyo que me han brindado a mí y a mi madre a lo largo de estos años.

Finalmente, a mí. A ese de niño que siempre quiso ser ingeniero, felicidades por no rendirte.

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a mi profesor guía, Dr. Mauricio Pradena, por su apoyo, paciencia, aguante y compromiso en el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos, todos los que me han apoyado a lo largo de este difícil camino y que se alegran de mis éxitos.

A mis jefes, Mauricio Jiménez y Fabián Riquelme por su apoyo y comprensión. También a Alexis Jiménez por darme una oportunidad en la empresa.

A toda persona que haya aportado con su granito de arena para ayudarme a llegar aquí en este momento.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	3
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.3 ANTECEDENTES.....	6
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>9</b>
2.1 RESUMEN.....	9
2.2 CASOS DE ESTUDIO.....	9
2.2.1 CASOS DE ESTUDIO A 20 AÑOS.....	10
2.2.2 CASOS DE ESTUDIO A 30 AÑOS.....	13
2.3 PARÁMETROS CONSIDERADOS.....	16
2.3.1 EJES EQUIVALENTES SOLICITANTES .....	16
2.3.2 CBR DE LAS SUBRASANTES .....	19
2.3.3 ESPESORES DE CAPAS .....	19
2.3.4 NIVEL DE CONFIANZA .....	21
2.3.5 SERVICIABILIDAD.....	21
2.3.6 COEFICIENTES DE DRENAJE DE LAS BASES Y SUBBASES GRANULARES .....	21
2.3.7 MÓDULO RESILIENTE.....	22
2.3.8 COEFICIENTES ESTRUCTURALES .....	23
2.4 DISEÑO A 20 AÑOS: CAPA DELGADA DE ASFALTO, TSD, LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.....	23
2.4.1 PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO .....	24
2.4.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DOBLES.....	26
2.4.3 PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN .....	27
2.4.4 PAVIMENTOS DE LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE POLIPROPILENO (PP) .....	37
2.5 DISEÑO A 30 AÑOS: CAPA DELGADA DE ASFALTO, TSD, LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.....	39
2.5.1 DISEÑO A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO .....	39
2.5.2 DISEÑO A 30 AÑOS DE TSD .....	40

2.5.3 DISEÑO A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE POLIPROPILENO .....	40
2.6 CONSERVACIONES .....	41
2.6.1 CONSERVACIONES DE LOS DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO.....	42
2.6.2 CONSERVACIONES DE LOS DISEÑOS DE TSD .....	42
2.6.3 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN .....	43
2.7 COSTOS ECONÓMICOS DE LOS DISEÑOS DE CADA CAMINO.....	44
2.7.1 COSTOS ECONÓMICOS DE DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO.....	45
2.7.2 COSTOS ECONÓMICOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE .....	46
2.7.3 COSTOS ECONÓMICOS DE DISEÑOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.....	47
2.8 COSTOS AMBIENTALES.....	48
2.8.1 FAST TRACK LCA, PASO A PASO.....	48
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>51</b>
3.1 RESUMEN .....	51
3.2 TMDA POR SENTIDO DE VÍA DE CADA CAMINO A LOS 20 Y 30 AÑOS DE DISEÑO.....	51
3.2.1 TMDA POR SENTIDO DE VÍA DE LOS CAMINOS DE LA ZONA DE RANCAGUA .....	52
3.3 OBRAS DE CONSERVACIÓN DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO Y TSD .....	56
3.3.1 OBRAS DE CONSERVACIÓN PARA DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO Y TSD A LOS 20 AÑOS DE DISEÑO.....	56
3.3.2 OBRAS DE CONSERVACIÓN EN CADA CAMINO PARA PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO Y TSD A LOS 30 AÑOS DE DISEÑO .....	57
3.4 DISEÑOS A 20 AÑOS.....	58
3.4.1 DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO .....	58
3.4.2 DISEÑOS A 20 AÑOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE.....	59
3.4.3 DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.....	60
3.5 DISEÑOS A 30 AÑOS.....	63
3.5.1 DISEÑOS A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO .....	63
3.5.2 DISEÑOS A 30 AÑOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE.....	63
3.5.3 DISEÑOS A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.....	64
3.6 COSTOS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN .....	67
3.6.1 COSTOS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN A LOS 20 AÑOS .	67
3.6.2 COSTOS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN A LOS 30 AÑOS ....	69
3.7 COSTOS AMBIENTALES DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN .....	70
3.7.1 COSTOS AMBIENTALES POR MÉTODO DE PAVIMENTACIÓN A LOS 20 AÑOS .....	70

3.7.2 COSTOS AMBIENTALES POR MÉTODO DE PAVIMENTACIÓN A LOS 30 AÑOS .....	72
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO 1. TMDA POR SENTIDO DE VÍA DE TODOS LOS CAMINOS DE LAS ZONAS DE CONCEPCIÓN, VALDIVIA Y PUNTA ARENAS .....</b>	<b>79</b>

### *ÍNDICE DE FIGURAS*

<b>FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL SEGÚN TIPO DE CAPA DE RODADURA ....</b>	<b>4</b>
<b>FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LA RED PAVIMENTADA, SOLUCIÓN BÁSICA Y NO PAVIMENTADA... </b>	<b>4</b>
<b>FIGURA 3. EFECTO DE REDUCCIÓN DE CARGAS GENERADOS POR NEUMÁTICOS EN LOSAS TRADICIONALES Y LOSAS OPTIMIZADAS .....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURA 4. UBICACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO.....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 5. ESQUEMA DE CASOS CONSIDERADOS PARA DISEÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO A 20 AÑOS.....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 6. ESQUEMA DE CASOS CONSIDERADOS PARA DISEÑOS DE DOBLE TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO A 20 AÑOS.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 7. ESQUEMA DE CASOS CONSIDERADOS PARA DISEÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DE HORMIGÓN A 20 AÑOS.....</b>	<b>13</b>
<b>FIGURA 8. ESQUEMA DE CASOS CONSIDERADOS PARA DISEÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO A 30 AÑOS.....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURA 9. ESQUEMA DE CASOS CONSIDERADOS PARA DISEÑOS DE DOBLE TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO A 30 AÑOS.....</b>	<b>15</b>
<b>FIGURA 10. ESQUEMA DE CASOS CONSIDERADOS PARA PAVIMENTOS DE LOSA DE HORMIGÓN A 30 AÑOS.....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 11. CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO.....</b>	<b>49</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DATOS DE VOLUMEN DE TRÁNSITO DE LOS CAMINOS DE LA ZONA DE RANCAGUA .	17
TABLA 2. DATOS DE VOLUMEN DE TRÁNSITO DE LOS CAMINOS DE LA ZONA DE CONCEPCIÓN .....	18
TABLA 3. DATOS DE VOLUMEN DE TRÁNSITO DE LOS CAMINOS DE LA ZONA DE VALDIVIA.....	18
TABLA 4. DATOS DE VOLUMEN DE TRÁNSITO DE LOS CAMINOS DE LA ZONA DE PUNTA ARENAS.....	18
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN CBR.....	19
TABLA 6. ESPEORES DE BASE Y SUBBASE GRANULARES .....	20
TABLA 7. COMBINACIONES DE ESPEORES DE CAPAS CONSIDERADOS .....	21
TABLA 8. COEFICIENTE DE DRENAJE PARA LAS CUATRO ZONAS .....	22
TABLA 9. MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE, SEGÚN CBR (%) .....	22
TABLA 10. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE LAS CAPAS (%).....	23
TABLA 11. NE REQUERIDO SEGÚN DEMANDA DE EEA Y CBR (%) DE LA SUBRASANTE .....	25
TABLA 12. COMBINACIONES DE ESPEORES DE CAPAS CONSIDERADOS .....	25
TABLA 13. COMBINACIONES DE CAPAS CONSIDERADAS PARA TSD.....	27
TABLA 14. CONDICIONES DE PAVIMENTO DE CADA CAMINO .....	28
TABLA 15. CONSTANTES PARA EL FACTOR DE FORMA EN PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS CON TODAS LAS JUNTAS ACTIVADAS .....	35
TABLA 16. CONSTANTES PARA EL FACTOR DE FORMA EN PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS CON TODAS LAS JUNTAS ACTIVADAS .....	36
TABLA 17. LARGO DE LOSA (M) Y ESPEORES DE LOSA (CM) CONSIDERADOS PARA CADA CAMINO .....	37
TABLA 18. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO .....	38
TABLA 19. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN (MPA) DE HORMIGÓN Y HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRAS DE PP .....	38
TABLA 20. LARGO DE LOSA (M) Y ESPEORES DE LOSAS (CM) CONSIDERADOS PARA CADA CAMINO .....	40
TABLA 21. CONDICIONES DE CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO .....	42

TABLA 22. CONDICIONES DE CONSERVACIÓN DE TSD.....	43
TABLA 23. CONDICIONES DE CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS DE LOSA DE HORMIGÓN .....	44
TABLA 24. PRECIOS UNITARIOS POR ZONA DEL ASFALTO, BASE GRANULAR Y SUBBASE GRANULAR .....	45
TABLA 25. PRECIOS UNITARIOS POR ZONA DEL ASFALTO, TRATAMIENTO SUPERFICIAL, BASE GRANULAR Y SUBBASE GRANULAR .....	46
TABLA 26. PRECIOS UNITARIOS POR ZONA DEL HORMIGÓN Y FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	47
TABLA 27. MATERIALES CONSIDERADOS PARA LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN .....	48
TABLA 28. ECO-COSTOS DE LOS MATERIALES CONSIDERADOS .....	50
TABLA 29. ABREVIACIONES PARA TABLAS 30, 31, 32 Y 33 .....	51
TABLA 30. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: ESMERALDA, ROL: H-510. ....	52
TABLA 31. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: LA PAMPA, ROL: I-490. ....	53
TABLA 32. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: LETUECHE-MATANZA, ROL: I-112.....	54
TABLA 33. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: ARICA-CRUCÉ CHACARILLA, ROL: I-376.....	55
TABLA 34. OBRAS DE CONSERVACIÓN EN CADA CAMINO PARA DISEÑOS DE PAVIMENTOS DE ASFALTO Y TSD A LOS 20 AÑOS . ....	56
TABLA 35. OBRAS DE CONSERVACIÓN EN CADA CAMINO, A LOS 30 AÑOS, PARA DISEÑOS DE PAVIMENTOS DE ASFALTO Y TSD. ....	57
TABLA 36. DISEÑO ÓPTIMO DE CAPA DELGADA DE ASFALTO PARA CADA CAMINO A LOS 20 AÑOS DE DISEÑO .....	58
TABLA 37. DISEÑO ÓPTIMO DE TSD PARA CADA CAMINO A LOS 20 AÑOS DE DISEÑO .....	59
TABLA 38. PORCENTAJE DE AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL PARA DISEÑOS DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN A LOS 20 AÑOS .....	61
TABLA 39. PORCENTAJE DE AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL PARA DISEÑOS DE LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.....	62
TABLA 40. DISEÑO ÓPTIMO PARA PAVIMENTO DE CAPA DELGADA DE ASFALTO A LOS 30 AÑOS .....	63
TABLA 41. DISEÑO ÓPTIMO PARA TSD (30 AÑOS).....	64

TABLA 42. PORCENTAJE DE AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL PARA DISEÑOS DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN.....	65
TABLA 43. PORCENTAJE DE AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL PARA DISEÑOS DE LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN A LOS 30 AÑOS .....	66
TABLA 44. COSTOS ECONÓMICOS (\$/KM) POR ALTERNATIVA DE PAVIMENTACIÓN CON DISEÑOS A 20 AÑOS.....	68
TABLA 45. COSTOS ECONÓMICOS (\$/KM) POR ALTERNATIVA DE PAVIMENTACIÓN CON DISEÑOS A 30 AÑOS.....	69
TABLA 46. ECO COSTOS (\$/KM) POR TIPO DE PAVIMENTOS CON DISEÑOS A 20 AÑOS.....	71
TABLA 47. ECO COSTOS (\$/KM) POR TIPO DE PAVIMENTOS CON DISEÑOS A 30 AÑOS.....	72
TABLA 48. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: RÍO CHAQUILVÍN-RALCO, ROL: Q-61.....	79
TABLA 49. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: PUDA-DICHATO, ROL: N-14-O.	80
TABLA 50. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: VILLA MERCEDES-QUILLECO, ROL: Q-469.....	81
TABLA 51. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: CABRERO-PASO HONDO, ROL: Q-510.....	82
TABLA 52. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: LOS TALLOS, ROL: T-189.....	83
TABLA 53. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: PUILE, ROL: T-218.....	84
TABLA 54. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: LAGO NELTUME - LIQUIÑE, ROL: T-29.....	85
TABLA 55. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: PUENTE ALTO – CRUCE CAYURUCA, ROL: T-731.....	86
TABLA 56. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: CERRO CASTILLO, RUTA 9N. ..	87
TABLA 57. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: PAMPA GUANACO, ROL: Y-85.	88
TABLA 58. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: DOS LAGUNAS, ROL: Q-510. ...	89
TABLA 59. CÁLCULO DE TMDA POR SENTIDO DE VÍA. CAMINO: CALETA JOSEFINA, ROL: Y-85.	90

## RESUMEN

La red vial nacional es amplia y se encuentra en constante expansión. Sin embargo, el 52,8% de sus vías no cuentan con ningún tipo de pavimentación, mientras que un 22,4% corresponden a caminos básicos. Esta situación no ha cambiado de manera significativa durante los últimos años, por lo que existe la necesidad de mejorar la accesibilidad de este tipo de caminos, para así aumentar la calidad de vida de los sectores aledaños mediante la reducción del polvo en verano y el barro en invierno, así como la mayor visibilidad o la mejora en la conectividad.

Ante esta situación surge el desafío de buscar soluciones óptimas desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Por ello, se propuso identificar, dentro de varias alternativas de pavimentación, el método idóneo considerando dichos factores. Para lograrlo se realizaron y compararon, diseños de pavimentos capa delgada de asfalto, tratamientos superficiales dobles (TSD) y pavimentos de losas delgadas y ultradelgadas de hormigón para caminos de bajo tránsito de la zona centro sur de Chile usando datos de volumen vehicular de los censos de vialidad de la dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Estos diseños se compararon estructuralmente, y de forma simplificada en lo económico y ambiental.

Se desarrollaron diseños para caminos de bajo tránsito ubicados en Rancagua, Concepción, Valdivia y Punta Arenas siguiendo los métodos de pavimentación mencionados. Tras realizar los diseños y obtener los espesores de las distintas capas, se seleccionaron para cada método, demanda de ejes equivalentes acumulados (EEA) y zona, los diseños con menores espesores. Posteriormente, se realizó una comparación de los costos económicos y ambientales estimados asociados a cada camino.

Se obtuvo que los diseños de menor costo económico en el 87,5% de los casos fueron los de losa ultradelgada de hormigón con adición de fibras de polipropileno que entregaron espesores de losa entre los 11 y 13 cm, estos presentan una reducción del 21,7% de los costos económicos frente a los diseños de losa delgada de hormigón a los 30 años, mientras que los diseños con mayores costos económicos corresponden a los pavimentos de capa delgada de asfalto, seguidos por los TSD, principalmente debido a los costos económicos asociados a las conservaciones de estos. Los diseños de losas de hormigón planteados no superan el 30% de agrietamiento transversal de las losas por lo que no necesitan trabajos de conservación en los años de vida de diseño, solamente los trabajos de mantenimiento periódicos para cualquier vía. Respecto a los costos ambientales, los diseños más económicos a los 20 y 30 años son los TSD, mientras que los más costosos corresponden a los diseños de losa delgada de hormigón. Sin embargo, se observa una tendencia en la que, a largo plazo, los diseños de losa ultradelgada de hormigón se vuelven cada vez más competitivos ambientalmente, acercando sus costos ambientales a los diseños de capa delgada de asfalto y los TSD, esto debido al buen comportamiento estructural del hormigón frente a los elevados costos ambientales de las conservaciones que afectan a los diseños de capa delgada de asfalto y los TSD frente al aumento de demanda.

## **ABSTRACT**

The national road network is extensive and is constantly expanding. However, 52.8% of its roads do not have any type of paving, while 22.4% correspond to basic roads. This situation has not changed significantly in recent years, so there is a need to improve the accessibility of these roads to increase the quality of life of the surrounding areas by reducing dust in summer and mud in winter, as well as improving visibility and connectivity.

Faced with this situation, the challenge arises to find optimal solutions from a technical, economic and environmental point of view. For this reason, it was proposed to identify, within several paving alternatives, the ideal method taking the above into consideration. To achieve this, asphalt pavement designs, double surface treatments (DST) and short thin and ultra-thin concrete slabs pavements for low traffic roads in the central-south zone of Chile were designed and compared using vehicle volume data from the road census of the MOP's Roads Directorate. These designs were compared structurally, and in a simplified economic and environmental way.

Designs were made for low traffic roads located in Rancagua, Concepción, Valdivia and Punta Arenas following the paving methods mentioned above. With the designs made and the thicknesses of the different layers obtained, the designs with the lowest thickness were selected for each method, accumulated equivalent axle demand and area. Subsequently, the estimated economic and environmental costs associated with each road were compared.

It was found that the designs with the lowest economic cost in 87.5% of the cases were those of ultra-thin concrete slabs with the addition of polypropylene fibers, which provided slab thicknesses between 11 and 13 cm, these presented a 21.7% reduction in economic costs compared to the designs of thin concrete slabs after 30 years, while the designs with the highest economic costs correspond to the thin asphalt layer pavements, followed by the DST, mainly due to the economic costs associated with their maintenance. The concrete slab designs proposed do not exceed 30% transverse cracking of the slabs, so they do not require maintenance work during the years of design life, only periodic maintenance work for any roadway. Regarding environmental costs, the most economical designs at 20 and 30 years are the DST, while the most expensive ones correspond to the thin concrete slab designs. However, a trend is observed in which, in the long term, the ultra-thin concrete slab designs become more and more environmentally competitive, bringing their environmental costs closer to the thin asphalt layer designs and the DST, due to the good structural performance of concrete versus the high environmental costs of maintenance that affect the thin asphalt layer designs and the DST in the face of increased demand.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 MOTIVACIÓN**

La red vial es uno de los mayores bienes patrimoniales de un país. Proporciona una base fundamental para el crecimiento, desarrollo económico y social. Sin embargo, presenta elevados costos económicos y genera daños medioambientales significativos durante su construcción, mantenimiento y uso (Espinoza, 2018). De hecho, el 37% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero están asociadas a la industria de la construcción, de los cuales el 10% provienen de la construcción de materiales (UNECE, 2022). Tanto para la construcción de nuevas infraestructuras como la reparación y el mantenimiento de las existentes.

Chile mantiene una parte considerable de sus caminos sin una alternativa de pavimentación. Según la distribución de la red vial nacional por tipo de rodadura, un 52,80% son caminos no pavimentados, mientras que el 22,4% corresponden a caminos básicos. A nivel regional los kilómetros de vías no pavimentadas y de solución básica superan por mucho a las vías pavimentadas, principalmente en la zona centro-sur del país (Dirección de Vialidad, MOP, 2023). En las figuras 1 y 2 se detalla la distribución de la red por tipo de rodadura a nivel nacional y regional.

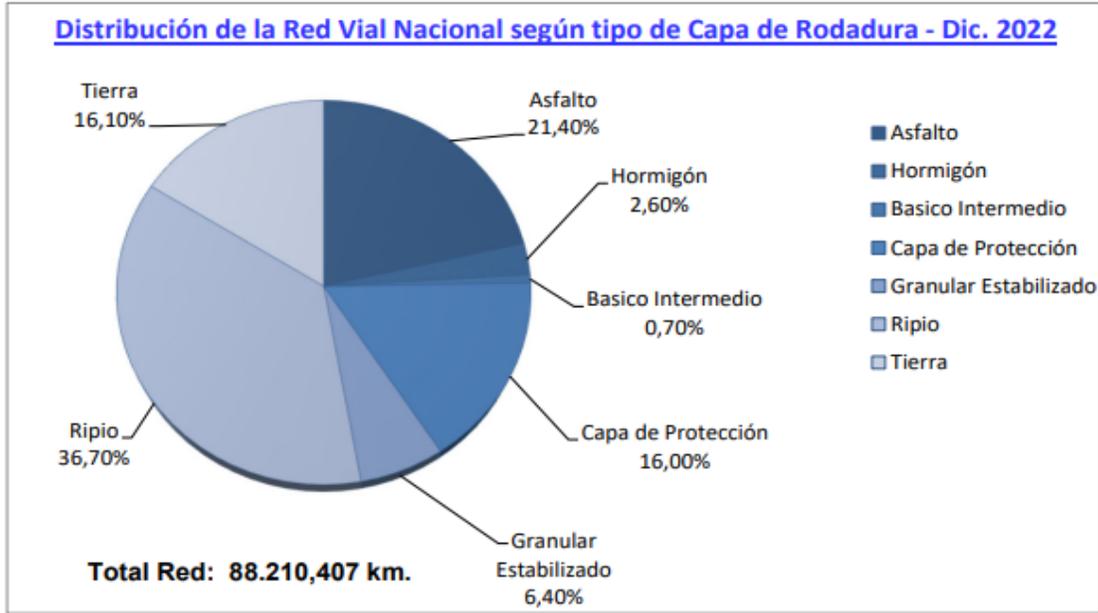


Figura 1. Distribución de la red vial nacional según tipo de capa de rodadura

Fuente: Dirección de Vialidad, MOP, 2023.

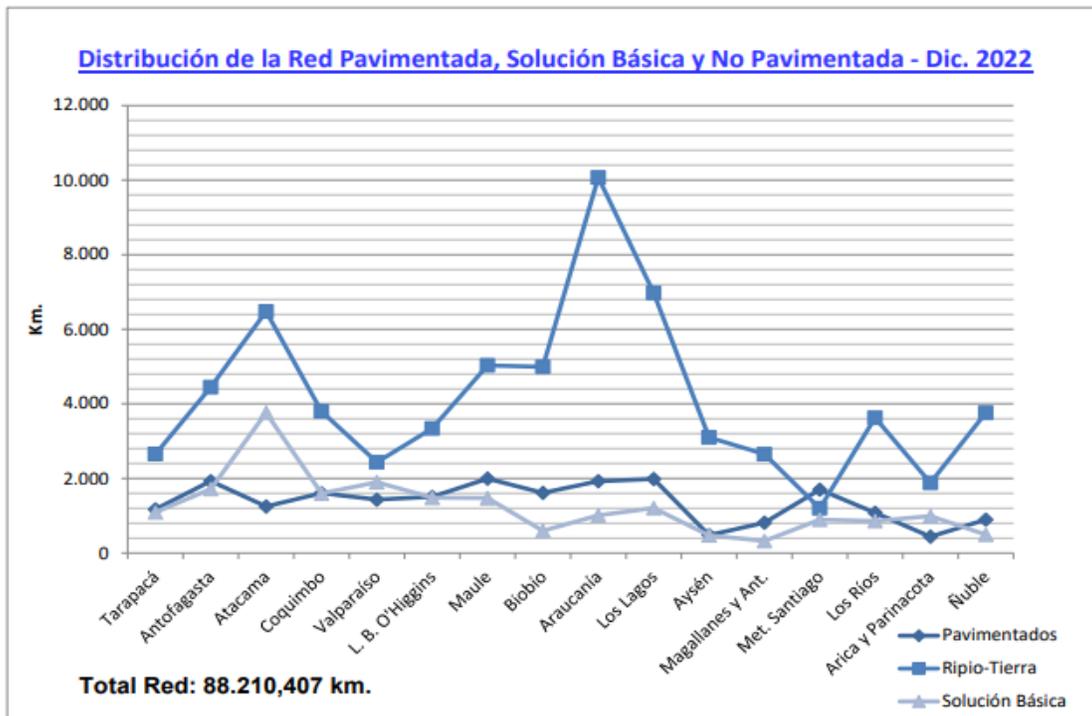


Figura 2. Distribución de la red pavimentada, solución básica y no pavimentada

Fuente: Dirección de Vialidad, MOP, 2023

El concepto fundamental de los caminos básicos es conservar el camino sobre el mismo trazado y características actuales, aplicando sobre la superficie de rodadura alguna solución sin mejorar la geometría (Dirección de Vialidad, MOP, 2023). Los caminos básicos intermedios (CBI) son caminos de bajo tránsito que reciben una solución de pavimento del tipo capa de protección asfáltica, concreto asfáltico u hormigón delgado (Dirección de Vialidad, MOP, 2011). Se aplican variadas soluciones para este tipo de caminos. Los pavimentos de capa delgada de mezcla asfáltica en caliente y tratamientos superficiales dobles son los métodos mayormente empleados. Por otra parte, existen nuevos métodos que representan una innovación tecnológica como los pavimentos de losa delgada y ultradelgada de hormigón. En torno a estas opciones, una buena solución desde el punto de vista técnico, económico y ambiental podría concentrarse en diseños que consideren menos materiales, que tengan menores costos económicos y ambientales, mientras cumplan satisfactoriamente con la demanda.

Específicamente, en cuanto a los costos ambientales de un diseño y su medición, existen herramientas como el análisis de ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA) que tiene como objetivo evaluar los aspectos ambientales y los posibles impactos que surgen a lo largo de todo el ciclo de vida de producto o material (Vogtländer, 2015). Existen métodos simplificados del LCA tradicional, como el Fast Track LCA y Streamlined LCA, que permiten evaluar los impactos ambientales de un proyecto de manera menos demandante que un LCA tradicional (Vogtländer, 2023). Esto facilita la realización de estimaciones ambientales.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar diseños óptimos para alternativas de pavimentación en caminos de bajo tránsito considerando aspectos estructurales, económicos y ambientales.

## 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar estructuralmente alternativas de pavimentación para caminos de bajo tránsito considerando capa delgada de mezcla asfáltica en caliente, doble tratamiento superficial asfáltico, y pavimento delgado y ultradelgado de hormigón.
- Estimar los costos económicos y ambientales de las alternativas de pavimentación diseñadas para seleccionar aquellas más económicas y sustentables.

## 1.3 ANTECEDENTES

Es crucial para Chile estimular la pavimentación de su red vial, con la intención de mejorar la accesibilidad de los caminos básicos que aún no cuentan con una alternativa de pavimentación definitiva, mediante la construcción de infraestructuras seguras y duraderas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la construcción de nueva infraestructura vial representa altos costos económicos para el país. Por ejemplo, el año 2024, las obras de conectividad vial no concesionadas, bajo la responsabilidad de la dirección de vialidad representaron el 62,4% de los \$2.263.299.116 que invirtió el MOP en un paquete de licitaciones (Dirección de Vialidad, MOP, 2024).

El rubro de la construcción genera emisiones de carbono debido al uso intensivo de materiales y residuos (Binder *et al.*, 2024). Dentro de las emisiones, una partida relevante tiene que ver con la pavimentación de un camino, durante la etapa de construcción, como de operación (Covarrubias *et al.*, 2016). Por otra parte, las conservaciones asociadas a las distintas alternativas de pavimentación y su frecuencia resultan vital a considerar por su alto impacto ambiental (Binder *et al.*, 2024).

Entre las alternativas de pavimentación empleadas en el país, el 82,25% de la red vial pavimentada corresponde a pavimentos de asfalto (Dirección de vialidad, MOP, 2023), dentro de esta categoría están los diseños de carpeta de mezcla asfáltica que son soluciones de capa asfáltica delgada de hasta 5 cm (Dirección de Vialidad, MOP, 2009). Otra alternativa es el tratamiento superficial doble (TSD), una solución básica que se compone de dos riegos alternados y uniformemente distribuidos de ligante bituminoso y

un agregado pétreo extraído de cantera (Montejo, 2002). Existen alternativas modernas orientadas a la optimización de diseños, como los pavimentos de losa delgada de hormigón que ajustan sus dimensiones para minimizar su espesor, disminuyendo el costo de construcción aproximadamente en un 20% en comparación con pavimentos de hormigón diseñados según AASHTO tradicional, el ahorro es similar frente a una solución de asfalto (Covarrubias, 2012). Por otra parte, los diseños de losas ultradelgadas de hormigón son una alternativa dirigida a aplicaciones en caminos de bajo tránsito, que necesitan contar con un pavimento competitivo en costo directo, que garantice una mayor durabilidad y, por ende, una menor intervención para su conservación (ICH, 2024), esto es importante, ya que los pavimentos modernos están diseñados para ser más duraderos, lo que significa menos reconstrucciones y, por lo tanto, menos emisiones a lo largo del tiempo (Pavimentos Chilenos, 2024).

Desde la concepción de una obra vial, se busca una estructura de pavimento que permita optimizar el diseño y asimismo los costos, manteniendo o mejorando el desempeño del pavimento (ProRoad Global, 2024). Existen una serie de alternativas para optimizar la estructura del pavimento. En Chile, la tecnología TCP (Thin concrete pavement) propone reemplazar las losas de pavimentación tradicional (AASHTO) por un sistema de losas con geometría optimizada que permite una distribución más eficiente de la carga para evitar los problemas de agrietamiento. El sistema TCP diseña una solución de pavimentación acorde al tipo de tráfico del proyecto vial, ya sea para autopistas, carreteras, calles de ciudad, patios industriales o estacionamientos. Con TCP las losas reducen su espesor entre 4 y 10 cm, con respecto a la pavimentación tradicional, logrando así una optimización de recursos de hasta un 30% (TCPavements, 2024). La figura 3 muestra el efecto de la reducción de carga generada por neumáticos en losas tradicionales al compararlas con losas de geometría optimizada, donde se observan tensiones máximas similares ante una disminución notoria del espesor.

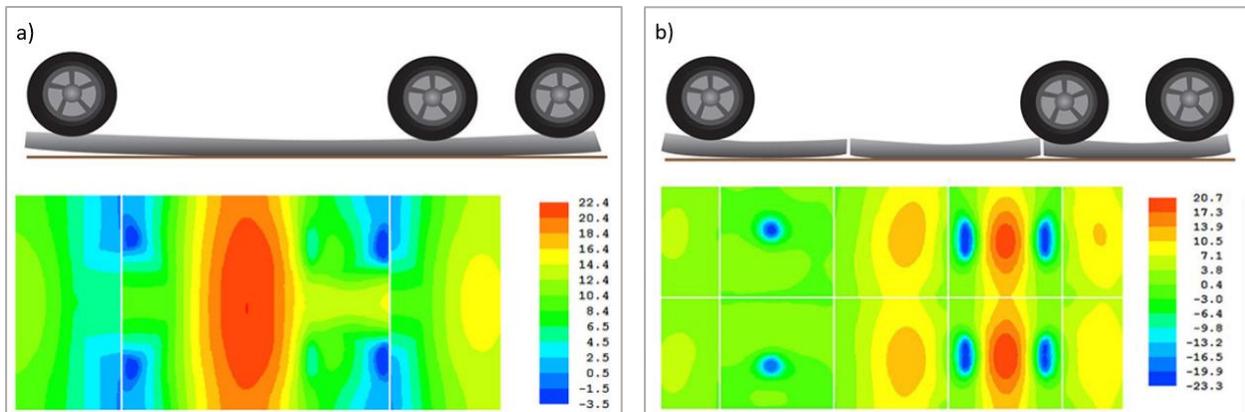


Figura 3. Efecto de reducción de cargas generados por neumáticos en losas tradicionales y losas optimizadas.

a) Espesor: 25cm, losas: 4,5m x 3,5m , maxima tensión: 22,4 kg/cm<sup>2</sup>.

b) Espesor: 15 cm, Losas: 1,75m x 1,75m, Máxima tensión: 20,7 kg/cm<sup>2</sup>.

Fuente: TCPavements, 2024.

Existen diversos métodos para cuantificar los costos ambientales. Por ejemplo, el LCA clásico centra su enfoque en la obtención del inventario y los impactos ambientales (Vogtländer, 2015). Sin embargo, se caracteriza por ser un proceso largo y laborioso, lo que lo hace poco práctico. Un LCA “completo” solo es posible una vez realizado el diseño, lo que no deja mucho margen para adaptar su diseño (The eco-costs, 2017). Otro método es el “Fast Track LCA”, que toma los cálculos del LCA clásico como datos de entrada para el cálculo de emisiones. Este método simplifica el análisis significativamente, ya que no es factible analizar todos los materiales y procesos a nivel de emisiones y uso de recursos naturales (Vogtländer, 2022). El objetivo de Fast Track LCA y su herramienta es realizar el análisis en un corto periodo de tiempo (horas, en lugar de días o semanas), y proporciona la información necesaria para el diseño (EcoCostsValue, 2023).

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

### **2.1 RESUMEN**

A lo largo del siguiente capítulo se expone la metodología desarrollada en esta investigación. Los casos de estudio desarrollados, los parámetros considerados, los diseños a 20 años y 30 años asociados a los métodos empleados, así como la estimación de los costos económicos y ambientales asociados a dichos diseños.

### **2.2 CASOS DE ESTUDIO**

Se establecieron cuatro ciudades (capitales de región) del centro-sur de Chile como zonas de estudio. Rancagua, como capital de la región del libertador Bernardo O'Higgins, la primera capital regional al sur de Santiago, con un clima mediterráneo de estaciones marcadas, con un verano cálido y seco, y un invierno frío y húmedo. Concepción, como capital de la región del Bio Bío, la segunda ciudad más poblada del país. Valdivia, como capital de la región de Los Ríos, la capital regional con mayor precipitación media anual según la tabla 3.604.210.A del manual de carreteras (MC), llegando a los 1874,1 mm, concentrados principalmente en invierno. Punta Arenas, como capital de la región de Magallanes y Antártica chilena, la ciudad más poblada de la Patagonia Austral, la capital regional con menor temperatura promedio anual con 6,3°C según la misma tabla 3.604.210.A del MC. Se optó por ciudades ubicadas en el centro sur del país debido a que el porcentaje de caminos sin una alternativa de pavimentación es elevado, superando el 50% en la mayoría de las regiones. En cada una de las ciudades se seleccionaron cuatro caminos de bajo tránsito ubicados en las zonas cercanas a dichas urbes, completando así dieciséis caminos. La figura 4 muestra la ubicación de las zonas de estudio.



Figura 4. Ubicación de zonas de estudio

Fuente: Google Maps (2024)

Se proponen diseños a 20 y 30 años para cada camino, considerando 4 alternativas de pavimentación; Pavimentos de capa delgada de asfalto, tratamiento superficial doble, pavimento de losa delgada de hormigón y losa ultradelgada de hormigón con fibras plásticas de polipropileno (PP). Los diseños difieren principalmente en demanda de ejes equivalentes acumulados, CBR de las subrasantes y los espesores de capas estructurales.

### 2.2.1 CASOS DE ESTUDIO A 20 AÑOS

Se tomaron como base los 16 caminos seleccionados, para cada uno se plantearon múltiples diseños, entre todas las combinaciones generadas se realizaron 364 diseños como casos de estudio a los 20 años entre todos los métodos considerados.

### 2.2.1.1 CASOS DE ESTUDIO PARA DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO EN CALIENTE

Para los casos de caminos con pavimento de capa delgada de asfalto se consideraron diseños con varias subrasantes de distinto CBR (%) y diferentes combinaciones de espesores de capas. Se generan 12 diseños para cada camino, completando 192 diseños de pavimentos de capa delgada de asfalto. La figura 5 muestra un esquema de los casos.

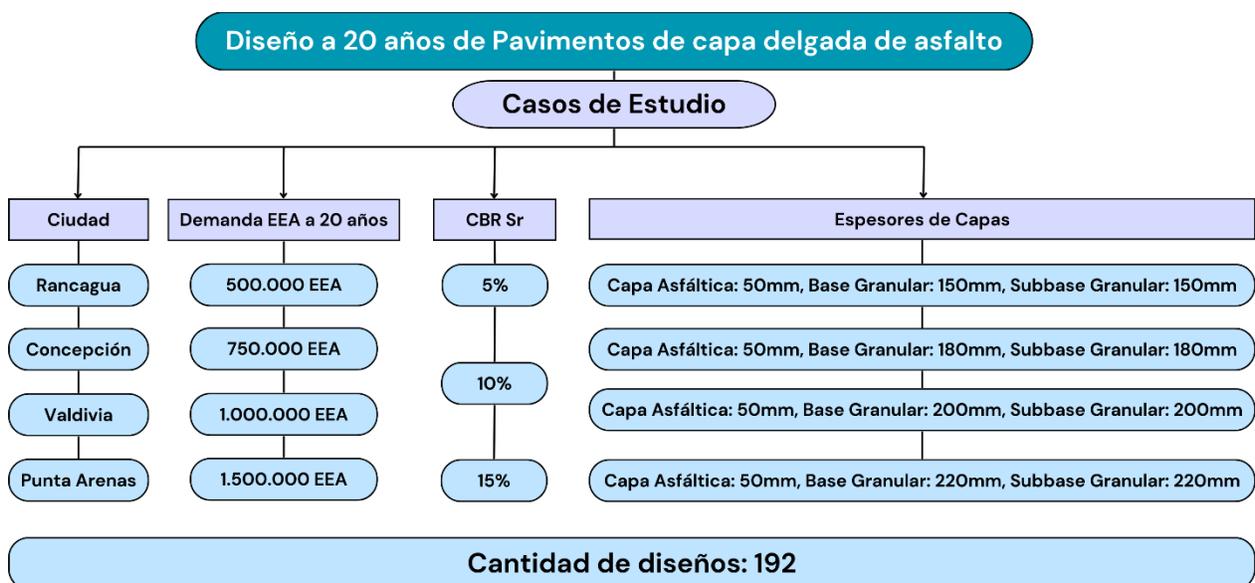


Figura 5. Esquema de casos considerados para diseños de pavimentos de capa delgada de asfalto a 20 años

Fuente: Elaboración Propia

### 2.2.1.2 CASOS DE ESTUDIO PARA DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

Para los casos de caminos con TSD se consideraron diseños con varias subrasantes de distinto CBR (%) y diferentes combinaciones de espesores de capas estructurales. Se generan 9 diseños para cada camino, completando 108 diseños. No se consideran diseños para la zona de Punta Arenas, ya que es zona afectada por heladas por lo que no se recomienda. La figura 6 muestra un esquema de los casos.

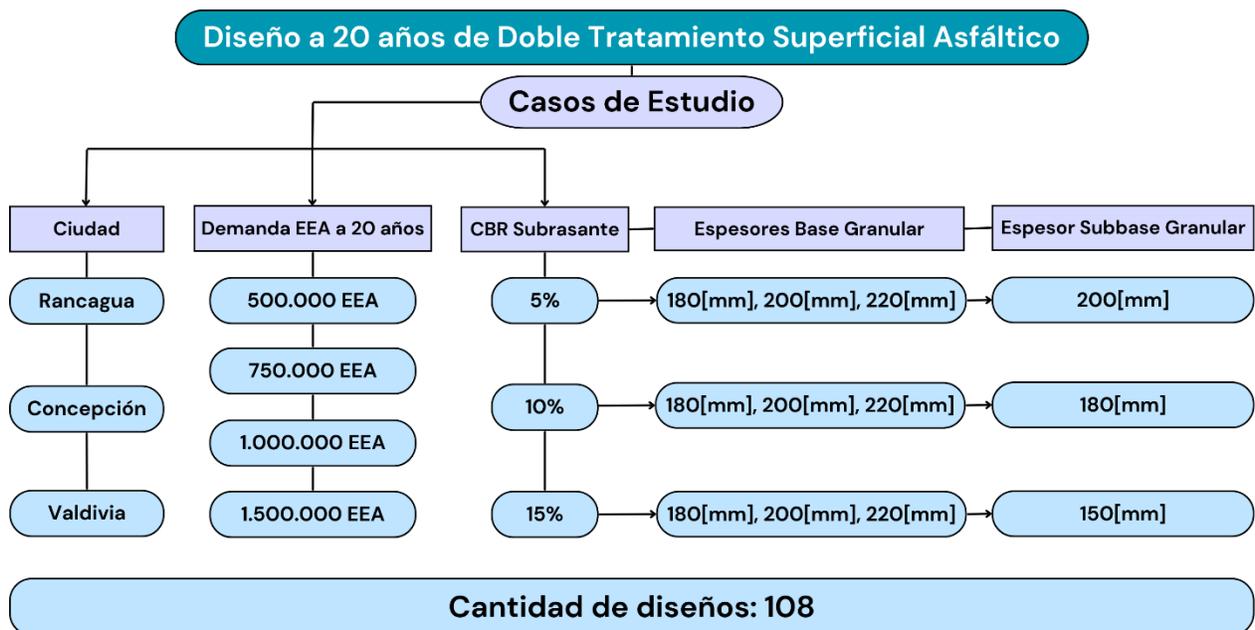


Figura 6. Esquema de casos considerados para diseños de TSD a 20 años

Fuente: Elaboración Propia

### 2.2.1.3 CASOS DE ESTUDIO PARA DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN Y LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE POLIPROPILENO

Para el caso de caminos con pavimentos de losas de hormigón se consideraron diseños de losa delgada y ultradelgada de hormigón con adición de fibras de polipropileno, todos con el mismo largo de losa y con diferentes espesores. Se generan 4 diseños para cada camino, con 2 diseños por cada tipo de losa, completando así 64 diseños de pavimentos de losa de hormigón. La figura 7 muestra el esquema de casos considerados.

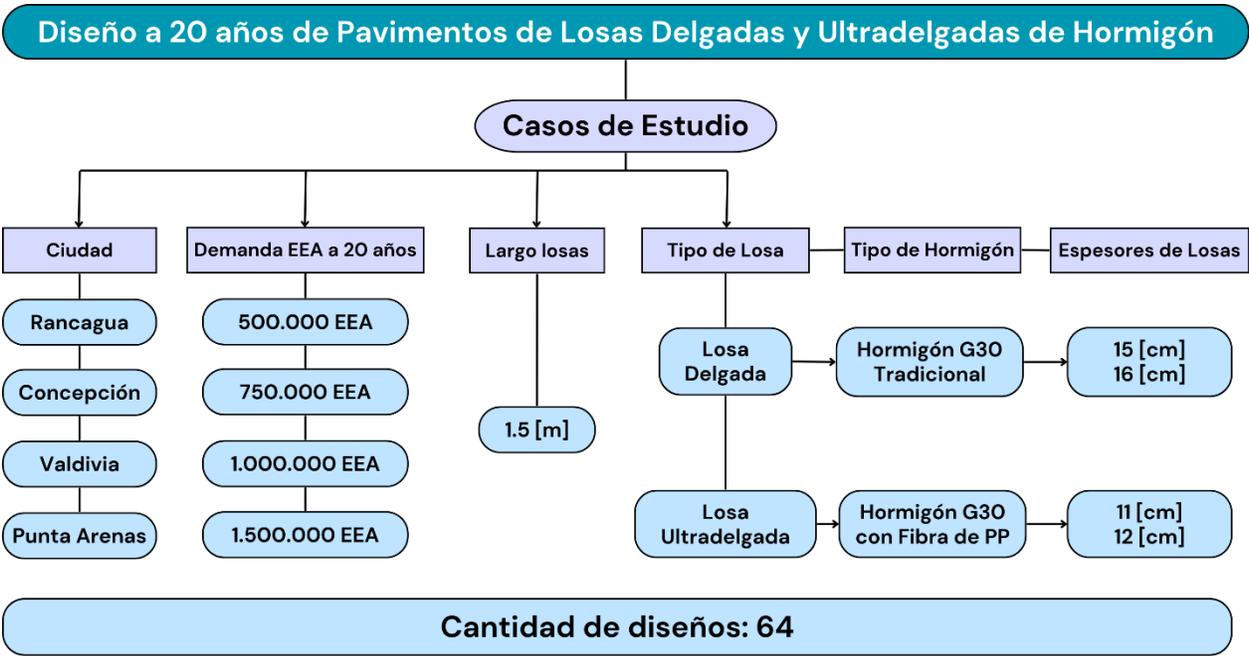


Figura 7. Esquema de casos considerados para diseños de pavimentos de losa de hormigón a 20 años

Fuente: Elaboración Propia

## 2.2.2 CASOS DE ESTUDIO A 30 AÑOS

Para este nuevo periodo de diseño, se consideraron los mismos caminos y sus datos, se plantearon también múltiples casos, entre todas las combinaciones se analizaron 124 diseños (92 diseños reevaluados y 32 diseños nuevos) como casos de estudio a los 30 años entre todos los métodos considerados.

### 2.2.2.1 CASOS DE ESTUDIO PARA DISEÑOS A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO EN CALIENTE

Para este caso, se seleccionó en cada camino el diseño de pavimento de capa delgada de asfalto óptimo a los 20 años de diseño para reevaluarlo a los 30 años con la demanda de EEA correspondientes. El diseño óptimo en cada caso es el que cumple con la demanda estructural considerando un menor volumen de materiales. Tomando en cuenta

lo anterior, se trabajó con un diseño por camino, completando 16 diseños a 30 años para este tipo de pavimentación. La figura 8 muestra el esquema de casos considerados.

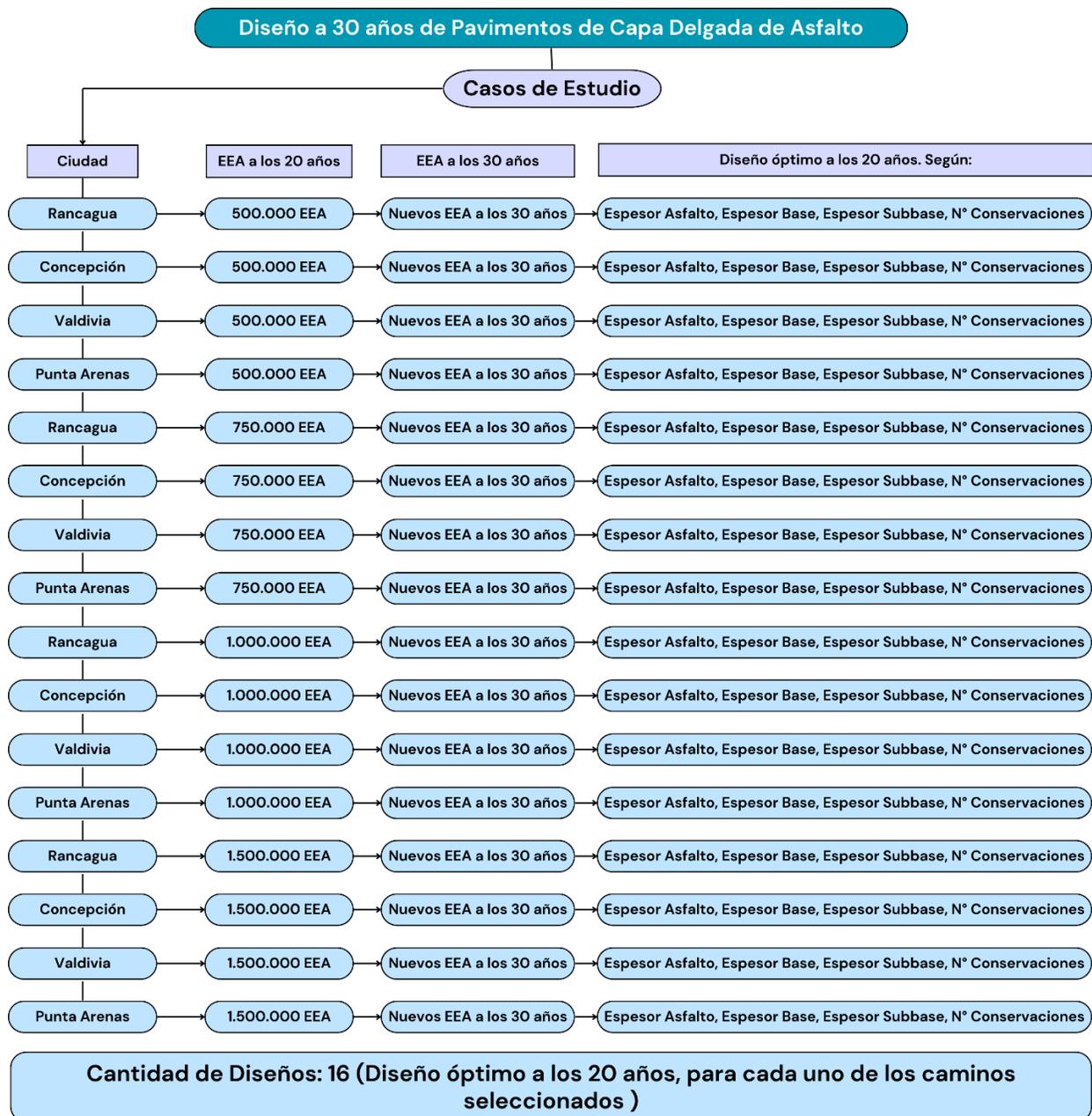


Figura 8. Esquema de casos considerados para diseños de pavimentos de capa delgada de asfalto a 30 años

Fuente: Elaboración Propia

## 2.2.2.2 CASOS DE ESTUDIO PARA DISEÑOS A 30 AÑOS DE TSD

Como en el caso anterior, se seleccionó para cada camino el diseño óptimo a los 20 años de diseño para reevaluarlo a los 30 años. Por lo mismo, se trabajó con un diseño por camino, completando 12 diseños a 30 años para este tipo de pavimentación. La figura 9 muestra el esquema de casos considerados.

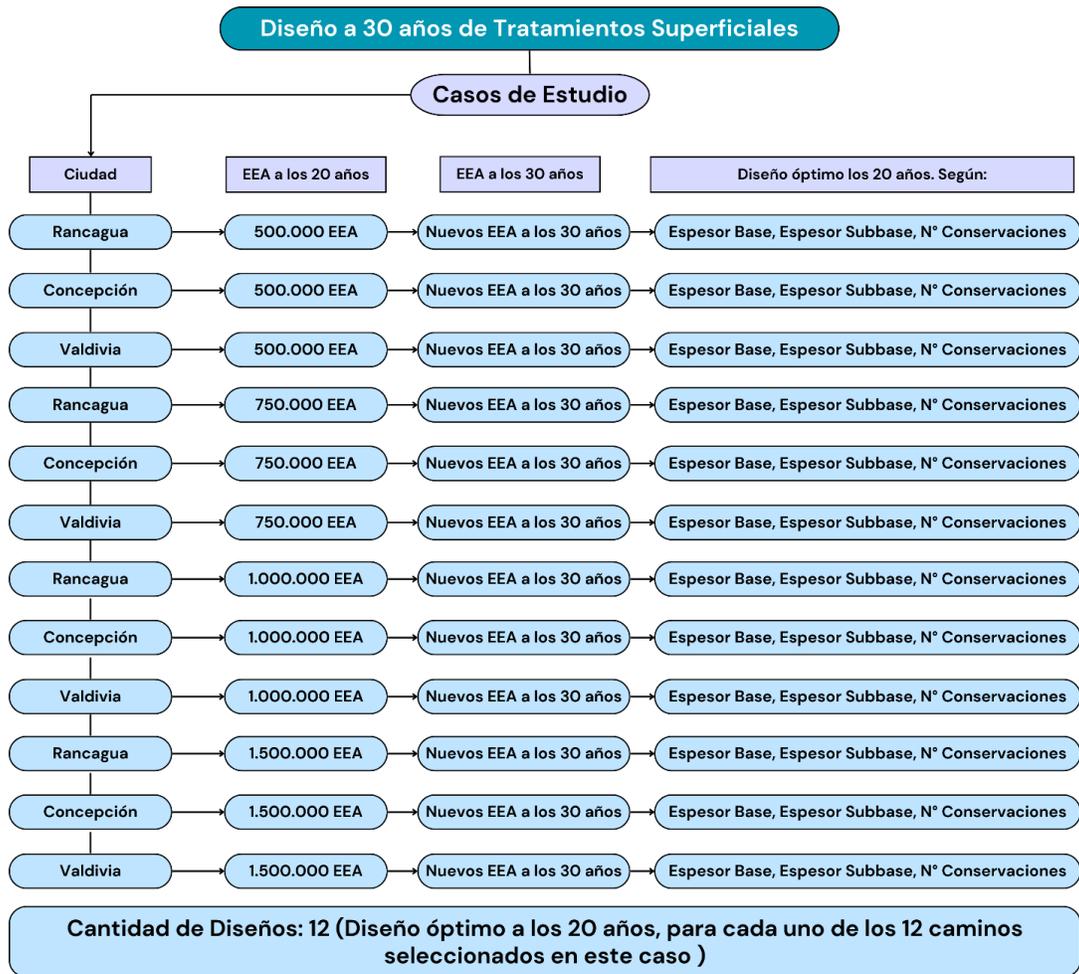


Figura 9. Esquema de casos considerados para diseños de TSD a 30 años

Fuente: Elaboración Propia

### 2.2.2.3 CASOS DE ESTUDIO PARA DISEÑOS A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN

Para el caso de los pavimentos de losa de hormigón a los 30 años, se consideraron diseños de losa delgada y ultradelgada para los 16 caminos, todas con el mismo largo de losa y con diferentes espesores de losa. Se realizaron 6 diseños para cada camino, con 3 diseños para cada tipo de losa, completando así 96 diseños de pavimentos de losa de hormigón. La figura 10 muestra el esquema de casos considerados

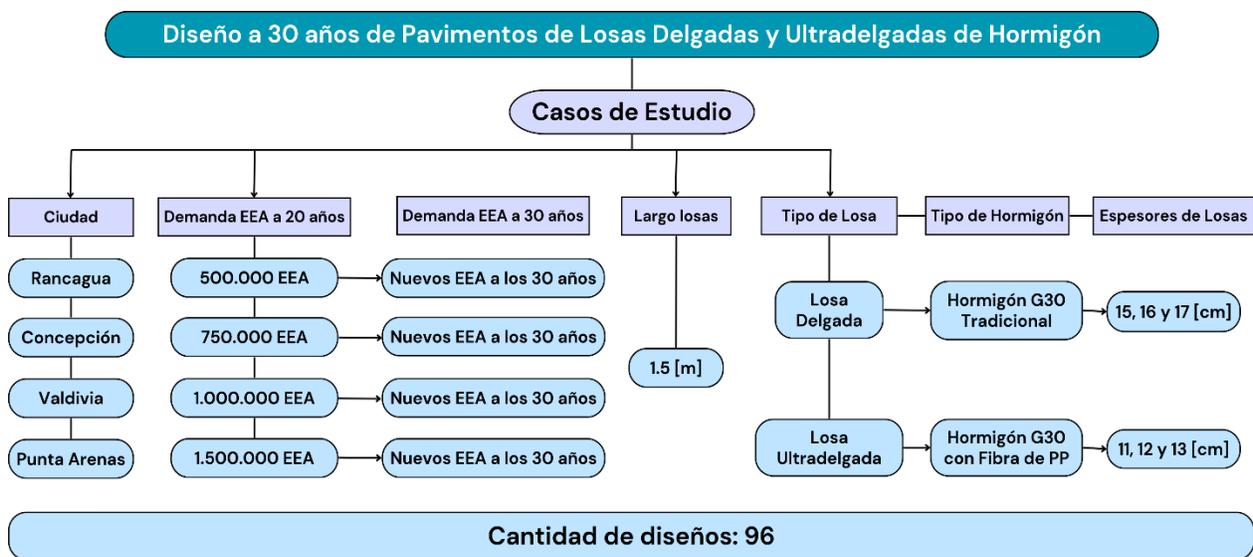


Figura 10. Esquema de casos considerados para pavimentos de losa de hormigón a 30 años

Fuente: Elaboración Propia

## 2.3 PARÁMETROS CONSIDERADOS

### 2.3.1 EJES EQUIVALENTES SOLICITANTES

El anexo “Consideraciones para el diseño de caminos de bajo tránsito” del “Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación” (MINVU, 2018) indica

que “la red vial de tuición de la Dirección de Vialidad tiene una gran cantidad de kilómetros de caminos no pavimentados, cuya demanda de tránsito está comprendida entre 200 y 700 veh/día, a los que podría corresponder hacer un cambio de estándar”. Tomando esto en cuenta se procura trabajar con valores de tránsito medio diario anual (TMDA) que se encuentren dentro de este rango de valores, o que lo superen en lo mínimo posible. Por su parte, la “Minuta ejecutiva: Evaluación del Programa de Caminos Básicos” (DIPRES, 2009), dice que “estos caminos deben tener un TMDA menor a 300 vehículos diarios, con no más de 75 vehículos pesados por día”, respecto a lo anterior, para esta investigación solo se toma en consideración lo último.

Se calcularon los EEA y TMDA por sentido de vía para periodos de diseño de 20 y 30 años para los dieciséis caminos, de acuerdo con el cuadro 3.603.202.E del MC. Se ingresaron datos oficiales del plan nacional de censos, de la Dirección de Vialidad del MOP como datos de entrada de volumen de tránsito. Con base en esos datos se ingresaron el TMDA actual, distribución vehicular, Factor de Equivalencia Vehicular (FEV), Factor de Ejes Equivalentes (FEE) y tasa de crecimiento de tránsito para cada caso. Los caminos seleccionados registraron un TMDA entre los 248 y 782 veh/día, mientras que no superaron los 75 vehículos pesados por día en ningún caso. Las tablas 1, 2, 3 y 4 muestran los datos de volumen de tránsito asociados a cada camino por zona.

Tabla 1. Datos de volumen de tránsito de los caminos de la zona de Rancagua

FEV		1	1	2	2.5	2.5	3	1.5		
FEE		0	0	1.35	3.37	3.37	4	0.85		
ROL	TMDA	Autos	Camionetas	Camion 2E	Camion +2E	Semi Remolque	Remolque	Loc. Colectiva	Tasa crec.	
H-510	321	56,18%	33,23%	6,75%	2,39%	0,31%	0,52%	0,62%	7,06%	
I-490	670	54,65%	33,47%	6,41%	2,44%	0,00%	0,00%	3,03%	4,55%	
I-112	501	43,55%	42,22%	7,31%	3,99%	1,26%	0,86%	0,80%	5,34%	
I-376	701	58,41%	26,52%	5,09%	4,33%	0,76%	0,48%	4,42%	6,60%	

Fuente: Adaptación desde datos de volumen de tránsito de la VI Región, año 2021

Tabla 2. Datos de volumen de tránsito de los caminos de la zona de Concepción

FEV		1	1	2	2.5	2.5	3	1.5		
FEE		0	0	1.35	3.37	3.37	4	0.85		
ROL	TMDA	Autos	Camionetas	Camion 2E	Camion +2E	Semi Remolque	Remolque	Loc. Colectiva	Tasa crec.	
Q-61	578	42,12%	49,37%	5,06%	1,38%	0,06%	0,29%	1,73%	5,11%	
N-14-O	501	50,39%	38,68%	5,19%	2,66%	0,07%	1,41%	1,60%	5,98%	
Q-469	761	36,45%	52,85%	4,61%	4,04%	0,13%	0,88%	1,05%	3,99%	
Q-510	749	46,57%	37,39%	9,14%	3,09%	0,98%	1,08%	2,26%	5,28%	

Fuente: Adaptación desde datos de volumen de tránsito de la VIII Región, año 2022

Tabla 3. Datos de volumen de tránsito de los caminos de la zona de Valdivia

FEV		1	1	2	2.5	2.5	3	1.5		
FEE		0	0	1.35	3.37	3.37	4	0.85		
ROL	TMDA	Autos	Camionetas	Camion 2E	Camion +2E	Semi Remolque	Remolque	Loc. Colectiva	Tasa crec.	
T-189	312	64,99%	25,08%	3,20%	3,95%	0,11%	2,56%	0,11%	4,92%	
T-218	502	49,60%	33,48%	4,69%	8,77%	0,06%	0,19%	3,21%	0,38%	
T-29	782	57,01%	31,83%	3,92%	4,64%	0,09%	0,04%	2,47%	4,01%	
T-731	705	52,43%	32,77%	7,38%	5,82%	0,19%	0,43%	0,99%	5,73%	

Fuente: Adaptación desde datos de volumen de tránsito de la XIV Región, año 2022

Tabla 4. Datos de volumen de tránsito de los caminos de la zona de Punta Arenas

FEV		1	1	2	2.5	2.5	3	1.5		
FEE		0	0	1.35	3.37	3.37	4	0.85		
ROL	TMDA	Autos	Camionetas	Camion 2E	Camion +2E	Semi Rem.	Remolque	Loc. Colectiva	Tasa crec.	
Ruta9N	416	63,30%	24,04%	4,25%	2,24%	0,08%	0,00%	6,09%	5,56%	
Y-85	248	20,98%	50,15%	15,27%	6,23%	0,48%	0,64%	6,25%	4,84%	
Q-510	516	52,66%	29,24%	5,34%	2,75%	0,56%	1,30%	8,15%	5,64%	
Y-85	491	30,81%	46,03%	8,31%	3,03%	4,53%	1,58%	5,71%	5,17%	

Fuente: Adaptación desde datos de volumen de tránsito de la XII Región, año 2022

Respecto a los caminos seleccionados y sus EEA, se trabajó con vías cuyos datos de volumen de tránsito generen demandas cercanas a 500.000, 750.000, 1.000.000 y 1.500.000 EEA a los 20 años de diseño para cada zona con la intención de analizar caminos con una demanda elevada dentro del rango de un camino de bajo tránsito.

### 2.3.2 CBR DE LAS SUBRASANTES

El valor del CBR cuantifica la capacidad resistente del suelo, este parámetro es empleado en todos los métodos de diseño planteados. La tabla 5 muestra una clasificación general para el suelo basándose en los valores del CBR.

Tabla 5. Clasificación de suelos según CBR

Valor CBR	Clasificación general	Uso
0-3	Muy pobre	Subrasante
3-7	Pobre a Regular	Subrasante
7-20	Regular	Subbase
20-50	Bueno	Base, Subbase
>50	Excelente	Base

Fuente: Manual de laboratorio de Suelos, Joseph Bowles

Se opta por trabajar con tres valores de CBR (%) para las subrasantes, estos son 5%, 10% y 15% respectivamente. Para los diseños de capa delgada de asfalto y TSD, se consideran estas tres, mientras que para los diseños de losa de hormigón se considera solo una subrasante del 10%.

### 2.3.3 ESPESORES DE CAPAS

En cuanto a los espesores de capa contemplados en las distintas soluciones, el enfoque principal fue trabajar con los menores espesores posibles para los distintos métodos, tomando siempre en cuenta la normativa y el desempeño estructural de los diseños.

Para los pavimentos de capa delgada de asfalto se consideró un espesor de capa asfáltica de 50 mm para todos los casos, siguiendo lo definido en “Informe final de evaluación: Programa de caminos básicos” (MOP Dirección de Vialidad, 2009), que indica que los caminos con solución de capa asfáltica delgada consisten en recubrir la superficie del camino no pavimentado con una carpeta de mezcla asfáltica de hasta 5 cm.

En Chile se han construido pavimentos de losa delgada de hormigón con espesores que varían entre 8 y 22 cm, los cuales han mostrado un desempeño conforme a las expectativas del diseño estructural, en función de las cargas de tráfico a las que han estado sometidos (Covarrubias, 2012). En esta investigación, para los diseños a 20 años se trabajó con losas de 15 y 16 cm de espesor, mientras que para los diseños a 30 años se trabajó con losas de 15, 16 y 17 cm de espesor, ya que consideran una demanda mayor.

Las losas ultradelgadas son pavimentos hechos de hormigón con fibra estructural que tienen un espesor de entre 8 y 12 cm que no requieren de una subbase como apoyo (Binder, 2024). Considerando lo anterior, a los 20 años de diseño se definieron losas de 11 y 12 cm, mientras que a los 30 años se definieron losas de 11, 12 y 13 cm nuevamente por una demanda mayor.

Respecto a las bases y subbases granulares para los distintos métodos, se toma como referencia la información mostrada en el “Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación” (MINVU, 2018). Si bien las condiciones y métodos de diseño no son los mismos, resulta útil para tomar como referencia a la hora de definir espesores de capas. La tabla 6 muestra los espesores mínimos y máximos de las capas compactadas según dicho documento.

Tabla 6. Espesores de base y subbase granulares

	<b>Base granular (mín. – máx.) (m)</b>	<b>Subbase granular (mín. – máx.) (m)</b>
<b>Pavimento Asfáltico</b>	0,15-0,30	0,12-0,30
<b>Pavimento Hormigón</b>	0,15-0,30	X

Fuente: Adaptación en base a información del código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación, Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2018)

Los espesores de las bases y subbases granulares se definieron según la figura anterior. Cabe recordar que los diseños de losa ultradelgada de hormigón no requieren de bases granulares debido a que se construyen directamente sobre la subrasante ya compactada, lo anterior se detalla en la tabla 7.

Tabla 7 Combinaciones de espesores de capas considerados

<b>Alternativa de pavimentación</b>	<b>Base (mm)</b>	<b>Subbase (mm)</b>
Capa delgada de Asfalto	150, 180, 200,220	150, 180, 200, 220
TSD	150, 180, 200	150, 180, 220
Losa delgada de hormigón	150	x
Losa ultradelgada de hormigón	X	x

Fuente: Elaboración Propia

#### 2.3.4 NIVEL DE CONFIANZA

En cuanto a los valores que afectan la confiabilidad, se trabaja de acuerdo con lo planteado en tabla 3.604.104.A del MC de nivel de confianza y valor del  $S_0$ . Se modelan solo caminos de menos de 5 millones de EE solicitantes. Por ende, según dicha tabla, se define una confiabilidad del 60%, un  $Z_r = -0,253$  y un  $S_0=0,465$  asociado a  $CV=25\%$  (Valor del CV recomendado en el numeral 3.604.302(2) del MC). Con estos datos se obtiene el factor de confiabilidad según ec.3.603.204(1).1 del MC.

#### 2.3.5 SERVICIABILIDAD

Concepto asociado a la percepción de calidad del pavimento durante su vida útil. Se trabajó con la tabla 3.604.102.A de índices de serviciabilidad del MC, donde se definieron el valor del índice de serviciabilidad inicial ( $p_i$ ) e índice de serviciabilidad final ( $p_f$ ) recomendados por la tabla, los cuales son  $p_i=4,2$  y  $p_f=2,0$ .

#### 2.3.6 COEFICIENTES DE DRENAJE DE LAS BASES Y SUBBASES GRANULARES

Para la determinación de los coeficientes de drenajes de los distintos modelos, se trabaja con la tabla 3.604.106.B de coeficientes de drenaje ( $m_i$ ) del MC en la que se proponen los coeficientes de drenaje para el país, categorizando cada zona por su ubicación (regiones), nivel de precipitaciones y el tipo de base. Respecto a esta última, se

consideran bases con más de 10% de finos, con una subrasante de suelos finos. En cuanto a las precipitaciones, para determinarlas, se trabaja con la tabla 3.604.210.A de estadísticas climáticas del MC, donde se muestra la precipitación media anual en milímetros de las ciudades de los distintos modelos. La tabla 8 muestra los coeficientes de drenaje correspondiente a cada zona de estudio tomando en base lo anterior.

Tabla 8. Coeficiente de drenaje para las cuatro zonas

<b>Cuidad</b>	<b>Coeficiente de Drenaje (mi)</b>
Rancagua	0,9
Concepción	0,8
Valdivia	0,6
Punta Arenas	1,0

Fuente: Adaptación desde datos de la tabla 3.604.106.B de coeficientes de drenaje del MC

### 2.3.7 MÓDULO RESILIENTE

Se expresa en función del CBR (%) de la subrasante, se calcula según ec. 3.604.105(1).1 del MC para  $CBR < 12\%$  y ec. 3.604.105(1).2 del MC para  $12\% \leq CBR < 80\%$ . Se definieron tres módulos resilientes asociados a las tres subrasantes de distinto CBR. Se trabajó con CBR del 5%, con CBR del 10% y CBR del 15% respectivamente para cada subrasante. La tabla 9 muestra los módulos resilientes asociados a los diferentes valores de CBR de las subrasantes.

Tabla 9. Módulo Resiliente de la subrasante, según CBR (%)

<b>CBR de la Subrasante</b>	<b>Modulo Resiliente</b>
CBR = 5%	Mr=49,3 [MPa]
CBR = 10%	Mr=76,8 [MPa]
CBR = 15%	Mr=98,0 [MPa]

Fuente: Elaboración Propia, a partir de ec 3.604.105(1).1 y 3.604.105(1).2 del MC

### 2.3.8 COEFICIENTES ESTRUCTURALES

Para la determinación del coeficiente estructural correspondiente a cada capa ( $a_1$  para la capa asfáltica,  $a_2$  para base granular y  $a_3$  para subbase granular), se tomó como base lo planteado a lo largo del numeral 3.604.107 del MC. En cuanto a la capa de asfalto, se siguió la tabla 3.604.107.A de coeficientes estructurales para las capas de pavimento del MC, esta define el concreto asfáltico de superficie, con un valor de estabilidad de Marshall de 9000 N, con lo que se determina el valor del coeficiente estructural ( $a_1$ ) según ec.3.604.107.2 del MC. Respecto a las capas de bases y subbases granulares no tratadas, se determina el valor de los coeficientes estructurales ( $a_2$ ) según ec.3.604.107.3 y ( $a_3$ ) según ec.3.604.107.4 del MC, en función del valor del CBR de cada una. Se modela con una base de un CBR del 100% y con subbases con un CBR del 40%. La tabla 10 muestra el valor de los coeficientes estructurales asociados a las diferentes capas.

Tabla 10. Coeficientes estructurales de las capas (%)

Capa	Coef. Estructural	Valor
Concreto Asfáltico de superficie (EM=9000[N])	$a_1$	0,43
Base CBR=100%	$a_2$	0,140
Subbase CBR=40%	$a_3$	0,117

Fuente: Elaboración Propia, a partir del numeral 3.604.107 del MC

### 2.4 DISEÑO A 20 AÑOS: CAPA DELGADA DE ASFALTO, TSD, LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.

Se muestran las metodologías asociadas a las distintas alternativas de pavimentación, con diseños a 20 años.

## 2.4.1 PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO

Se siguió el método AASHTO, fundamentalmente la versión de 1993 con adaptaciones a la realidad chilena. Se trabajó con lo planteado a lo largo de la sección 3.604.1 de pavimentos flexibles del MC.

### 2.4.1.1 NE REQUERIDO

En el proceso de diseño se consideró tres subrasantes diferentes de distinto CBR para cada zona. CBR  $S_{r1}=5\%$ , CBR  $S_{r2}=10\%$  y CBR  $S_{r3}=15\%$  respectivamente. Para determinar el número estructural (NE) requerido en las estructuras sobre las subrasantes para los distintos casos planteados, se trabajó según la fórmula general de diseño, correspondiente a las ecuaciones ec.3.604.101.1 y ec.3.604.101.2 del MC.

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

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

*Donde:*

*EE = Ejes equivalentes*

*NE = Número estructural*

*$M_r$  = Modulo resiliente*

*$p_i$  = Indice de serviciabilidad inicial*

*$p_f$  = Indice de serviciabilidad final*

Mediante el ingreso de estos datos e iteraciones en planillas, se llegó al valor de Número Estructural requerido ( $NE_{req}$ ) para cada caso, como se indica en la tabla 11.

Tabla 11. NE requerido según demanda de EEA y CBR (%) de la subrasante

<b>NEreq según CBR de la subrasante y los EEA de vida de diseño</b>				
<b>EEA Vida de Diseño</b>	<b>500.000 EEA</b>	<b>750.000 EEA</b>	<b>1.000.000 EEA</b>	<b>1.500.000 EEA</b>
<b>CBR <math>S_{r1}</math>=5%</b>	65,62	69,87	73,02	77,67
<b>CBR <math>S_{r2}</math>=10%</b>	55,77	59,49	62,26	66,33
<b>CBR <math>S_{r3}</math>=15%</b>	50,88	54,35	56,93	60,72

Fuente: Elaboración Propia a partir de ec.3.604.101.1 y ec.3.604.101.2 del MC.

#### 2.4.1.2 ESTRUCTURACIÓN DE CAPAS

Para los distintos diseños se tomó como base el numeral 3.604.108 del MC. Se definieron cuatro combinaciones de capas diferentes para el diseño estructural de los pavimentos, como se detalla en la tabla 12:

Tabla 12. Combinaciones de espesores de capas considerados

<b>Combinación de Espesores de Capas</b>	<b>Capa Asfáltica (mm)</b>	<b>Base (mm)</b>	<b>Subbase (mm)</b>
Combinación 1	50	150	150
Combinación 2	50	180	180
Combinación 3	50	200	200
Combinación 4	50	220	220

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente se evaluó el comportamiento estructural de los diseños, en cuanto a la relación entre el NEt obtenido por cada diseño (capacidad) y el NEreq para cada caso (demanda).

#### 2.4.1.3 DISEÑOS ÓPTIMOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO A LOS 20 AÑOS

Con los diseños realizados en base a la metodología descrita, se seleccionó el diseño óptimo para cada camino. Este fue el diseño que cumplió estructuralmente considerando el menor espesor de capas posible en cada caso.

## 2.4.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DOBLES

Como se menciona en el numeral 3.604.301 del MC el procedimiento constó en:

- Calcular el Índice Estructural (IE) requerido, en función de los EE solicitados en el modelo a lo largo de su vida útil, junto con el coeficiente de variación asociado.
- Definir el espesor mínimo, de la suma de los espesores de la base y subbase, en función del valor del CBR de la subrasante asociada al modelo.
- Determinar el espesor de cada capa que compone la estructura, de manera que la multiplicación de los espesores con su correspondiente coeficiente estructural asociado a los rangos de profundidad genere como resultado un valor igual o mayor al IE requerido.

### 2.4.2.1 CÁLCULO DEL ÍNDICE ESTRUCTURAL

Se definió en base al numeral 3.604.302 de cálculo de índice estructural del MC. Se asocia a la cantidad de ejes equivalentes acumulados en la vida de diseño y el coeficiente de variación. Se trabajó con las cuatro demandas planteadas (500.000, 750.00, 1.000.000 y 1.500.000 EEA) y con un CV=25%. La determinación del IE asociado a cada caso se realizó mediante el uso de la ec. 3.604.302(3).1 del MC.

$$IE(mm) = 1024v^{0,354} \left[ \frac{9,56}{11,49 - \log(EE)} - 1 \right]$$

*Donde:*

*v = Coeficiente de variación*

#### 2.4.2.2 ESTRUCTURACIÓN DE CAPAS

Se siguió el numeral 3.604.304(2) del MC, para los distintos diseños. Se definieron tres combinaciones para cada CBR, esto se detalla en la tabla 13.

Tabla 13. Combinaciones de capas consideradas para TSD

<b>CBR</b>	<b>Base (mm)</b>	<b>Subbase (mm)</b>
5%	200	150, 180, 200
10%	180	150, 180, 200
15%	150	150, 180, 200

Fuente: Elaboración Propia.

El espesor mínimo de recubrimiento se relaciona con la capacidad de soporte de la subrasante del proyecto. Mientras que la capacidad de soporte de la subrasante se asocia al valor del CBR del suelo. La determinación del valor del recubrimiento mínimo se realizó en base a la ec.3.604.304. (1).1 del MC.

$$e_{min}(mm) = 592 - 308 \log(CBR)$$

Los valores de los coeficientes estructurales correspondientes a las capas de la estructura son los indicados en la sección de parámetros considerados. Se trabajó con bases granulares de CBR=100% y subbases granulares de CBR=40%.

#### 2.4.3 PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN

Se trabajó según lo planteado en el “Método de diseño de pavimentos de hormigón con losas de espesor optimizado” (Orden N°9371 MOP, 2012). Además, se tomó como base lo planteado en el documento “Análisis estructural de pavimentos de hormigón con losas cortas” (Pradena, César, 2021).

### 2.4.3.1 PARÁMETROS DE ENTRADA Y CONDICIONES DE PAVIMENTO

Para cada camino se consideró un largo de 1,5 m. La tabla 14 muestra las condiciones del pavimento consideradas para los caminos:

Tabla 14. Condiciones de pavimento de cada camino

Parámetro	Valor	Definición
CBR Sr (%)	10	CBR (%) de la subrasante Sr
k (MPa/m)	59,62	Módulo de reacción de la subrasante Sr
l (m)	0,818	Radio de Rigidez Relativa
h2 (m)	0,150	Espesor de capa base
P (kN)	20,017	Carga de rueda
q (N/mm <sup>2</sup> - MPa)	0,82	Presión de inflado de rueda
s (m)	0,305	Espaciado entre ruedas
Mr (MPa)	4,3	Resistencia prom. flexo tracción (28 días)
E (MPa)	29.000	Módulo de Elasticidad del Hormigón
Poisson $\mu$	0,15	Módulo de Poisson
$\alpha$ (1/°C)	0,00001	Coefficiente de expansión térmica
Grad. constr. (°C)	-10	Gradiente de construcción
Grad. variac. t° (°C/cm)	-0,20	Gradiente variación de temperatura
$\Delta t$	-13,4	Diferencial de temperatura
Eficiencia transf. Carga (%)	94%	Eficiencia de transferencia de carga
$\gamma$ hormigón (kg/m <sup>3</sup> )	2.400	Peso específico del hormigón
Carga aplicada (KN)	40,034	Carga total aplicada

Fuente: Pradena, César, 2021

Los parámetros anteriores, se emplearon para determinar todas las tensiones relevantes que permitieron calcular el desempeño estructural de cada diseño, dependiendo del largo y espesor de losa. El proceso de cálculo se basa en las ecuaciones de Westergaard (Westergaard, 1926).

### 2.4.3.2 TENSIÓN PRODUCIDA POR CARGA EN LA JUNTA TRANSVERSAL

Para determinar la tensión producida en la junta transversal se calcularon los siguientes parámetros:

La tensión máxima por carga en el borde de la losa:  $\sigma_{wl}$  [MPa].

$$\sigma_{wl} = \frac{3P(1 + \nu)}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1 - \nu}{2} + \frac{1,18(1 + 2\nu)a}{l} \right]$$

Donde:

$P$  = Carga total aplicada [MN]

$E$  = Modulo de elasticidad del hormigón [MPa]

$\nu$  = Módulo de Poisson

$h$  = Espesor de la losa [m]

$k$  = Módulo de reaccion de la subrrasante  $\left[ \frac{MPa}{m} \right]$

$a$  = Radio del área de la carga aplicada [m]

$l$  = Radio de rigidez relativa [m]

El radio de rigidez relativa:  $l$  [m].

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)k}}$$

El radio del área de la carga aplicada:  $a$  [m].

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi q * 1000}}$$

Donde:

$q$  = presión de la rueda del vehiculo [MPa]

El radio de carga circular equivalente:  $a_{nw}$  [m].

$$a_{nw} = a \left[ 1,18891 - 0,23700 \left( \frac{a}{l} \right) + 0,154530 \left( \frac{S_2}{a} \right) - 0,0484517 \left( \frac{a}{l} \right) \left( \frac{S_2}{a} \right)^2 + 0,090236 \left( \frac{a}{l} \right)^2 \left( \frac{S_2}{a} \right) + 0,515343 \ln \left( \frac{S_2}{a} \right) \right]$$

Donde:

$S_2 =$  Distancia entre las dos ruedas [m]

El factor de efecto de longitud de la losa:  $F_{\sigma L}$ .

$$F_{\sigma L} = 0,65751 - 1,79166 \left( \frac{a}{l} \right) - 0,00682 \left( \frac{L}{l} \right)^2 + 0,70807 \left( \frac{a}{l} \right) \left( \frac{L}{l} \right) + 0,32194 \ln \left( \frac{L}{l} \right) - 0,06809 \ln \left( \frac{a}{l} \right) \left( \frac{L}{l} \right)^2$$

Donde:

$L =$  Longitud de la losa [m]

El factor de efecto de transferencia de carga en la junta transversal:  $F_{\sigma TCT}$ .

$$F_{\sigma TCT} = 0,996573 + 0,00439187(LTE) - 0,00005851(LTE)^2 - 0,003124 \left( \frac{a}{l} \right) (LTE) - 0,03682 \ln(LTE)$$

Donde:

$LTE =$  Porcentaje de Eficiencia de transferencia de carga entre losas

La tensión de curvatura o esfuerzo por alabeo:  $\sigma_{wT}$  [MPa].

$$\sigma_{wT} = \left\{ 1 - \frac{2 \cos\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) \cosh\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right)}{\sin\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) + \sinh\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right)} \left[ \tan\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) + \tanh\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) \right] \right\} \frac{E\alpha\Delta t}{2}$$

Donde:

$\alpha =$  Coeficiente de expansión térmica

$\Delta t =$  Diferencial de temperatura

El factor de corrección: R.

$$R = 60,799 - 843104,342(\Delta t * \alpha) + 1852656915,923(\Delta t * \alpha)^2 + 307927,651(\Delta t * \alpha) \left(\frac{L}{l}\right) - 396088956,469(\Delta t * \alpha)^2 \left(\frac{L}{l}\right) + 23,671 \left(\frac{L}{l}\right) - 28263,280(\Delta t * \alpha) \left(\frac{L}{l}\right)^2 - 108,761 \ln\left(\frac{L}{l}\right)$$

La tensión total producida por carga en la junta transversal de la losa:  $\sigma_T$  [MPa].

$$\sigma_T = [(F_{\sigma_L} + F_{\sigma_{LT}} + F_{\sigma_{TCT}}) * \sigma_{wL} * a_{nw}] + (R * \sigma_{wT})$$

Donde:

$F_{\sigma_{LT}} = 1$ , debido a baja transferencia de carga asociada a la interacción entre losa y berma

#### 2.4.3.3 TENSIÓN PRODUCIDA POR CARGA EN EL BORDE

Para determinar la tensión producida en el borde se calcularon los siguientes parámetros:

La tensión máxima por carga en borde adyacente a la berma:  $\sigma_{w,e}$  [MPa].

$$\sigma_{w,e} = \frac{3P(1 + \nu)}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[ \ln\left(\frac{Eh^3}{100ka_{nw}^4}\right) + 1,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1 - \nu}{2} + \frac{1,18(1 + 2\nu)a_{nw}}{l} \right]$$

El radio de carga circular equivalente:  $a_{nw}$  [m].

$$a_{nw} = a \left[ 0,909 + 0,339485 \left( \frac{S_2}{a} \right) + 0,103946 \left( \frac{a}{l} \right) - 0,017881 \left( \frac{S_2}{a} \right)^2 + 0,045229 \left( \frac{a}{l} \right) \left( \frac{S_2}{a} \right)^2 + 0,000436 \left( \frac{S_2}{a} \right)^3 - 0,301805 \left( \frac{a}{l} \right)^3 \left( \frac{S_2}{a} \right) + 0,034664 \left( \frac{a}{l} \right)^2 \left( \frac{S_2}{a} \right)^2 + 0,001 \left( \frac{S_2}{a} \right)^3 \left( \frac{a}{l} \right) \right]$$

El factor del efecto de longitud de losa:  $F_{\sigma L}$ .

$$F_{\sigma L} = 0,582282 - 0,533078 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) + 0,181706 \left( \frac{L}{l} \right) - 0,019824 \left( \frac{L}{l} \right)^2 + 0,109051 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) \left( \frac{L}{l} \right)$$

El espesor efectivo no ligado:  $h_{eff,u}$  [m].

$$h_{eff,u} = \left( h^3 + h_2^3 \frac{E_2 h_2}{E h} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

$h_2 =$  Espesor de capa base

$E_2 =$  Módulo de Elasticidad de la capa base

La tensión efectiva de borde del espesor equivalente:  $\sigma_{eff,u}$  [MPa].

$$\sigma_{eff,u} = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h_{eff,u}^2} \left[ \ln \left( \frac{E h_{eff,u}^3}{100k a_{nw}^4} \right) + 1,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1,18(1+2\nu)a_{nw}}{l_{eff}} \right]$$

Donde:

$l_{eff} =$  Radio de rigidez relativa calculado con espesor efectivo [m]

La tensión máxima en la capa de hormigón:  $\sigma_{1,u}$  [MPa].

$$\sigma_{1,u} = \frac{h}{h_{eff,u}} \sigma_{eff}$$

El factor de interacción de la capa de hormigón con capa base:  $F_{\sigma_B}$ .

$$F_{\sigma_B} = \frac{\sigma_{1,u}}{\sigma_{w,e}}$$

El factor del efecto de la distancia de la carga al borde de la losa:  $F_{\sigma_D}$ , aplicada con tres distancias de la carga al borde (0m, 0,4m, 1,8m).

$$F_{\sigma_D} = -0,15743211 + 0,2693503 \left(\frac{a_{nw}}{l}\right) + 0,357644 \left(\frac{1}{D}\right) - 0,0589073 \left(\frac{1}{D}\right)^2 + 0,003486 \left(\frac{1}{D}\right)^3$$

La tensión de curvatura:  $\sigma_{wT}$  [MPa].

$$\sigma_{wT,e} = \left\{ 1 - \frac{2 \cos\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) \cosh\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right)}{\sin\left(\frac{L}{l\sqrt{2}}\right) + \sinh\left(\frac{L}{l\sqrt{2}}\right)} \left[ \tan\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) + \tanh\left(\frac{L}{2l\sqrt{2}}\right) \right] \right\} \frac{E\alpha\Delta T}{2}$$

El factor de corrección: R.

$$R = 1,38302 - \frac{0,139374}{\frac{a_{nw}}{l}} + \frac{0,012349}{\left(\frac{a_{nw}}{l}\right)^2} - \frac{0,000329}{\left(\frac{a_{nw}}{l}\right)^3} + 23,637919 \left(\frac{L}{l}\right)^{-3} - 0,864308 \left(\frac{L}{l}\right)^{-2} \Delta T + 0,00204 \left(\frac{L}{l}\right)^{-1} \Delta T^2$$

La tensión producida por las cargas a las tres distancias del borde (0m, 0,4m, 1,8m):  $\sigma_T$  [MPa].

$$\sigma_T = [(F_{\sigma_L} * F_{\sigma_B} * F_{\sigma_{LT}} * F_{\sigma_D}) * \sigma_{w,e}] + (R * \sigma_{wT,e})$$

#### 2.4.3.4 TENSIÓN PRODUCIDA POR CARGA EN LA ESQUINA

Para determinar la tensión producida en la esquina se calcularon los siguientes parámetros:

La tensión máxima por carga en la esquina:  $\sigma_{w,c}$  [MPa].

$$\sigma_{w,c} = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a_{nw}\sqrt{2}}{l} \right)^{0,64} \right]$$

El factor de ajuste de longitud de losa:  $F_{\sigma_{L,c}}$ .

$$F_{\sigma_{L,c}} = 0,759979 - 2,09613 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) + 0,182884 \left( \frac{L}{l} \right) + 37,26277 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right)^2 - 1,93210 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) \left( \frac{L}{l} \right) - 110,506 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right)^3 + 5,006827 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right)^2 \left( \frac{L}{l} \right)$$

El factor de ajuste del efecto de transferencia de carga en la junta transversal:  $F_{\sigma_{T,c}}$ .

$$F_{\sigma_{T,c}} = \begin{cases} 0,9206185 - 0,736706 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) - 0,11315 \ln \left( \frac{LTE}{kl} \right) + 0,008451 \ln^2 \left( \frac{LTE}{kl} \right) \\ \quad + 0,0355522 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right)^2 \ln^2 \left( \frac{LTE}{kl} \right), \text{ si } 0,8 < \frac{LTE}{l} < 10000 \\ 0,9127307 - 0,5568615 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) - 0,0126335 \ln \left( \frac{LTE}{kl} \right) \\ \quad - 0,080614 \left( \frac{a_{nw}}{l} \right) \ln \left( \frac{LTE}{kl} \right), \text{ si } 0,001 < \frac{LTE}{l} < 0,8 \end{cases}$$

El esfuerzo de curvatura de la losa:  $\sigma_{wT,c}$  [MPa].

$$\sigma_{wT,c} = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu^2)} (C_L + \nu C_W)$$

Donde:

$C_L$  = Coeficiente de curvatura asociado a la longitud de la losa

$C_W$  = Coeficiente de curvatura asociado al ancho de la losa

Los coeficientes de curvatura asociados al largo ( $C_L$ ) y ancho ( $C_W$ ) de la losa:

$$C = 1 - \frac{2 \cos(\lambda) \cosh(\lambda)}{2 \sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)} [\tan(\lambda) + \tanh(\lambda)], \quad \text{donde } \lambda = \frac{A}{2l\sqrt{2}}$$

Donde:

$A =$  Largo de losa para coeficiente  $C_L$

$A =$  Ancho de losa para coeficiente  $C_W$

La tensión total en la losa producida por el efecto combinado de la curvatura y la carga en la esquina de la losa:  $\sigma_T$  [MPa].

$$\sigma_T = 0,992 [\sigma_{w,c} (F_{\sigma_{L,c}} * F_{\sigma_{T,c}})] + 0,346 \sigma_{wT,c}$$

#### 2.4.3.5 CÁLCULO DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

Se calculó la constante de forma de fractura  $C$ . En función de la altura de cada diseño y de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  para el factor de forma en pavimentos de losas cortas con todas las juntas activadas. La tabla 15 muestra los valores de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  según la posición de carga.

Tabla 15. Constantes para el factor de forma en pavimentos de losas cortas con todas las juntas activadas

Posición de carga	a	b	c
Borde	0,0003	-0,1475	2,7978
Centro de la junta transversal	0,0003	-0,1475	2,7978
Esquina	0	0	1

Fuente: Pradena, César, 2021

El valor de la constante de forma de fractura  $C$  se calculó para cada posición de carga según:

$$C = a * h^2 + b * h + c, \quad \text{donde } h = \text{Espesor de losa [m]}$$

Se calcularon el número de repeticiones de carga permitidas (N) en términos de carga equivalente por eje (EEA) según la ley de Miner (Miner, 1945). En función de la resistencia a la flexión del hormigón (Mr), la constante de forma de fractura (C) y las tensiones resultantes ya calculadas.

La ley de Miner plantea que:

$$\log(N_{i,j,k}) = 2 \left( \frac{CM_r}{\sigma_{i,j,k}} \right)^{1,22}$$

Donde:

*i = Nivel de carga*

*j = diferencial de temperatura*

*k = posición de carga*

Se calculo el factor de daño (FD). En función de los ejes equivalente de diseño experimentados por el pavimento (n) y de las repeticiones de carga permitidas (N).

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k}}{N_{i,j,k}}$$

Finalmente se calculó el porcentaje de losas agrietadas (CRK) para cada caso. En función del factor de daño (FD) y de las constantes a y b de agrietamiento en losas cortas con todas las juntas activadas. La tabla 16 muestra los valores de los parámetros a y b según la posición de carga.

Tabla 16. Constantes para el factor de forma en pavimentos de losas cortas con todas las juntas activadas

Posición de carga	a	b
Borde	-1,6	15,75
Centro de la junta transversal	-1,35	1,46
Esquina	-1,98	50

Fuente: Pradena, César, 2021

El porcentaje de losas agrietadas (CRK) se calculó según:

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

#### 2.4.3.6 DISEÑOS ÓPTIMOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA A LOS 20 AÑOS DE DISEÑO

Con los diseños realizados en base a la metodología descrita se seleccionó diseño óptimo para cada camino. El diseño óptimo corresponde al diseño que cumple estructuralmente contemplando un agrietamiento transversal menor a 30% (para evitar conservaciones) y con un espesor de losa menor para cada camino.

#### 2.4.4 PAVIMENTOS DE LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE POLIPROPILENO (PP)

Se plantearon diseños de pavimentos de losa de hormigón con adición de fibras de PP, siguiendo el mismo método de los pavimentos de losa de hormigón, con algunas modificaciones en los cálculos de acuerdo con Salah *et al.* (2005) que considera la adición de fibras de polipropileno a la mezcla de hormigón. Estos diseños se plantearon con la intención de estimar la competitividad de este tipo de losa frente a la losa delgada de hormigón, ya que la adición de fibras mejora la resistencia a la flexotracción de las losas permitiendo diseños que contemplen losas más delgadas.

##### 2.4.4.1 LARGO Y ESPESORES DE LOSAS

Se consideraron los valores de largo y espesor de losa mostrados en la tabla 17:

Tabla 17. Largo de losa (m) y espesores de losa (cm) considerados para cada camino

Largo losas (m)	Espesores losas
1,5m	11 y 12cm

Fuente: Elaboración Propia

#### 2.4.4.2 FIBRAS EMPLEADAS

Se consideró un hormigón reforzado con fibras de polipropileno en una concentración del 0,4%. La tabla 18 muestra las características y propiedades de las fibras consideradas.

Tabla 18. Características y propiedades de las fibras de polipropileno

<b>Categoría</b>	<b>Valor</b>
Tipo de fibra	Macro fibra sintética
Material	Mezcla de polipropileno (PP)
Sección	Rectangular
Largo (mm)	40
Espesor (mm)	0,105
Ancho (mm)	1,4
Tensile Capacity (MPa)	6,20
Módulo de elasticidad (GPa)	9,5

Fuente: Salah *et al.*, 2005.

#### 2.4.4.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EQUIVALENTE ( $R_{e,3}$ ) Y RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN EFECTIVA DEL HORMIGÓN CON FIBRAS ( $M_r'$ )

La adición de fibras genera un aumento en el valor del módulo de resistencia a la flexotracción del hormigón lo que se traduce en un aumento de la resistencia o mejora de las propiedades mecánicas de éste. Se trabajó con una concentración de fibras del 0,4% en las losas de hormigón, que por interpolación lineal entrega un  $R_{e,3}$  del 30%, según lo mostrado en la tabla de “Diseño experimental y resumen de los resultados de las pruebas a gran y pequeña escala” (Salah *et al.*, 2005). Con esto se calculó el valor de resistencia a la flexotracción efectivo asociado a la adición de fibras. La tabla 19 muestra el aumento en el módulo de resistencia a la flexotracción.

Tabla 19. Resistencia a la flexotracción (MPa) de hormigón y hormigón con adición de fibras de PP

	<b>Hormigón</b>	<b>Hormigón con adición de fibras de PP</b>
$M_r$ (MPa)	4,3	5,59

Fuente: Elaboración Propia, en base a la metodología planteada en Salah *et al.* (2005)

Una vez calculado el valor de la resistencia a la flexotracción asociado a la adición de fibras, se siguió el mismo procedimiento del diseño de pavimentos de hormigón de losa delgada descrito anteriormente. Se consideró el nuevo  $M_r$  del hormigón ( $M_r'$ ), con los nuevos espesores planteados (11 y 12 cm). Las condiciones del pavimento y largo de losas son las mismas que las de las losas delgadas de hormigón.

#### 2.4.4.4 DISEÑOS ÓPTIMOS DE PAVIMENTOS DE LOSA ULTRADELGADA A LOS 20 AÑOS DE DISEÑO

Se seleccionó diseño óptimo para cada camino, siguiendo la misma lógica que para los pavimentos de losa delgada de hormigón. El diseño óptimo corresponde al diseño que cumple estructuralmente contemplando un agrietamiento transversal menor a 30% y que contempla el espesor menor para cada camino.

### 2.5 DISEÑO A 30 AÑOS: CAPA DELGADA DE ASFALTO, TSD, LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN.

#### 2.5.1 DISEÑO A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO

Para este caso se tomó como base el diseño de pavimento de capa delgada de asfalto óptimo para cada camino a los 20 años de diseño. El número de conservaciones varía para cada camino entre los 20 y 30 años, por lo que el diseño se reevaluó con las conservaciones correspondientes.

## 2.5.2 DISEÑO A 30 AÑOS DE TSD

Al igual que el caso anterior, para el TSD se tomó como base el diseño óptimo para cada camino a los 20 años. Cada diseño se reevaluó con las conservaciones correspondientes a los 30 años de diseño.

## 2.5.3 DISEÑO A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE POLIPROPILENO

Los diseños de ambos pavimentos de losa de hormigón se determinan de la misma manera en la que se planteó anteriormente para los 20 años de diseño. Sin embargo, a los 30 años aumenta el número de EEA sustancialmente. Esto se traduce en una nueva demanda estructural. Para esto se evalúan los diseños tomando en cuenta los EEA a los 30 años.

### 2.5.3.1 LARGO Y ESPESORES DE LOSAS

Como el número de EEA aumenta, se añade un tercer espesor, en comparación con los dos espesores considerados en los 20 años de diseño. La tabla 20 muestra el largo y espesores considerados a los 30 años de diseño para cada tipo de losa de hormigón.

Tabla 20. Largo de losa (m) y espesores de losas (cm) considerados para cada camino

<b>Tipo de Losa</b>	<b>Largo losas (m)</b>	<b>Espesor losas (cm)</b>
Losa Delgada	1,5	15, 16, 17
Losa Ultradelgada	1,5	11, 12, 13

Fuente: Elaboración Propia

### 2.5.3.2 REEVALUACIÓN DE DISEÑOS

Para reevaluar diseños a los 30 años se sigue el mismo procedimiento de diseño desarrollado anteriormente para cada tipo de losa de hormigón. Sin embargo, en este caso la demanda evaluada de EEA es otra para cada uno de los 16 caminos. Se reevalúan diseños para cada camino con la nueva cantidad de EEA a los 30 años y los tres espesores considerados para cada tipo de losa. Se generan en total seis diseños para cada camino (tres de cada tipo de losa), completando así 96 diseños.

### 2.5.3.3 DISEÑOS ÓPTIMOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA A LOS 30 AÑOS DE DISEÑO

Se seleccionó diseño óptimo para cada camino según el tipo de losa, siguiendo la misma lógica que para los 20 años de diseño.

## 2.6 CONSERVACIONES

Para estimar los costos económicos y ambientales de los pavimentos, resulta importante identificar las conservaciones por realizar durante la vida de servicio de estos. Para determinar las obras de conservación a efectuar en los diseños planteados para cada tipo de pavimentos a 20 y 30 años se trabajó en base a lo planteado en el documento de trabajo “Configuración y parametrización del modelo HDM-4 a las condiciones de Chile” (2017), específicamente en la sección 3.2.2 de estándares de trabajo sugeridos del mismo documento.

## 2.6.1 CONSERVACIONES DE LOS DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO

Para los diseños de capa delgada de asfalto, se definieron los umbrales de intervención de acuerdo con la tabla 3-37 de “estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos de asfalto” del HDM-4. En la tabla 21 se muestran las consideraciones a la hora de intervenir en este tipo de caminos.

Tabla 21. Condiciones de conservación de pavimentos de capa delgada de asfalto

<b>Categoría</b>	<b>Resultado</b>
Tipo de Vía	Local o Desarrollo
Volumen	Bajo (Camino Básico)
SNP	2,5-2,8
Actividad	Sobrecarpeta Delgada
Umbral de intervención	TMDA en ambos sentidos >600 e IRI >5,5 [m/km]
Diseño	Espesor nueva capa: 30 [mm]

Fuente: Elaboración Propia, adaptación de tabla 3-37 de “Estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos de asfalto” del HDM-4.

Tomando en cuenta lo planteado en la tabla 20, se identificó el número de veces que el TMDA era mayor que 600 en ambos sentidos de la vía, para así definir el número de conservaciones a realizar en el periodo de diseño. Se trabajó de acuerdo con los resultados obtenidos en el encabezado de solicitudes de los parámetros considerados. Se evaluó el TMDA por sentido de vía a los 20 y 30 años respectivamente, con eso se definió el número de obras de conservación que hay que realizar para cada camino según los años de diseño. Respecto al IRI, se consideró el supuesto de que en caso de que el valor del TMDA supere el umbral, el valor del IRI superará los 5,5 m/km como consecuencia.

## 2.6.2 CONSERVACIONES DE LOS DISEÑOS DE TSD

Para los TSD, se trabajó en base a lo planteado en el numeral 3.2.2.1 de Pavimentos Asfálticos del HDM-4 que recomienda que las conservaciones de los caminos básicos de tratamiento superficial sean planteadas como vías colectoras y locales/desarrollo de bajo

o muy bajo tránsito. Debido a esto, se propusieron como medidas lo planteado en la tabla 3-37 de “estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos de asfalto. Para este caso, se consideraron los diseños propuestos como vías de tipo colectoras. La tabla 22 muestra las consideraciones a la hora de intervenir en este tipo de caminos.

Tabla 22. Condiciones de conservación de TSD

<b>Categoría</b>	<b>Resultado</b>
Tipo de Vía	Colectora
Volumen	Muy bajo (Camino Básico)
SNP	2,8-3,2
Actividad	Sobrecarpeta Delgada
Condiciones para intervenir	TMDA en ambos sentidos >600 e IRI >5,2 [m/km]
Diseño	Espesor nueva capa: 30 [mm]

Fuente: Elaboración Propia, adaptación de tabla 3-37 de “Estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos de asfalto” del HDM-4.

De acuerdo con lo planteado en la tabla 22, el umbral de intervención es el mismo para los TSD y para los pavimentos de capa delgada de asfalto. Esto implica que el número de intervenciones por conservación a los 20 y 30 años respectivamente es el mismo para ambos métodos.

### 2.6.3 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Para los pavimentos de losa delgada y ultradelgada de hormigón, se definieron los umbrales de intervención de acuerdo con lo planteado en la tabla 3-38 de “estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos de hormigón” del HDM-4. En la tabla 23 se muestran las consideraciones a la hora de intervenir en este tipo de caminos.

Tabla 23. Condiciones de conservación de pavimentos de losa de hormigón

<b>Consideraciones para conservaciones de pavimentos de losa de hormigón</b>	
<b>Categoría</b>	<b>Resultado</b>
Tipo de Vía	Local o Desarrollo
Volumen	Bajo (Camino Básico)
Espesor losa [mm]	100-130
Actividad	Reemplazo de Losas
Umbral de intervención	Agrietamiento transversal >30%
Diseño	Espesor nueva capa: 30 [mm]
Efectos	Reposición losas: 30%

Fuente: Elaboración Propia, adaptación de tabla 3-38 de "estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos de hormigón" del HDM-4.

Los diseños para cada camino se seleccionaron de manera que cumplan estructuralmente y no superen el 30% de agrietamiento transversal, para los 20 y 30 años de diseño, respectivamente. Según la tabla 22, para el caso de los pavimentos de losa delgada y ultradelgada de hormigón, las conservaciones asociadas son nulas y no es necesario reemplazar losas.

## 2.7 COSTOS ECONÓMICOS DE LOS DISEÑOS DE CADA CAMINO

Para estimar los costos económicos de forma simplificada, se consideraron los materiales de cada diseño. El costo de los diseños se obtuvo a partir de los precios unitarios (PU) de cada material y la cubicación de estos, basándose en los espesores de los distintos diseños realizados. A lo anterior, se añadieron los costos asociados a las obras de conservación para cada diseño a los 20 y 30 años, respectivamente. El costo total considerado para los diseños en esta investigación corresponde a la suma de ambos costos.

Los precios unitarios de los materiales se obtuvieron a través de la plataforma digital de mercado público, del Ministerio de Hacienda, desde licitaciones de proyectos ya realizados. Se consideraron solo licitaciones adjudicadas en las zonas de estudio en los últimos 5 años y se ajustó valores por inflación registrada según corresponda, con base en datos oficiales de inflación del INE, desde su plataforma digital. Para el caso específico

de las fibras de polipropileno, se realizan cotizaciones a empresas proveedoras de dichas fibras.

Respecto a las cubicaciones, para todos los diseños se considera 1,0 km de vía, con 7,0 m de ancho para todos los casos. El espesor de cada capa empleada varía según diseño y método de pavimentación. Finalmente, el costo de cada diseño se mide en pesos chileno por cada km de vía \$/km.

## 2.7.1 COSTOS ECONÓMICOS DE DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO

### 2.7.1.1 COSTOS DE PAVIMENTACIÓN

Para los pavimentos de capa delgada de asfalto se considera el precio unitario del m<sup>3</sup> de asfalto, de base granular y subbase granular. La cantidad de m<sup>3</sup> de cada capa depende de los diseños. La tabla 24 muestra los precios unitarios considerados estos materiales.

Tabla 24. Precios Unitarios por zona del asfalto, base granular y subbase granular

Zona	PU Asfalto (m <sup>3</sup> )	PU Base Granular (m <sup>3</sup> )	PU Subbase Granular (m <sup>3</sup> )
Rancagua	\$329.400	\$48.840	\$42.496
Concepción	\$401.730	\$57.513	\$47.117
Valdivia	\$387.017	\$64.090	\$48.600
Punta Arenas	\$413.070	\$72.795	\$53.890

Fuente: Elaboración Propia, en base a costos de licitaciones de mercado público

### 2.7.1.2 COSTOS DE CONSERVACIÓN

Para los pavimentos de capa delgada de asfalto, se consideran como obras de conservación una sobrecarpeta delgada de asfalto de 30 mm. La cantidad de intervenciones a los 20 y 30 años sigue lo planteado en la sección 2.7.2 de este documento.

## 2.7.2 COSTOS ECONÓMICOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

### 2.7.2.1 COSTOS DE PAVIMENTACIÓN

Para los TSD se considera el precio unitario del m<sup>2</sup> de tratamiento superficial, m<sup>3</sup> asfalto (para conservaciones), m<sup>3</sup> de base granular y subbase granular. La tabla 25 muestra los precios unitarios de estos materiales.

Tabla 25. Precios Unitarios por zona del asfalto, tratamiento superficial, base granular y subbase granular

Zona	TSD (m <sup>2</sup> )	PU Asfalto (m <sup>3</sup> )	PU Base Granular (m <sup>3</sup> )	PU Subbase Granular (m <sup>3</sup> )
Rancagua	\$6.780	\$329.400	\$48.840	\$42.496
Concepción	\$7.638	\$401.730	\$57.513	\$47.117
Valdivia	\$7.979	\$387.017	\$64.090	\$48.600

Fuente: Elaboración Propia, en base a costos de licitaciones de mercado público

Cabe destacar que no se encontraron licitaciones adjudicadas en la zona de Punta Arenas. Esto hace sentido con el hecho de que el método de tratamientos superficiales no es recomendado para zonas afectadas por congelamiento, razón por lo que no se consideró este método para dicha zona.

### 2.7.2.2 COSTOS DE CONSERVACIÓN

Tal como se mencionó en la sección de conservaciones, las obras a realizar a los 20 y 30 años de diseño son las mismas que para los pavimentos de capa delgada de asfalto. Por lo que los costos asociados a este ítem se obtienen de la misma manera, con excepción de la zona de Punta Arenas donde no se consideran los tratamientos superficiales como solución válida.

## 2.7.3 COSTOS ECONÓMICOS DE DISEÑOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN

### 2.7.3.1 COSTOS DE PAVIMENTACIÓN

Para los pavimentos de losa delgada y ultradelgada de hormigón se considera el precio unitario del m<sup>3</sup> de hormigón, más el precio del kg de fibra de polipropileno para el caso específico de las losas ultradelgadas con adición de fibras. La cantidad de m<sup>3</sup> de hormigón depende de los diseños, mientras que la cantidad de kg de fibras por m<sup>3</sup> de hormigón depende de la concentración considerada, que es 0,4%. Tomando en cuenta la densidad de las fibras de polipropileno, se requieren 9,6 kg de fibras por cada m<sup>3</sup> de hormigón. La tabla 26 muestra los precios unitarios considerados para ambos materiales en las distintas zonas.

Tabla 26. Precios Unitarios por zona del hormigón y fibras de polipropileno

<b>Zona</b>	<b>PU Hormigón (m<sup>3</sup>)</b>	<b>PU Fibra (kg)</b>
<b>Rancagua</b>	\$152.539	\$4.380
<b>Concepción</b>	\$177.666	\$4.931
<b>Valdivia</b>	\$225.097	\$5.158
<b>Punta Arenas</b>	\$240.250	\$7.023

Fuente: Elaboración Propia, en base a costos de licitaciones de mercado público

### 2.7.3.2 COSTOS DE CONSERVACIÓN

En cuanto los costos de conservación, los diseños fueron planteados para que no superen el 30% de agrietamiento de las losas, por lo que no es necesario realizar obras de conservación. Por esto, no hay costos asociados a este ítem en los pavimentos de losa delgada y ultradelgada de hormigón.

## 2.8 COSTOS AMBIENTALES

Para estimar los costos ambientales se siguió el método Fast Track LCA (Vogtländer, 2023), con simplificaciones. Se consideraron solo los materiales de los diseños realizados, sin tomar en cuenta otros aspectos de la obra. El cálculo de emisiones se basa en las cubicaciones de materiales. Este análisis se concentra en la etapa de materiales, producción y el uso, ya que toma en cuenta con las conservaciones, sin considerar el fin del ciclo de vida de los diseños.

### 2.8.1 FAST TRACK LCA, PASO A PASO

#### 2.8.1.1 PASO 1: ALCANCE Y OBJETIVO DEL ANÁLISIS

El análisis se centró en estimar los eco-costos asociados a los principales materiales empleados en los diseños considerados, para los distintos métodos de pavimentación. Con la intención de compararlos y seleccionar los más económicos ambientalmente, incluyendo obras de conservación. Los materiales considerados para cada método se muestran en la tabla 27.

Tabla 27. Materiales considerados para las distintas alternativas de pavimentación

<b>Alternativa de Pavimentación</b>	<b>Materiales considerados</b>
Losas delgadas de hormigón	Hormigón
Losas ultradelgadas de hormigón con fibras de PP	Hormigón, Fibras de PP.
Pavimentos de capa delgada de asfalto	Mezcla Asfáltica, Base Granular, Subbase Granular
Tratamientos superficiales dobles	Mezcla Asfáltica, Base Granular, Subbase Granular
Recapados de carpeta asfáltica delgada (30mm)	Mezcla Asfáltica

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de los TSD, para efectos de cubicación se toma el tratamiento superficial como mezcla asfáltica, debido a disponibilidad de datos.

## 2.8.1.2 PASO 2: SISTEMA, UNIDAD FUNCIONAL Y LÍMITES DEL SISTEMA

Los diseños evaluados corresponden a los diseños óptimos para cada método, considerando cada demanda de EEA y cuidado, a los 20 y 30 años de vida de diseño. Tomando en cuenta el ciclo de vida del LCA y para efectos de simplificación, este análisis no considera el fin del ciclo de vida de los diseños, que abarcan desde el comienzo hasta la etapa de uso. La figura 11 muestra un esquema completo del ciclo de vida de un producto.

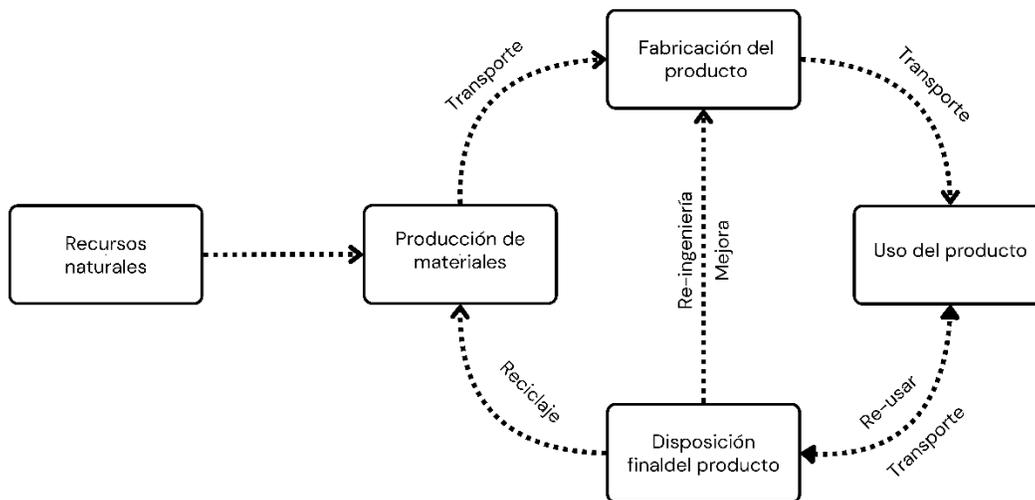


Figura 11. Ciclo de vida de un producto

Fuente: Adaptación de Vogtländer (2023)

Se calculó eco-costos de cada diseño, que cuantifican monetariamente los costos asociados a las obras de mitigación necesarias para neutralizar los efectos ambientales generados por un proyecto o producto (Vogtländer, 2023). Estos valores, originalmente en euros (€), se obtienen de la base de datos IDEMAT (abreviatura de Industrial Design & Engineering MATerials database), que es una compilación de datos de LCI de la Sustainable Impact Metrics Foundation, SIMF, organización sin fines de lucro derivada de la Universidad Tecnológica de Delft. Cada material empleado en los métodos de pavimentación tiene un costo ecológico unitario asociado. Dicho costo se mide en volumen (m<sup>3</sup>) o masa (kg) según corresponda. Para transformar los costos ecológicos unitarios de materiales en kg, se trabajó con los pesos específicos de estos para dejar

todos los eco-costos en m<sup>3</sup>, con excepción de las fibras de PP y PE donde se calculó los kg de fibras por m<sup>3</sup> de hormigón según concentración al 0,4%. La tabla 28 muestra los eco-costos considerados.

Tabla 28. Eco-Costos de los materiales considerados

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eco-Costo (\$)</b>
Hormigón	m <sup>3</sup>	\$ 60.085
Mezcla Fibra PP y PE	Kg	\$ 901
Mezcla Asfáltica	m <sup>3</sup>	\$ 57.257
Base y Subbase Granular	m <sup>3</sup>	\$ 3.647
Subbase Granular	m <sup>3</sup>	\$ 3.249

Fuente: Elaboración Propia en base a datos de (IDEMAT, 2023)

### 2.8.1.3 PASO 3: CUANTIFICACIÓN DE MATERIALES

Se conocen los materiales empleados y la cubicación de estos en base a cada uno de los diseños realizados.

### 2.8.1.4 PASO 4: INTRODUCCIÓN DE DATOS EN PLANILLA

Para cada diseño se ingresó los materiales empleados, su cubicación y el eco-costo \$/m<sup>3</sup> asociado. Posteriormente, se multiplican la cubicación de los materiales considerados por su eco-costo y se suman para obtener el costo ecológico total de cada diseño, considerando conservaciones.

### 2.8.1.5 PASO 5: INTERPRETACIÓN DE DATOS Y CONCLUSIONES

Se comparó resultados de costos ecológicos totales para cada diseño, se identificó método de pavimentación más económico ambientalmente a los 20 y 30 años de diseño para cada caso, filtrando por demanda de EEA y ciudad.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 RESUMEN

A lo largo de este capítulo se muestran los resultados obtenidos en base a la metodología descrita en el capítulo anterior. Se obtienen resultados de diseños para los cuatro métodos de pavimentación considerados. Se obtiene diseño óptimo para cada método de pavimentación en cada camino. En base a los diseños y a los costos de los precios unitarios de los distintos materiales se estimaron costos asociados a los distintos métodos. Mientras que con los diseños y los eco costos considerados se estimaron costos ambientales de los diseños para cada método.

### 3.2 TMDA POR SENTIDO DE VÍA DE CADA CAMINO A LOS 20 Y 30 AÑOS DE DISEÑO.

Para cada camino se obtuvo el TMDA por sentido de vía y los EEA a los 20 años y posteriormente a los 30 años de diseño. A continuación, se muestran los resultados correspondientes a los caminos de la zona de Rancagua, el resto caminos de las otras zonas se muestran en el anexo 1. La tabla 29 muestra las abreviaciones empleadas en las tablas 30, 31, 32 y 33.

Tabla 29. Abreviaciones para tablas 30, 31, 32 y 33

<b>Parámetro</b>	<b>Abreviación</b>
Autos	Aut
Camionetas	Ca
Camiones de 2 ejes	C2E
Camiones de más de 2 ejes	C+2E
Semi Remolques	SR
Remolques	R
Locomoción Colectiva	LC
Ejes Equivalentes por Año	EExAño
Ejes Equivalentes Acumulados por año	EEAxAño
TMDA por sentido de vía	TMDAxSent

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.1 TMDA POR SENTIDO DE VÍA DE LOS CAMINOS DE LA ZONA DE RANCAGUA

Las tablas 30, 31, 32 y 33 muestran como datos principales, el TMDA por sentido de vía y los EEA a lo largo de la vida de diseño de los distintos caminos considerados. Como valores relevantes, para cada camino se obtienen el TMDA por sentido de vía y los EEA de diseño a los 20 años y 30 años respectivamente.

Tabla 30. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Esmeralda, ROL: H-510.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	90	53	11	4	0	1	1	22	12.118	12.118	321	161
2025	97	57	12	4	1	1	1	23	12.974	25.093	344	172
2026	103	61	12	4	1	1	1	25	13.890	38.983	368	184
2027	111	65	13	5	1	1	1	26	14.871	53.853	394	197
2028	118	70	14	5	1	1	1	28	15.921	69.774	422	211
2029	127	75	15	5	1	1	1	30	17.045	86.818	451	226
2030	136	80	16	6	1	1	1	32	18.248	105.066	483	242
2031	145	86	17	6	1	1	2	35	19.536	124.602	517	259
2032	156	92	19	7	1	1	2	37	20.915	145.518	554	277
2033	167	99	20	7	1	2	2	40	22.392	167.910	593	297
2034	178	106	21	8	1	2	2	43	23.973	191.883	635	318
2035	191	113	23	8	1	2	2	46	25.665	217.548	680	340
2036	204	121	25	9	1	2	2	49	27.477	245.026	728	364
2037	219	129	26	9	1	2	2	52	29.417	274.443	779	390
2038	234	139	28	10	1	2	3	56	31.494	305.937	834	417
2039	251	148	30	11	1	2	3	60	33.718	339.655	893	447
2040	269	159	32	11	1	2	3	64	36.098	375.753	956	478
2041	288	170	35	12	2	3	3	69	38.647	414.399	1.024	512
2042	308	182	37	13	2	3	3	74	41.375	455.774	1.096	548
2043	330	195	40	14	2	3	4	79	44.296	500.071	1.173	587
2044	353	209	42	15	2	3	4	84	47.423	547.494	1.256	628
2045	378	223	45	16	2	3	4	90	50.772	598.266	1.345	672
2046	404	239	49	17	2	4	4	97	54.356	652.622	1.440	720
2047	433	256	52	18	2	4	5	104	58.194	710.815	1.541	771
2048	464	274	56	20	3	4	5	111	62.302	773.117	1.650	825
2049	496	294	60	21	3	5	5	119	66.701	839.818	1.767	883
2050	531	314	64	23	3	5	6	127	71.410	911.228	1.892	946
2051	569	336	68	24	3	5	6	136	76.451	987.679	2.025	1.013
2052	609	360	73	26	3	6	7	146	81.849	1.069.527	2.168	1.084
2053	652	386	78	28	4	6	7	156	87.627	1.157.154	2.321	1.161

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VI región

Tabla 31. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: La Pampa, ROL: I-490.

Año	A	Cam	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	183	112	21	8	0	0	10	45	23.785	23.785	670	335
2025	191	117	22	9	0	0	11	47	24.867	48.652	700	350
2026	200	123	23	9	0	0	11	49	25.998	74.650	732	366
2027	209	128	25	9	0	0	12	51	27.181	101.831	766	383
2028	219	134	26	10	0	0	12	54	28.418	130.249	801	400
2029	229	140	27	10	0	0	13	56	29.711	159.960	837	418
2030	239	146	28	11	0	0	13	59	31.063	191.023	875	438
2031	250	153	29	11	0	0	14	61	32.476	223.499	915	457
2032	261	160	31	12	0	0	14	64	33.954	257.453	956	478
2033	273	167	32	12	0	0	15	67	35.499	292.952	1.000	500
2034	286	175	34	13	0	0	16	70	37.114	330.066	1.045	523
2035	299	183	35	13	0	0	17	73	38.803	368.869	1.093	547
2036	312	191	37	14	0	0	17	77	40.568	409.437	1.143	571
2037	326	200	38	15	0	0	18	80	42.414	451.851	1.195	597
2038	341	209	40	15	0	0	19	84	44.344	496.195	1.249	625
2039	357	219	42	16	0	0	20	87	46.362	542.556	1.306	653
2040	373	228	44	17	0	0	21	91	48.471	591.028	1.365	683
2041	390	239	46	17	0	0	22	96	50.676	641.704	1.428	714
2042	408	250	48	18	0	0	23	100	52.982	694.686	1.492	746
2043	426	261	50	19	0	0	24	104	55.393	750.079	1.560	780
2044	446	273	52	20	0	0	25	109	57.913	807.992	1.631	816
2045	466	285	55	21	0	0	26	114	60.548	868.541	1.706	853
2046	487	298	57	22	0	0	27	119	63.303	931.844	1.783	892
2047	509	312	60	23	0	0	28	125	66.184	998.028	1.864	932
2048	533	326	62	24	0	0	30	130	69.195	1.067.223	1.949	975
2049	557	341	65	25	0	0	31	136	72.343	1.139.566	2.038	1.019
2050	582	357	68	26	0	0	32	143	75.635	1.215.201	2.131	1.065
2051	609	373	71	27	0	0	34	149	79.076	1.294.277	2.228	1.114
2052	636	390	75	28	0	0	35	156	82.674	1.376.951	2.329	1.164
2053	665	407	78	30	0	0	37	163	86.436	1.463.387	2.435	1.217

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VI región

Tabla 32. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Letueche-Matanza, ROL: I-112.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	109	106	18	10	3	2	2	35	29.197	29.197	501	250
2025	115	111	19	11	3	2	2	37	30.756	59.953	528	264
2026	121	117	20	11	4	2	2	39	32.399	92.352	556	278
2027	128	124	21	12	4	3	2	41	34.129	126.481	586	293
2028	134	130	23	12	4	3	2	43	35.951	162.432	617	308
2029	142	137	24	13	4	3	3	46	37.871	200.303	650	325
2030	149	145	25	14	4	3	3	48	39.893	240.196	684	342
2031	157	152	26	14	5	3	3	51	42.024	282.220	721	361
2032	165	160	28	15	5	3	3	54	44.268	326.488	760	380
2033	174	169	29	16	5	3	3	56	46.632	373.119	800	400
2034	184	178	31	17	5	4	3	59	49.122	422.241	843	421
2035	193	187	32	18	6	4	4	63	51.745	473.986	888	444
2036	204	197	34	19	6	4	4	66	54.508	528.494	935	468
2037	215	208	36	20	6	4	4	69	57.419	585.912	985	493
2038	226	219	38	21	7	4	4	73	60.485	646.397	1.038	519
2039	238	231	40	22	7	5	4	77	63.715	710.112	1.093	547
2040	251	243	42	23	7	5	5	81	67.117	777.229	1.152	576
2041	264	256	44	24	8	5	5	86	70.701	847.930	1.213	607
2042	278	270	47	25	8	5	5	90	74.477	922.407	1.278	639
2043	293	284	49	27	8	6	5	95	78.454	1.000.861	1.346	673
2044	309	299	52	28	9	6	6	100	82.643	1.083.504	1.418	709
2045	325	315	55	30	9	6	6	105	87.056	1.170.560	1.494	747
2046	343	332	58	31	10	7	6	111	91.705	1.262.265	1.573	787
2047	361	350	61	33	10	7	7	117	96.602	1.358.867	1.657	829
2048	380	369	64	35	11	8	7	123	101.761	1.460.628	1.746	873
2049	401	388	67	37	12	8	7	130	107.195	1.567.822	1.839	920
2050	422	409	71	39	12	8	8	137	112.919	1.680.741	1.937	969
2051	444	431	75	41	13	9	8	144	118.949	1.799.690	2.041	1.020
2052	468	454	79	43	14	9	9	152	125.301	1.924.991	2.150	1.075
2053	493	478	83	45	15	9	9	160	131.992	2.056.982	2.265	1.132

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VI región

Tabla 33. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Arica-Cruce Chacarilla, ROL: I-376.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2 E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMD A	TMD AxSe nt
2024	205	93	18	15	3	2	15	49	38.224	38.224	701	351
2025	218	99	19	16	3	2	17	52	40.747	78.971	747	374
2026	233	106	20	17	3	2	18	55	43.436	122.407	797	398
2027	248	113	22	18	3	2	19	59	46.303	168.709	849	425
2028	264	120	23	20	3	2	20	63	49.359	218.068	905	453
2029	282	128	25	21	4	2	21	67	52.616	270.685	965	483
2030	300	136	26	22	4	2	23	72	56.089	326.774	1.029	514
2031	320	145	28	24	4	3	24	76	59.791	386.565	1.097	548
2032	341	155	30	25	4	3	26	81	63.737	450.302	1.169	585
2033	364	165	32	27	5	3	28	87	67.944	518.246	1.246	623
2034	388	176	34	29	5	3	29	92	72.428	590.674	1.328	664
2035	414	188	36	31	5	3	31	99	77.208	667.882	1.416	708
2036	441	200	38	33	6	4	33	105	82.304	750.186	1.510	755
2037	470	213	41	35	6	4	36	112	87.736	837.923	1.609	805
2038	501	227	44	37	7	4	38	119	93.527	931.449	1.715	858
2039	534	242	47	40	7	4	40	127	99.700	1.031.149	1.829	914
2040	569	258	50	42	7	5	43	136	106.280	1.137.429	1.949	975
2041	607	276	53	45	8	5	46	145	113.294	1.250.723	2.078	1.039
2042	647	294	56	48	8	5	49	154	120.772	1.371.495	2.215	1.108
2043	690	313	60	51	9	6	52	164	128.743	1.500.237	2.361	1.181
2044	735	334	64	54	10	6	56	175	137.240	1.637.477	2.517	1.259
2045	784	356	68	58	10	6	59	187	146.297	1.783.774	2.683	1.342
2046	835	379	73	62	11	7	63	199	155.953	1.939.727	2.860	1.430
2047	890	404	78	66	12	7	67	212	166.246	2.105.973	3.049	1.525
2048	949	431	83	70	12	8	72	226	177.218	2.283.191	3.250	1.625
2049	1.012	459	88	75	13	8	77	241	188.915	2.472.106	3.465	1.732
2050	1.079	490	94	80	14	9	82	257	201.383	2.673.489	3.694	1.847
2051	1.150	522	100	85	15	9	87	274	214.674	2.888.163	3.937	1.969
2052	1.226	556	107	91	16	10	93	292	228.843	3.117.006	4.197	2.099
2053	1.307	593	114	97	17	11	99	311	243.946	3.360.952	4.474	2.237

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VI región

Los caminos se muestran en orden ascendente de EEA. Como se observa en las tablas anteriores, los EEA y el TMDA por sentido de vía se duplicaron entre los 20 y 30 años, esta tendencia se cumplió en todas las zonas, lo que se tradujo en un aumento de la demanda estructural de los diseños. Los espesores de capas y conservaciones a realizar para los distintos casos dependen de los EEA y el TMDA por sentido de vía.

### 3.3 OBRAS DE CONSERVACIÓN DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO Y TSD

Una vez que se obtuvo el TMDA por sentido de vía a los 20 y 30 años para cada camino, se determinó el número de conservaciones a realizar para el caso de los pavimentos de capa delgada de asfalto y TSD, ya que el umbral de intervención para este tipo de alternativas depende del valor del TMDA, como ya se mencionó.

#### 3.3.1 OBRAS DE CONSERVACIÓN PARA DISEÑOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO Y TSD A LOS 20 AÑOS DE DISEÑO

Las obras de conservación a realizar en los diseños de capa delgada de asfalto y TSD a los 20 años se muestran en la tabla 34.

Tabla 34. Obras de conservación en cada camino para diseños de pavimentos de asfalto y TSD a los 20 años .

Zona	Nombre del Camino	ROL	EEA (20 años)	TMDA por sentido de vía (20 años)	Cantidad de intervenciones de conservación
Rancagua	Esmeralda	H-510	500.071	587	0
	La Pampa	I-490	750.079	780	1
	Letueche - Matanza	I-112	1.000.861	673	1
	Arica - Cruce Chacarilla	I-376	1.500.237	1.181	1
Concepción	Rio Chaquilvín - Ralco	Q-61	500.008	745	1
	Pudá-Dichato	N-14-O	750.522	755	1
	Villa Mercedes - Quilleco	Q-469	1.000.468	800	1
	Cabrero - Paso Hondo	Q-510	1.500.750	1.001	1

Valdivia	Los Tallos	T-189	500.193	389	0
	Puile	T-218	750.400	270	0
	Lago Neltume - Liquiñe	T-29	1.000.718	825	1
	Puente Alto - Cayuruca	T-731	1.500.132	1.016	1
Pta. Arenas	Cerro Castillo	Ruta 9N	500.411	582	0
	Pampa guanaco	Y-85	750.452	304	0
	Dos Lagunas	Ruta 9N	1.000.728	732	1
	Caleta Josefina	Y-85	1.500.162	640	1

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.2 OBRAS DE CONSERVACIÓN EN CADA CAMINO PARA PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO Y TSD A LOS 30 AÑOS DE DISEÑO

Las obras de conservación a realizar en los diseños de capa delgada de asfalto y TSD a los 30 años se muestran en la tabla 35.

Tabla 35. Obras de conservación en cada camino, a los 30 años, para diseños de pavimentos de asfalto y TSD.

Zona	Nombre del Camino	ROL	EEA (30 años)	TMDA por sentido de vía (30 años)	Cantidad de Intervenciones de conservación
Rancagua	Esmeralda	H-510	1.157.154	1.161	1
	La Pampa	I-490	1.463.387	1.217	2
	Letueche - Matanza	I-112	2.056.982	1.132	1
	Arica - Cruce Chacarilla	I-376	3.360.952	2.237	3
Concepción	Rio Chaquilvín - Ralco	Q-61	1.011.998	1.226	2
	Pudá-Dichato	N-14-O	1.610.784	1.350	2
	Villa Mercedes - Quilleco	Q-469	1.883.120	1.183	1
	Cabrero - Paso Hondo	Q-510	3.072.019	1.674	2
Valdivia	Los Tallos	T-189	999.742	628	1
	Puile	T-218	1.535.571	915	1
	Lago Neltume - Liquiñe	T-29	1.885.975	1.223	2
	Pte. Alto - Cayuruca	T-731	3.165.204	1.774	2
Pta. Arenas	Cerro Castillo	Ruta 9N	1.043.766	999	1
	Pampa guanaco	Y-85	1.586.382	643	1
	Dos Lagunas	Ruta 9N	2.107.004	1.273	2
	Caleta Josefina	Y-85	3.154.703	1.202	2

Fuente: Elaboración Propia

Como ya se mencionó, entre los 20 y 30 años los EEA y el TMDA por sentido de vía se duplicaron para cada camino. En el mismo lapso, aumentó como mínimo en 1 el número de conservaciones en casi todos los casos de estos pavimentos.

### 3.4 DISEÑOS A 20 AÑOS

#### 3.4.1 DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO

Se realizaron 12 diseños para cada camino considerado, asociados a los tres tipos de subrasantes de distinto CBR y las cuatro combinaciones de capas propuestas. Se seleccionó el diseño óptimo para cada caso, se eligió el diseño que cumpla estructuralmente considerando el mínimo espesor posible de las capas estructurales que lo componen. La tabla 36 muestra los espesores de las distintas capas del diseño óptimo para cada camino considerando también el CBR de la subrasante para cada caso.

Tabla 36. Diseño óptimo de capa delgada de asfalto para cada camino a los 20 años de diseño

<b>Ciudad</b>	<b>EEA</b>	<b>CBR Sr (%)</b>	<b>Asfalto (mm)</b>	<b>Base (mm)</b>	<b>Subbase (mm)</b>	<b>Cantidad de Intervenciones de Conservación</b>
Rancagua	500.000	10%	50	150	150	0
Concepción	500.000	15%	50	150	150	1
Valdivia	500.000	15%	50	200	200	1
Punta Arenas	500.000	10%	50	150	150	1
Rancagua	750.000	15%	50	150	150	1
Concepción	750.000	15%	50	180	180	1
Valdivia	750.000	15%	50	220	220	1
Punta Arenas	750.000	10%	50	150	150	1
Rancagua	1.000.000	10%	50	180	180	0
Concepción	1.000.000	15%	50	180	180	0
Valdivia	1.000.000					
Punta Arenas	1.000.000	15%	50	150	150	1
Rancagua	1.500.000	15%	50	180	180	0
Concepción	1.500.000	15%	50	200	200	0
Valdivia	1.500.000					
Punta Arenas	1.500.000	10%	50	180	180	1

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que con un CBR del 5% en las subrasantes no se obtienen resultados prometedores debido al pobre desempeño estructural que presentan. Los casos en los que el CBR Sr considerado es 10%, no hubo una disminución de espesor en comparación con un CBR Sr de 15%. Este tipo de solución tuvo sus peores resultados en Valdivia, debido al bajo coeficiente de drenaje asociado, para el caso de 500.000 y 750.000 EEA es la zona con mayores espesores de capas estructurales, mientras que para 1.000.000 y 1.500.000 EEA ningún diseño cumplió estructuralmente con los espesores considerados, por lo que este tipo de solución no sería recomendable en estos casos.

### 3.4.2 DISEÑOS A 20 AÑOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

Se realizaron 9 diseños para cada camino, exceptuando los caminos de la zona de Punta Arenas que no se consideró como ya se mencionó. Los diseños se asocian a las tres subrasantes de distinto CBR y las tres combinaciones de espesores de capas. Se eligió el diseño que cumpla estructuralmente considerando el mínimo espesor posible de las capas que lo componen. La tabla 37 muestra los espesores de las capas del diseño óptimo para cada camino considerando también el CBR de la subrasante para cada caso.

Tabla 37. Diseño óptimo de TSD para cada camino a los 20 años de diseño

<b>Ciudad</b>	<b>EEA</b>	<b>CBR Sr (%)</b>	<b>Base (mm)</b>	<b>Subbase (mm)</b>	<b>Cantidad de Intervenciones de Conservación</b>
Rancagua	500.000	15%	180	150	0
Concepción	500.000	15%	180	150	1
Valdivia	500.000	15%	180	150	0
Rancagua	750.000	15%	180	150	1
Concepción	750.000	15%	180	150	1
Valdivia	750.000	15%	180	150	0
Rancagua	1.000.000	15%	180	150	1
Concepción	1.000.000	15%	180	150	1
Valdivia	1.000.000	15%	180	150	1
Rancagua	1.500.000	15%	200	150	1
Concepción	1.500.000	15%	200	150	1
Valdivia	1.500.000	15%	200	150	1

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que en todos los casos el diseño óptimo se obtuvo para un CBR Sr del 15% por lo que el valor del CBR de la subrasante resultó relevante. Se obtuvieron diseños que cumplieron estructuralmente y entregaron como resultado un espesor de base granular menor o igual a los otros casos de CBR de subrasante y considerando un menor espesor de subbase granular.

### 3.4.3 DISEÑOS A 20 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN

En cuanto a los pavimentos de losa de hormigón se obtienen resultados para los pavimentos de losa delgada de hormigón y pavimentos de losa ultradelgada de hormigón con adición de fibras de polipropileno. Se muestran los resultados para diseños de losas de 1,5 m con los espesores asociados a cada caso, los EEA de vida de diseño y los porcentajes de agrietamiento. Se trabajó con espesores que dieran como resultado un agrietamiento transversal menor al 30%, para que evitar la necesidad de obras de conservación.

#### 3.4.3.1 DISEÑO ÓPTIMO DE PAVIMENTO DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN PARA CADA CAMINO A LOS 20 AÑOS

Se seleccionó el diseño de menor espesor, que cumpliera estructuralmente y que tuviera un agrietamiento transversal menor a 30%. La tabla 38 muestra el diseño óptimo para cada camino, considerando el mínimo espesor posible en conjunto con el porcentaje de agrietamiento transversal registrado según la posición de la aplicación de la fuerza en la losa.

Tabla 38. Porcentaje de agrietamiento transversal para diseños de losa delgada de hormigón a los 20 años

Ciudad	Largo losa (m)	Espesor (m)	EEA vida de diseño	borde	a 40cm del borde
Rancagua	1,50	0,15	500.000	13,2%	0,0%
Concepción				13,2%	0,0%
Valdivia				13,2%	0,0%
Punta Arenas				13,2%	0,0%
Rancagua	1,50	0,15	750.000	22,6%	0,0%
Concepción				22,6%	0,0%
Valdivia				22,6%	0,0%
Punta Arenas				22,6%	0,0%
Rancagua	1,50	0,16	1.000.000	7,1%	0,0%
Concepción				7,1%	0,0%
Valdivia				7,1%	0,0%
Punta Arenas				7,1%	0,0%
Rancagua	1,50	0,16	1.500.000	12,7%	0,0%
Concepción				12,7%	0,0%
Valdivia				12,7%	0,0%
Punta Arenas				12,7%	0,0%

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que para las dos demandas menores de EEA es suficiente con un espesor de 15 cm de losa. Sin embargo, para las dos demandas mayores de EEA es necesario aumentar el espesor de la losa a 16 cm. Sin embargo, se ve una mejora en el desempeño estructural con un descenso del agrietamiento transversal.

### 3.4.3.2 DISEÑO ÓPTIMO DE LOS DISEÑOS DE LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE POLIPROPILENO A LOS 20 AÑOS

Al igual que el caso anterior, se realizaron 2 diseños en cada caso. Se seleccionó el diseño que cumpliera estructuralmente con un agrietamiento transversal menor al 30% y con el menor espesor de losa. La tabla 39 muestra el mejor diseño para cada camino, considerando el mínimo espesor posible en conjunto con el porcentaje de agrietamiento transversal registrado según la posición de la aplicación de la fuerza en la losa.

Tabla 39. Porcentaje de agrietamiento transversal para diseños de losa ultradelgada de hormigón

Ciudad	Largo losa (m)	Espesor (m)	EEA vida de diseño	Borde	a 40cm del borde
Rancagua	1,50	0,11	500.000	11,8%	0,0%
Concepción				11,8%	0,0%
Valdivia				11,8%	0,0%
Punta Arenas				11,8%	0,0%
Rancagua	1,50	0,11	750.000	20,3%	0,0%
Concepción				20,3%	0,0%
Valdivia				20,3%	0,0%
Punta Arenas				20,3%	0,0%
Rancagua	1,50	0,11	1.000.000	28,8%	0,0%
Concepción				28,8%	0,0%
Valdivia				28,8%	0,0%
Punta Arenas				28,8%	0,0%
Rancagua	1,50	0,12	1.500.000	25,1%	0,0%
Concepción				25,1%	0,0%
Valdivia				25,1%	0,0%
Punta Arenas				25,1%	0,0%

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que hubo una disminución de 4 cm en los espesores de las losas en comparación con las del punto anterior. Estos espesores son más competitivos presentando una reducción de 26,6% y 25,0% en los espesores de losas dependiendo del caso. Se observó que para demandas de hasta 1.000.000 de EEA basta con un diseño de 11 cm de espesor, cuando esta llega a 1.500.000 es necesario aumentar espesor a 12 cm, pero también el agrietamiento disminuye, aunque no sustancialmente. En general, para este tipo de pavimentos el agrietamiento transversal superó el 20% en tres de las cuatro demandas de EEA, llegando hasta 28,8% para el caso de 1.000.000 EEA, lo que muestra que varios diseños se encuentran cerca de superar el umbral de intervención por conservación prontamente.

### 3.5 DISEÑOS A 30 AÑOS

#### 3.5.1 DISEÑOS A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE CAPA DELGADA DE ASFALTO

Los diseños considerados de pavimentos de capa delgada de asfalto a los 30 años son los mismos que se definieron como diseño óptimo para cada camino a los 20 años. Lo que cambia es el número de conservaciones asociados a cada camino. La tabla 40 muestra el CBR Sr, los espesores de las capas y el número de conservaciones para cada caso

Tabla 40. Diseño óptimo para pavimento de capa delgada de asfalto a los 30 años

Ciudad	CBR Sr (%)	EEA (20 años)	EEA (30 años)	Asfalto (mm)	Base (mm)	Subbase (mm)	Cantidad de Intervenciones de Conservación
Rancagua	10%	500.000	1.157.154	50	150	150	1
Concepción	15%	500.000	1.011.998	50	150	150	2
Valdivia	15%	500.000	999.742	50	200	200	1
Punta Arenas	10%	500.000	1.043.766	50	150	150	1
Rancagua	15%	750.000	1.463.387	50	150	150	2
Concepción	15%	750.000	1.610.784	50	180	180	2
Valdivia	15%	750.000	1.535.571	50	220	220	1
Punta Arenas	10%	750.000	1.586.382	50	150	150	1
Rancagua	10%	1.000.000	2.056.982	50	180	180	1
Concepción	15%	1.000.000	1.883.120	50	180	180	1
Valdivia		1.000.000	1.885.975				
Punta Arenas	15%	1.000.000	2.107.004	50	150	150	2
Rancagua	15%	1.500.000	3.360.952	50	180	180	3
Concepción	15%	1.500.000	3.072.019	50	200	200	2
Valdivia		1.500.000	3.165.204				
Punta Arenas	10%	1.500.000	3.154.703	50	180	180	2

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.5.2 DISEÑOS A 30 AÑOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

Al igual que para el caso de los pavimentos de capa delgada de asfalto, los diseños considerados de TSD a los 30 años fueron los mismos que se definieron como diseño

óptimo para cada camino a los 20 años. Cambió solamente el número de conservaciones asociados a cada camino. La tabla 41, muestra el CBR Sr (%), los espesores de las capas y el número de conservaciones para cada caso.

Tabla 41. Diseño óptimo para TSD (30 años)

<b>Mejores resultados para diseños de TSD</b>						
<b>CBR (%) de subrasante, espesores de capas e intervenciones por conservación</b>						
<b>Ciudad</b>	<b>CBR Sr (%)</b>	<b>EEA (20 años)</b>	<b>EEA (30 años)</b>	<b>Base (mm)</b>	<b>Subbase (mm)</b>	<b>Cantidad de Intervenciones de Conservación</b>
Rancagua	15%	500.000	1.157.154	180	150	1
Concepción	15%	500.000	1.011.998	180	150	2
Valdivia	15%	500.000	999.742	180	150	1
Rancagua	15%	750.000	1.463.387	180	150	2
Concepción	15%	750.000	1.610.784	180	150	2
Valdivia	15%	750.000	1.535.571	180	150	1
Rancagua	15%	1.000.000	2.056.982	180	150	1
Concepción	15%	1.000.000	1.883.120	180	150	1
Valdivia	15%	1.000.000	1.885.975	180	150	2
Rancagua	15%	1.500.000	3.360.952	200	150	3
Concepción	15%	1.500.000	3.072.019	200	150	2
Valdivia	15%	1.500.000	3.165.204	200	150	2

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.3 DISEÑOS A 30 AÑOS DE PAVIMENTOS DE LOSA DELGADA Y ULTRADELGADA DE HORMIGÓN

La situación para estos pavimentos es la misma que para los 20 años de diseño. Se obtienen resultados para los pavimentos de losa delgada y ultradelgada de hormigón con adición de fibras de polipropileno. Se muestran los resultados para diseños de losas de 1,5 m con los espesores asociados a cada caso, los EEA de vida de diseño y los porcentajes de agrietamiento. Se trabajó con espesores que dieran como resultado un agrietamiento transversal menor al 30%, para que evitar la necesidad de obras de conservación.

### 3.5.3.1 DISEÑO ÓPTIMO DE PAVIMENTO DE LOSA DELGADA DE HORMIGÓN PARA CADA CAMINO A LOS 30 AÑOS

Para cada camino se realizaron 3 diseños de este tipo de losa, ya que se consideró un espesor más que para los 20 años de diseño en vista del aumento de EEA. En cada caso se seleccionó el diseño que cumpliera estructuralmente, que tuviera un agrietamiento transversal menor a 30% y que considerara un menor espesor losa. La tabla 42 muestra el mejor diseño para cada camino, considerando el mínimo espesor posible en conjunto con el porcentaje de agrietamiento transversal registrado según la posición de la aplicación de la fuerza en la losa.

Tabla 42. Porcentaje de agrietamiento transversal para diseños de losa delgada de hormigón

Ciudad	Largo losa (m)	Espesor (m)	EEA a 20 años	EEA a 30 años	Borde	A 40cm del borde
Rancagua	1,50	0,16	500.000	1.157.154	8,8%	0,0%
Concepción		0,16		1.011.998	7,2%	0,0%
Valdivia		0,16		999.742	7,1%	0,0%
Punta Arenas		0,16		1.043.766	7,5%	0,0%
Rancagua	1,50	0,16	750.000	1.463.387	12,3%	0,0%
Concepción		0,16		1.610.784	14,0%	0,0%
Valdivia		0,16		1.535.571	13,1%	0,0%
Punta Arenas		0,16		1.586.382	13,7%	0,0%
Rancagua	1,50	0,16	1.000.000	2.056.982	19,5%	0,0%
Concepción		0,16		1.883.120	17,3%	0,0%
Valdivia		0,16		1.885.975	17,4%	0,0%
Punta Arenas		0,16		2.107.004	20,1%	0,0%
Rancagua	1,50	0,17	1.500.000	3.360.952	6,5%	0,0%
Concepción		0,17		3.072.019	5,6%	0,0%
Valdivia		0,17		3.165.204	5,9%	0,0%
Punta Arenas		0,17		3.154.703	5,9%	0,0%

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que para los 30 años de diseño los diseños de 15 cm de espesor de losa no cumplían para ningún caso. Para los caminos que rondaban 1.000.000, 1.500.000 y 2.000.000 EEA los diseños de 16 cm cumplían satisfactoriamente. Para los caminos que rondaban los 3.000.000 EEA fue necesario emplear losas de 17 cm, debido a esto se redujo considerable el agrietamiento transversal para estos casos. Resulta destacable

que en general con un aumento de solo 1 cm en el espesor de las losas estas son capaces de soportar el doble de EEA y TMDA por sentido de vía.

### 3.5.3.2 DISEÑO ÓPTIMO DE PAVIMENTO DE LOSA ULTRADELGADA DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE PP PARA CADA CAMINO A LOS 30 AÑOS

Al igual que para el caso anterior. Para este tipo de losa, se realizaron 3 diseños en cada caso. Se seleccionó el diseño que cumpliera estructuralmente, que tuviera un agrietamiento transversal menor a 30% y que considerara un menor espesor losa. La tabla 43 muestra diseño óptimo para cada camino, considerando el mínimo espesor posible en conjunto con el porcentaje de agrietamiento transversal registrado según la posición de la aplicación de la fuerza en la losa.

Tabla 43. Porcentaje de agrietamiento transversal para diseños de losa ultradelgada de hormigón a los 30 años

Ciudad	Largo losa (m)	Espesor (m)	EEA a 20 años	EEA a 30 años	Borde	A 40cm del borde
Rancagua	1,5	0,12	500.000	1.157.154	18,1%	0,0%
Concepción		0,11		1.011.998	29,2%	0,0%
Valdivia		0,11		999.742	28,8%	0,0%
Punta Arenas		0,12		1.043.766	15,8%	0,0%
Rancagua	1,5	0,12	750.000	1.463.387	24,4%	0,0%
Concepción		0,12		1.610.784	27,3%	0,0%
Valdivia		0,12		1.535.571	25,8%	0,0%
Punta Arenas		0,12		1.586.382	26,8%	0,0%
Rancagua	1,5	0,13	1.000.000	2.056.982	12,8%	0,0%
Concepción		0,13		1.883.120	11,3%	0,0%
Valdivia		0,13		1.885.975	11,3%	0,0%
Punta Arenas		0,13		2.107.004	13,2%	0,0%
Rancagua	1,5	0,13	1.500.000	3.360.952	24,3%	0,0%
Concepción		0,13		3.072.019	21,8%	0,0%
Valdivia		0,13		3.165.204	22,6%	0,0%
Punta Arenas		0,13		3.154.703	22,5%	0,0%

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que hubo un aumento de 1 cm en cada diseño entre los 20 y 30 años, con la excepción de los caminos de Concepción y Valdivia asociados a 500.000 EEA a los 20 años que no aumentaron el espesor de su losa, aunque también es destacable que ambos caminos están muy cerca de superar el umbral de intervención por conservación por lo que sería recomendable aumentar el espesor en 1 cm como los otros casos. En general con 13 cm se obtiene un buen desempeño estructural para los caminos que rondaban los 3.000.000 a los 30 años y por sobre todos los que rondaban 2.000.000 EEA. Para el caso de los diseños de 12 cm que rondaban los 1.500.000 EEA a los 30 años, se encontraban cerca del umbral de intervención por conservación. Al igual que el caso de los pavimentos de losa delgada de hormigón, resulta destacable que, con un aumento de solo 1 cm en el espesor de las losas, estas son capaces de soportar el doble de EEA y TMDA por sentido de vía.

### 3.6 COSTOS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN

Para lograr el objetivo de estimar los costos asociados al diseño de cada método considerado para cada uno de los dieciséis caminos a los 20 y 30 años respectivamente, se calculó el costo según las cubicaciones que se obtienen de cada diseño óptimo planteado por cada método y los costos considerados de cada material considerando también conservaciones asociadas a cada diseño.

#### 3.6.1 COSTOS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN A LOS 20 AÑOS

La tabla 44 muestra la estimación del costo del diseño óptimo a los 20 años de diseño para cada camino según la alternativa de pavimentación empleada.

Tabla 44. Costos económicos (\$/km) por alternativa de pavimentación con diseños a 20 años

Ciudad	EEA	Losa delgada de hormigón	Losa ultradelgada de hormigón con fibra PP	Pavimento de capa delgada de asfalto	TSD
Rancagua	500.000	\$ 210.638.016	\$ 154.113.062	\$ 217.226.880	\$ 158.008.320
Concepción	500.000	\$ 242.765.808	\$ 178.199.838	\$ 344.397.072	\$ 267.190.675
Valdivia	500.000	\$ 295.592.587	\$ 217.493.670	\$ 301.599.576	\$ 192.997.624
Punta Arenas	500.000	\$ 317.671.200	\$ 243.674.663	\$ 285.524.768	\$-
Rancagua	750.000	\$ 210.638.016	\$ 154.113.062	\$ 288.377.280	\$ 229.158.720
Concepción	750.000	\$ 242.765.808	\$ 178.199.838	\$ 366.997.191	\$ 267.190.675
Valdivia	750.000	\$ 295.592.587	\$ 217.493.670	\$ 317.826.924	\$ 192.997.624
Punta Arenas	750.000	\$ 317.671.200	\$ 243.674.663	\$ 285.524.768	\$-
Rancagua	1.000.000	\$ 221.620.838	\$ 154.113.062	\$ 308.105.856	\$ 229.158.720
Concepción	1.000.000	\$ 255.557.757	\$ 178.199.838	\$ 366.997.191	\$ 267.190.675
Valdivia	1.000.000	\$ 311.799.560	\$ 217.493.670	\$-	\$ 276.593.279
Punta Arenas	1.000.000	\$ 334.969.200	\$ 243.674.663	\$ 374.747.949	\$-
Rancagua	1.500.000	\$ 221.620.838	\$ 168.123.341	\$ 308.105.856	\$ 236.191.680
Concepción	1.500.000	\$ 255.557.757	\$ 194.399.823	\$ 382.063.936	\$ 275.472.544
Valdivia	1.500.000	\$ 311.799.560	\$ 237.265.822	\$-	\$ 285.822.228
Punta Arenas	1.500.000	\$ 334.969.200	\$ 265.826.905	\$ 402.111.842	\$-

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que el diseño más económico corresponde a los pavimentos de losa ultradelgada de hormigón en el 87,5% de los casos, mientras que el segundo método más económico es el de losa delgada de hormigón en el 56,3% de los casos, esto hace sentido, ya que los diseños de losa delgada y ultradelgada de hormigón fueron realizados para no contemplar conservaciones. Mientras que los diseños de pavimentos de capa delgada de asfalto y los TSD si consideran conservaciones en caso de ser necesarias, lo que eleva sus costos. Estas conservaciones consisten en una capa asfáltica de 3 cm. En solo dos casos, el método más económico corresponde a los TSD. Sin embargo, cabe destacar que dichos casos son justamente diseños de TSD que no necesitan obras de conservación. Por otra parte, el método más costoso, en el 85,7% de los casos donde se aplicó (no se aplicó en Valdivia con 1.000.000 y 1.500.000 EEA donde no se obtuvieron resultados que cumplieran estructuralmente dentro de los diseños considerados) es el de pavimentos de capa delgada de asfalto, incluso en los casos que no necesitan obras de conservación, en gran parte al elevado precio unitario del asfalto. En general, los costos

de las conservaciones afectan significativamente el desempeño económico de los TSD, ya que estos mostraron ser más competitivos frente a los pavimentos de losas delgadas y ultradelgadas de hormigón cuando los diseños no consideran conservaciones.

### 3.6.2 COSTOS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN A LOS 30 AÑOS

La tabla 45 muestra la estimación de costos económicos del diseño óptimo a los 30 años de diseño para cada camino según la alternativa de pavimentación empleada.

Tabla 45. Costos económicos (\$/km) por alternativa de pavimentación con diseños a 30 años

Ciudad	EEA (30 años)	Losa delgada de hormigón	Losa ultradelgada de hormigón con fibra	Pavimento de Capa delgada de Asfalto	TSD
Rancagua	1.157.154	\$ 221.620.838	\$ 168.123.341	\$288.377.280	\$229.158.720
Concepción	1.011.998	\$ 255.557.757	\$ 178.199.838	\$431.170.752	\$353.964.355
Valdivia	999.742	\$ 311.799.560	\$ 217.493.670	\$385.195.231	\$276.593.279
Punta Arenas	1.043.766	\$ 334.969.200	\$ 265.826.905	\$374.747.949	\$-
Rancagua	1.463.387	\$ 221.620.838	\$ 168.123.341	\$359.527.680	\$300.309.120
Concepción	1.610.784	\$ 255.557.757	\$ 194.399.823	\$453.770.871	\$353.964.355
Valdivia	1.535.571	\$ 311.799.560	\$ 237.265.822	\$401.422.579	\$276.593.279
Punta Arenas	1.586.382	\$ 334.969.200	\$ 265.826.905	\$374.747.949	\$-
Rancagua	2.056.982	\$ 221.620.838	\$ 182.133.619	\$379,256.256	\$300.309.120
Concepción	1.883.120	\$ 255.557.757	\$ 210.599.809	\$453.770.871	\$353.964.355
Valdivia	1.885.975	\$ 311.799.560	\$ 257.037.974	\$-	\$360.188.934
Punta Arenas	2.107.004	\$ 334.969.200	\$ 287.979.147	\$463.971.130	\$-
Rancagua	3.360.952	\$ 232.603.661	\$ 182.133.619	\$450.406.656	\$378.492.480
Concepción	3.072.019	\$ 268.349.706	\$ 207.191.772	\$468.837.616	\$362.246.224
Valdivia	3.165.204	\$ 328.006.532	\$ 257.037.974	\$-	\$369.417.882
Punta Arenas	3.154.703	\$ 352.267.200	\$ 287.979.147	\$491.335.023	\$-

Fuente: Elaboración Propia

En todos los casos el diseño más económico corresponde a los pavimentos de losa ultradelgada de hormigón, seguido por los pavimentos de losa delgada de hormigón en el 87,5% de los casos. En cambio, los diseños de capa delgada de asfalto resultaron ser los más costosos en todos los casos donde se aplicaron. Se destaca un aumento

considerable en los costos de los diseños de capa delgada de asfalto y TSD de \$87.637.911 y \$86.435.778 en promedio por kilómetro entre los 20 y 30 años debido a las obras de conservación necesarias para suplir las nuevas demandas de EEA. En cambio, para los diseños de losas delgadas y ultradelgadas de hormigón el aumento en los costos fue menor, con \$10.739.952 y \$20.080.820 en promedio por kilómetro, debido al aumento de 1 cm en el espesor de las losas. Según lo anterior, estos pavimentos se vuelven más competitivos económicamente frente a los diseños de capa delgada de asfalto y TSD a medida que el periodo de diseño aumenta. A los 30 años, el costo promedio de los diseños de losa delgada y ultradelgada de hormigón corresponde a \$284.566.823 y \$222.959.544 respectivamente, mientras que el costo promedio de los diseños de los TSD es de \$326.266.842 y el de los diseños de capa delgada de asfalto asciende a los \$412.609.846.

### 3.7 COSTOS AMBIENTALES DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN

Para lograr el objetivo de estimar los costos ambientales asociados al diseño de cada método para cada uno de los 16 caminos a los 20 y 30 años, se calculó el costo ambiental según las cubicaciones que se obtienen de cada diseño óptimo planteado por tipo de pavimentación y los eco-costos considerados de cada material tomando en cuenta también conservaciones de cada diseño.

#### 3.7.1 COSTOS AMBIENTALES POR MÉTODO DE PAVIMENTACIÓN A LOS 20 AÑOS

La tabla 46 muestra la estimación del costo ambiental del diseño óptimo para cada camino según el tipo de pavimentación empleado a los 20 años de diseño.

Tabla 46. Eco Costos (\$/km) por tipo de pavimentos con diseños a 20 años

Ciudad	EEA	Losa delgada de hormigón	Losa ultradelgada de hormigón con fibra PP	Pavimento de capa delgada de asfalto	TSD
Rancagua	500.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 28.864.072	\$ 19.382.987
Concepción	500.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 41.231.565	\$ 31.750.480
Valdivia	500.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 31.614.601	\$ 19.382.987
Punta Arenas	500.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 28.864.072	\$-
Rancagua	750.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 41.231.565	\$ 31.750.480
Concepción	750.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 42.881.882	\$ 31.750.480
Valdivia	750.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 32.714.812	\$ 19.382.987
Punta Arenas	750.000	\$ 64.891.608	\$ 54.326.753	\$ 28.864.072	\$-
Rancagua	1.000.000	\$ 69.217.715	\$ 54.326.753	\$ 42.881.882	\$ 31.750.480
Concepción	1.000.000	\$ 69.217.715	\$ 54.326.753	\$ 42.881.882	\$ 31.750.480
Valdivia	1.000.000	\$ 69.217.715	\$ 54.326.753	\$-	\$ 31.750.480
Punta Arenas	1.000.000	\$ 69.217.715	\$ 54.326.753	\$ 41.231.565	\$-
Rancagua	1.500.000	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 42.881.882	\$ 32.300.585
Concepción	1.500.000	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 43.982.093	\$ 32.300.585
Valdivia	1.500.000	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$-	\$ 32.300.585
Punta Arenas	1.500.000	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 42.881.882	\$-

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que el método más económico ambientalmente en todos los casos corresponde a los TSD, excepto en los diseños asociados a la zona de Punta Arenas donde este método no es recomendable. Por otra parte, los diseños más costosos en todos los casos corresponden a los de losa delgada de hormigón, mientras que los diseños de losa ultradelgada presentan una reducción de costos ambientales de entre un 16,3% y un 21,5% con respecto a estos últimos, debido a la reducción del espesor de las losas. Sin embargo, el costo de los diseños de losa ultradelgada de hormigón prácticamente duplica los costos de diseños de TSD con obras de conservación y casi triplica los costos de los tres casos de TSD que no consideran obras de conservación según nivel de TMDA. Los diseños de TSD con obras de conservación tienen un costo ambiental de hasta un 66,6% mayor a los diseños de TSD sin obras de conservación ante la misma demanda. Todo esto hace sentido debido a que los costos ambientales del m<sup>3</sup> del hormigón y el asfalto son similares, pero los espesores de asfalto empleados en los diseños (considerando conservaciones) son menores al espesor de las losas delgadas y ultradelgadas de hormigón.

### 3.7.2 COSTOS AMBIENTALES POR MÉTODO DE PAVIMENTACIÓN A LOS 30 AÑOS

La tabla 47 muestra la estimación del costo ambiental del diseño óptimo para cada camino según el tipo de pavimentación empleado a los 30 años de diseño.

Tabla 47. Eco Costos (\$/km) por tipo de pavimentos con diseños a 30 años

Ciudad	EEA (20 años)	EEA (30 años)	Losa delgada hormigón	Losa ultradelgada hormigón con fibra	Pavimento de capa delgada de Asfalto	TSD
Ran	500.000	1.157.154	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 41.231.565	\$ 31.750.480
Con	500.000	1.011.998	\$ 69.217.715	\$ 54.326.753	\$ 53.599.057	\$ 44.117.972
Val	500.000	999.742	\$ 69.217.715	\$ 54.326.753	\$ 43.982.093	\$ 31.750.480
Pta. A	500.000	1.043.766	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 41.231.565	\$-
Ran	750.000	1.463.387	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 53.599.057	\$ 44.117.972
Con	750.000	1.610.784	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 55.249.374	\$ 44.117.972
Val	750.000	1.535.571	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 45.082.305	\$ 31.750.480
Pta. A	750.000	1.586.382	\$ 69.217.715	\$ 59.265.549	\$ 41.231.565	\$-
Ran	1.000.000	2.056.982	\$ 69.217.715	\$ 64.204.345	\$ 55.249.374	\$ 44.117.972
Con	1.000.000	1.883.120	\$ 69.217.715	\$ 64.204.345	\$ 55.249.374	\$ 44.117.972
Val	1.000.000	1.885.975	\$ 69.217.715	\$ 64.204.345	\$-	\$ 44.117.972
Pta. A	1.000.000	2.107.004	\$ 69.217.715	\$ 64.204.345	\$ 53.599.057	\$-
Ran	1.500.000	3.360.952	\$ 73.543.823	\$ 64.204.345	\$ 67.616.867	\$ 57.035.570
Con	1.500.000	3.072.019	\$ 73.543.823	\$ 64.204.345	\$ 56.349.586	\$ 44.668.078
Val	1.500.000	3.165.204	\$ 73.543.823	\$ 64.204.345	\$-	\$ 44.668.078
Pta. A	1.500.000	3.154.703	\$ 73.543.823	\$ 64.204.345	\$ 55.249.374	\$-

Fuente: Elaboración Propia

Como ya se mencionó, entre los 20 y 30 años la demanda de EEA prácticamente se duplica en todos los casos. Los diseños más costosos ambientalmente corresponden nuevamente a los de losa delgada de hormigón, mientras que los diseños más económicos ambientalmente nuevamente corresponden a los TSD, excepto en Punta Arenas donde los diseños más económicos corresponden a los de capa delgada de asfalto ya que no se recomienda el uso de TSD en esa zona.

Sin embargo, el aumento en los costos ambientales asociados al aumento de la demanda de EEA para las distintas soluciones comienza a mostrar una tendencia, las losas delgadas y ultradelgadas de hormigón tuvieron un aumento promedio de \$3.244.580 y

\$5.556.145, respectivamente, mientras que los diseños de capa delgada de asfalto y TSD aumentaron en promedio \$13.250.885 y \$13.398.117, respectivamente, en el mismo periodo. Las capacidades estructurales del hormigón permiten que las losas delgadas y ultradelgadas puedan suplir el aumento de demanda con un aumento mínimo del espesor de las losas de 1 cm por lo que el aumento en los costos ambientales es menor al de los diseños de capa delgada de asfalto y TSD que suplen la demanda con obras de conservación que consideran una capa asfáltica de 3 cm. Los resultados muestran que a medida que la demanda de EEA aumenta, así como el valor el TMDA, las losas delgadas y principalmente las ultradelgadas se vuelven cada vez más competitivas frente a los diseños de capa de delgada de asfalto y TSD. El 50,0% de los diseños de capa delgada de asfalto están a menos de \$10.000.000 de superar el costo de los diseños de losa ultradelgada de hormigón.

#### **4. CONCLUSIONES**

Como se ha mostrado, es evidente la necesidad de mejorar la condición de accesibilidad de los caminos básicos de Chile. Por ende, para lograr incentivar el desarrollo de nuevos proyectos se requiere evaluar las alternativas de pavimentación identificando en lo posible, la opción óptima desde un enfoque estructural, económico y ambiental. Los diseños obtenidos a partir de los casos de estudio desarrollados mostraron resultados del desempeño estructural de las alternativas consideradas, así como una visión simplificada del aspecto económico y ambiental de estas, permitiendo dar una idea del método de pavimentación óptimo para los casos considerados.

Los datos de desempeño estructural de los diseños realizados, en conjunto con las estimaciones de costos económicos determinaron que los pavimentos de losa ultradelgada de hormigón con adición de fibras de polipropileno registraron un uso menor de materiales y cumplieron estructuralmente sin necesidad de conservaciones, por lo que presentaron un menor costo económico, siendo una alternativa de pavimentación a tomar en cuenta para caminos básicos.

Por su parte, los resultados de las estimaciones de costos ambientales muestran que, a corto plazo (menos de 30 años) los TSD son los diseños con menores costos ambientales. No obstante, a largo plazo (más de 30 años), los diseños de losa delgada y principalmente los de losa ultradelgada de hormigón se vuelven cada vez más competitivos ambientalmente. Se recomienda profundizar en aspectos ambientales o económicos en caso de considerarse necesario ya que se recurrió a varias simplificaciones para efectos de este estudio.

## REFERENCIAS

Bowles, j. e. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*

Binder, C., Covarrubias, J. P., & del Rio, P. (2024). *Experiencia y Sustentabilidad de Pavimentos Ultradelgados del Hormigón en Caminos Básicos. Revista de Ingeniería de Construcción, 27(3), 181-197.*

Covarrubias V., J. P. (2012). *Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada. Revista Ingeniería de Construcción, 27(3), 181-197.* <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000300005>

Covarrubias V. J.P., Binder C.E. (2016). *Diseño de Pavimentos Ultradelgados y su Aplicación en Caminos de Bajo Tránsito, 12° Congreso Internacional Provia.*

DIPRES. (2009). *Minuta ejecutiva: Evaluación del Programa de Caminos Básicos.*

Dirección de Vialidad. MOP. (2011). *Caminos Básicos. Instructivo para postulación de Caminos Básicos Intermedios*

Dirección de Vialidad. MOP. (2002). *Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito*

Dirección de Vialidad. MOP. (2009). *Informe final de evaluación: Programa de caminos básicos.*

Dirección de Vialidad. MOP. (2024). *MOP presentó cartera de licitaciones por más de 2.2 billones de pesos.*

<https://vialidad.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=1404>

*Dirección de Vialidad. MOP. (2023). Pavimentos Básicos. Conceptos Caminos Básicos*

Dirección de Vialidad, MOP. (2023). *Red Vial Nacional: Dimensionamiento y Características. (Reporte Técnico).*

<https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/Red%20Vial%20Nacional%20Dimensionamiento%20y%20Características%20Año%202023.pdf>

Douglas, R. A. (2016). *Low-Volume Road Engineering - Design, Construction and Maintenance. Bota Raton: CRC Press*

Emol.com. (2018, 5 de septiembre). *Solo el 24% de las rutas de Chile tienen pavimento y expertos critican el lento avance.*

<https://www.emol.com/noticias/Nacional/2018/09/05/919562/Solo-el-24-de-las-rutas-de-Chile-tienen-pavimento-y-expertos-critican-el-lento-avance.html>

Espinoza Valarezo, P. A. (2018). *Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos bajo criterios de sostenibilidad. Aplicación a la red vial urbana de la ciudad de Valencia.*

ICH. (2024). *Pavimento ultradelgado de hormigón con fibra presenta múltiples ventajas.*

MINVU. (2018). *Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación.*

MOP. (2023). *Manual de Carreteras, Volumen 3.*

MOP. (2012). *Orden N°9371. Método de diseño de pavimentos de hormigón con losas de espesor optimizado.*

Pavimentos Chilenos. (2024). *El impacto positivo de la pavimentación y conservación vial con enfoque sostenible.*

Pradena M., M., & César T., A. (2021). *Análisis estructural de pavimentos de hormigón con losas cortas.*

ProRoad Global. (2024). *Optimización de pavimentos*

Salah *et al.* (2005). *Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers.*

Subsecretaría de Evaluación Social, MDS. (2017). *Configuración y parametrización del modelo HDM-4 a las condiciones de Chile.*

UNECE. (2022). *COP27: UN report shows pathways to carbon-neutrality in “energy intensive” steel, chemicals and cement industries.* <https://unece.org/media/press/372890>

TCPavements. (2024). *Tecnología.* <https://tcpavements.cl/esp/tecnologia>

Vogtländer, J. G. (2015). *A quick reference guide to LCA data and eco-based materials selection.*

Vogtländer, J. G. (2023). *A practical guide for students, designers and business managers LCA*.

## ANEXO 1. TMDA POR SENTIDO DE VÍA DE TODOS LOS CAMINOS DE LAS ZONAS DE CONCEPCIÓN, VALDIVIA Y PUNTA ARENAS

Tabla 48. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Río Chaquilvín-Ralco, ROL: Q-61.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	122	143	15	4	0	1	5	38	14.947	14.947	578	289
2025	128	150	15	4	0	1	5	40	15.710	30.657	608	304
2026	134	158	16	4	0	1	6	42	16.513	47.170	639	319
2027	141	166	17	5	0	1	6	44	17.357	64.527	671	336
2028	149	174	18	5	0	1	6	46	18.244	82.771	706	353
2029	156	183	19	5	0	1	6	48	19.176	101.947	742	371
2030	164	192	20	5	0	1	7	51	20.156	122.103	780	390
2031	173	202	21	6	0	1	7	53	21.186	143.289	819	410
2032	181	213	22	6	0	1	7	56	22.269	165.558	861	431
2033	191	223	23	6	0	1	8	59	23.407	188.965	905	453
2034	200	235	24	7	0	1	8	62	24.603	213.567	952	476
2035	211	247	25	7	0	1	9	65	25.860	239.427	1000	500
2036	221	259	27	7	0	2	9	68	27.181	266.609	1051	526
2037	233	273	28	8	0	2	10	72	28.570	295.179	1105	552
2038	245	287	29	8	0	2	10	76	30.030	325.209	1161	581
2039	257	301	31	8	0	2	11	80	31.565	356.774	1221	610
2040	270	317	32	9	0	2	11	84	33.178	389.952	1283	642
2041	284	333	34	9	0	2	12	88	34.873	424.825	1349	674
2042	299	350	36	10	0	2	12	92	36.655	461.480	1418	709
2043	314	368	38	10	0	2	13	97	38.528	500.008	1490	745
2044	330	387	40	11	0	2	14	102	40.497	540.505	1566	783
2045	347	406	42	11	0	2	14	107	42.566	583.071	1646	823
2046	364	427	44	12	1	3	15	113	44.742	627.813	1730	865
2047	383	449	46	13	1	3	16	118	47.028	674.841	1819	909
2048	403	472	48	13	1	3	17	125	49.431	724.272	1912	956
2049	423	496	51	14	1	3	17	131	51.957	776.229	2009	1005
2050	445	521	53	15	1	3	18	138	54.612	830.841	2112	1056
2051	467	548	56	15	1	3	19	145	57.403	888.243	2220	1110
2052	491	576	59	16	1	3	20	152	60.336	948.579	2333	1167
2053	516	605	62	17	1	4	21	160	63.419	1.011.998	2453	1226

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VIII región

Tabla 49. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Puda-Dichato, ROL: N-14-O.

Año	A	Cam	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMD A	TMDAx Sent
2024	126	97	13	7	0	4	4	34	20.447	20.447	501	251
2025	134	103	14	7	0	4	4	36	21.669	42.116	531	265
2026	142	109	15	7	0	4	5	38	22.965	65.081	563	281
2027	150	115	15	8	0	4	5	40	24.338	89.419	596	298
2028	159	122	16	8	0	4	5	43	25.794	115.213	632	316
2029	169	130	17	9	0	5	5	45	27.336	142.549	670	335
2030	179	137	18	9	0	5	6	48	28.971	171.520	710	355
2031	190	145	20	10	0	5	6	51	30.703	202.223	752	376
2032	201	154	21	11	0	6	6	54	32.539	234.763	797	399
2033	213	163	22	11	0	6	7	57	34.485	269.248	845	422
2034	226	173	23	12	0	6	7	60	36.548	305.796	896	448
2035	239	184	25	13	0	7	8	64	38.733	344.529	949	475
2036	253	195	26	13	0	7	8	68	41.049	385.578	1006	503
2037	269	206	28	14	0	8	9	72	43.504	429.082	1066	533
2038	285	218	29	15	0	8	9	76	46.106	475.188	1130	565
2039	302	232	31	16	0	8	10	81	48.863	524.051	1197	599
2040	320	245	33	17	0	9	10	85	51.785	575.835	1269	634
2041	339	260	35	18	0	9	11	91	54.881	630.717	1345	672
2042	359	276	37	19	0	10	11	96	58.163	688.880	1425	713
2043	381	292	39	20	1	11	12	102	61.642	750.522	1510	755
2044	403	310	42	21	1	11	13	108	65.328	815.849	1601	800
2045	427	328	44	23	1	12	14	114	69.234	885.084	1696	848
2046	453	348	47	24	1	13	14	121	73.374	958.458	1798	899
2047	480	369	49	25	1	13	15	128	77.762	1.036.220	1905	953
2048	509	391	52	27	1	14	16	136	82.412	1.118.633	2019	1010
2049	539	414	56	28	1	15	17	144	87.341	1.205.974	2140	1070
2050	571	439	59	30	1	16	18	153	92.564	1.298.537	2268	1134
2051	606	465	62	32	1	17	19	162	98.099	1.396.636	2404	1202
2052	642	493	66	34	1	18	20	172	103.965	1.500.602	2547	1274
2053	680	522	70	36	1	19	22	182	110.182	1.610.784	2700	1350

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VIII región

Tabla 50. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Villa Mercedes-Quilleco, ROL: Q-469.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	139	201	18	15	0	3	4	51	33.632	33.632	761	381
2025	144	209	18	16	1	3	4	54	34.974	68.607	791	396
2026	150	217	19	17	1	4	4	56	36.370	104.976	823	412
2027	156	226	20	17	1	4	4	58	37.821	142.797	856	428
2028	162	235	21	18	1	4	5	60	39.330	182.127	890	445
2029	169	245	21	19	1	4	5	63	40.899	223.026	926	463
2030	175	254	22	19	1	4	5	65	42.531	265.558	962	481
2031	182	264	23	20	1	4	5	68	44.228	309.786	1001	500
2032	190	275	24	21	1	5	5	70	45.993	355.778	1041	520
2033	197	286	25	22	1	5	6	73	47.828	403.606	1082	541
2034	205	297	26	23	1	5	6	76	49.736	453.343	1125	563
2035	213	309	27	24	1	5	6	79	51.721	505.063	1170	585
2036	222	322	28	25	1	5	6	82	53.784	558.848	1217	609
2037	231	334	29	26	1	6	7	86	55.930	614.778	1266	633
2038	240	348	30	27	1	6	7	89	58.162	672.940	1316	658
2039	249	362	32	28	1	6	7	93	60.483	733.423	1369	684
2040	259	376	33	29	1	6	7	96	62.896	796.318	1423	712
2041	270	391	34	30	1	7	8	100	65.405	861.724	1480	740
2042	280	407	35	31	1	7	8	104	68.015	929.739	1539	770
2043	292	423	37	32	1	7	8	108	70.729	1.000.468	1601	800
2044	303	440	38	34	1	7	9	113	73.551	1.074.019	1664	832
2045	315	457	40	35	1	8	9	117	76.486	1.150.505	1731	865
2046	328	476	41	36	1	8	9	122	79.537	1.230.042	1800	900
2047	341	495	43	38	1	8	10	127	82.711	1.312.753	1872	936
2048	355	514	45	39	1	9	10	132	86.011	1.398.764	1946	973
2049	369	535	47	41	1	9	11	137	89.443	1.488.207	2024	1012
2050	384	556	49	43	1	9	11	142	93.012	1.581.219	2105	1052
2051	399	578	50	44	1	10	11	148	96.723	1.677.942	2189	1094
2052	415	601	52	46	1	10	12	154	100.582	1.778.525	2276	1138
2053	431	625	55	48	2	10	12	160	104.595	1.883.120	2367	1183

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VIII región

Tabla 51. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Cabrero-Paso Hondo, ROL: Q-510.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMD A	TMDA xSent
2024	174	140	34	12	4	4	8	53	44.060	44.060	753	376
2025	184	147	36	12	4	4	9	56	46.386	90.446	793	396
2026	193	155	38	13	4	4	9	59	48.836	139.282	834	417
2027	204	163	40	14	4	5	10	62	51.414	190.696	878	439
2028	214	172	42	14	5	5	10	66	54.129	244.825	925	462
2029	226	181	44	15	5	5	11	69	56.987	301.811	974	487
2030	237	191	47	16	5	6	12	73	59.996	361.807	1025	513
2031	250	201	49	17	5	6	12	77	63.163	424.970	1079	540
2032	263	211	52	17	6	6	13	81	66.498	491.469	1136	568
2033	277	222	54	18	6	6	13	85	70.009	561.478	1196	598
2034	292	234	57	19	6	7	14	89	73.706	635.184	1259	630
2035	307	247	60	20	6	7	15	94	77.598	712.782	1326	663
2036	323	260	63	21	7	7	16	99	81.695	794.477	1396	698
2037	340	273	67	23	7	8	17	104	86.008	880,485	1470	735
2038	358	288	70	24	8	8	17	110	90.550	971,034	1547	774
2039	377	303	74	25	8	9	18	116	95.331	1.066.365	1629	814
2040	397	319	78	26	8	9	19	122	100.364	1.166.729	1715	857
2041	418	336	82	28	9	10	20	128	105.663	1.272.392	1805	903
2042	440	354	86	29	9	10	21	135	111.242	1.383.635	1901	950
2043	464	372	91	31	10	11	22	142	117.116	1.500.750	2001	1001
2044	488	392	96	32	10	11	24	150	123.300	1.624.050	2107	1053
2045	514	413	101	34	11	12	25	158	129.810	1.753.860	2218	1109
2046	541	434	106	36	11	13	26	166	136.664	1.890.524	2335	1168
2047	570	457	112	38	12	13	28	175	143.880	2.034.403	2458	1229
2048	600	481	118	40	13	14	29	184	151.476	2.185.880	2588	1294
2049	631	507	124	42	13	15	31	194	159.474	2.345.354	2725	1362
2050	665	534	130	44	14	15	32	204	167.895	2.513.249	2869	1434
2051	700	562	137	46	15	16	34	215	176.759	2.690.008	3020	1510
2052	737	591	145	49	16	17	36	226	186.092	2.876.101	3180	1590
2053	776	623	152	51	16	18	38	238	195.918	3.072.019	3348	1674

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la VIII región

Tabla 52. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Los Tallos, ROL: T-189.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	101	39	5	6	0	4	0	21	15.255	15.255	312	156
2025	106	41	5	6	0	4	0	22	16.006	31.262	327	164
2026	112	43	5	7	0	4	0	23	16.794	48.055	343	172
2027	117	45	6	7	0	5	0	24	17.620	65.675	360	180
2028	123	47	6	7	0	5	0	26	18.487	84.162	378	189
2029	129	50	6	8	0	5	0	27	19.396	103.558	397	198
2030	135	52	7	8	0	5	0	28	20.351	123.908	416	208
2031	142	55	7	9	0	6	0	30	21.352	145.260	437	218
2032	149	57	7	9	0	6	0	31	22.402	167.662	458	229
2033	156	60	8	9	0	6	0	33	23.504	191.167	481	240
2034	164	63	8	10	0	6	0	34	24.661	215.828	504	252
2035	172	66	8	10	0	7	0	36	25.874	241.702	529	265
2036	180	70	9	11	0	7	0	38	27.147	268.849	555	278
2037	189	73	9	12	0	7	0	40	28.483	297.332	583	291
2038	199	77	10	12	0	8	0	42	29.884	327.216	611	306
2039	208	80	10	13	0	8	0	44	31.355	358.571	641	321
2040	219	84	11	13	0	9	0	46	32.897	391.468	673	336
2041	229	89	11	14	0	9	0	48	34.516	425.984	706	353
2042	241	93	12	15	0	9	0	50	36.214	462.197	741	370
2043	253	97	12	15	0	10	0	53	37.996	500.193	777	389
2044	265	102	13	16	0	10	0	55	39.865	540.058	815	408
2045	278	107	14	17	0	11	0	58	41.826	581.884	855	428
2046	292	113	14	18	0	11	0	61	43.884	625.768	898	449
2047	306	118	15	19	1	12	1	64	46.043	671.812	942	471
2048	321	124	16	20	1	13	1	67	48.309	720.120	988	494
2049	337	130	17	20	1	13	1	70	50.685	770.806	1037	518
2050	353	136	17	21	1	14	1	74	53.179	823.985	1088	544
2051	371	143	18	23	1	15	1	78	55.796	879.780	1141	571
2052	389	150	19	24	1	15	1	81	58.541	938.321	1197	599
2053	408	158	20	25	1	16	1	85	61.421	999.742	1256	628

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XIV región

Tabla 53. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Puile, ROL: T-218.

Año	A	Cam	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMD A	TMDAx Sent
2024	103	76	10	12	0	0	7	29	22.100	22.100	414	207
2025	108	80	10	13	0	0	7	30	23.262	45.362	436	218
2026	114	84	11	13	0	0	7	32	24.486	69.848	459	229
2027	120	88	11	14	0	0	8	33	25.774	95.623	483	241
2028	126	93	12	15	0	0	8	35	27.130	122.752	508	254
2029	133	98	12	15	0	1	9	37	28.557	151.309	535	267
2030	140	103	13	16	0	1	9	39	30.059	181.368	563	282
2031	147	108	14	17	0	1	10	41	31.640	213.008	593	296
2032	155	114	14	18	0	1	10	43	33.304	246.312	624	312
2033	163	120	15	19	0	1	11	45	35.056	281.368	657	328
2034	171	126	16	20	0	1	11	48	36.900	318.268	691	346
2035	180	133	17	21	0	1	12	50	38.841	357.109	728	364
2036	190	140	18	22	0	1	12	53	40.884	397.993	766	383
2037	200	147	19	23	0	1	13	56	43.034	441.027	806	403
2038	210	155	19	24	0	1	14	59	45.298	486.325	849	424
2039	222	163	20	26	0	1	14	62	47.681	534.006	893	447
2040	233	172	22	27	0	1	15	65	50.189	584.195	940	470
2041	245	181	23	29	0	1	16	68	52.829	637.023	990	495
2042	258	191	24	30	0	1	17	72	55.607	692.631	1042	521
2043	272	201	25	32	0	1	18	76	58.532	751.163	1096	548
2044	286	211	26	33	0	1	19	80	61.611	812.774	1154	577
2045	301	222	28	35	0	1	19	84	64.852	877.626	1215	607
2046	317	234	29	37	0	1	21	88	68.263	945.889	1279	639
2047	334	246	31	39	0	1	22	93	71.854	1.017.743	1346	673
2048	351	259	33	41	0	1	23	98	75.633	1.093.376	1417	708
2049	370	273	34	43	0	1	24	103	79.612	1.172.988	1491	746
2050	389	287	36	45	0	1	25	109	83.799	1.256.787	1570	785
2051	410	302	38	48	0	2	27	114	88.207	1.344.994	1652	826
2052	431	318	40	50	1	2	28	120	92.847	1.437.840	1739	870
2053	454	335	42	53	1	2	29	127	97.730	1.535.571	1831	915

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XIV región

Tabla 54. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Lago Neltume - Liquiñe, ROL: T-29.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	223	124	15	18	0	0	10	53	33.571	33.571	782	391
2025	232	129	16	19	0	0	10	55	34.917	68.488	813	407
2026	241	135	17	20	0	0	10	57	36.317	104.806	846	423
2027	251	140	17	20	0	0	11	59	37.774	142.579	880	440
2028	261	146	18	21	0	0	11	62	39.288	181.868	915	458
2029	271	151	19	22	0	0	12	64	40.864	222.732	952	476
2030	282	158	19	23	0	0	12	67	42.503	265.234	990	495
2031	294	164	20	24	0	0	13	69	44.207	309.441	1030	515
2032	305	170	21	25	0	0	13	72	45.980	355.421	1071	536
2033	318	177	22	26	1	0	14	75	47.823	403.244	1114	557
2034	330	184	23	27	1	0	14	78	49.741	452.985	1159	579
2035	344	192	24	28	1	0	15	81	51.736	504.721	1205	603
2036	357	199	25	29	1	0	15	84	53.810	558.531	1253	627
2037	372	207	26	30	1	0	16	88	55.968	614.499	1304	652
2038	387	216	27	31	1	0	17	91	58.212	672.711	1356	678
2039	402	224	28	33	1	0	17	95	60.547	733.258	1410	705
2040	418	233	29	34	1	0	18	99	62.975	796.233	1467	733
2041	435	243	30	35	1	0	19	103	65.500	861.733	1526	763
2042	452	253	31	37	1	0	20	107	68.126	929.859	1587	793
2043	470	263	32	38	1	0	20	111	70.858	1.000.718	1651	825
2044	489	273	34	40	1	0	21	116	73.700	1.074.417	1717	858
2045	509	284	35	41	1	0	22	120	76.655	1.151.072	1786	893
2046	529	296	36	43	1	0	23	125	79.729	1.230.801	1857	929
2047	551	307	38	45	1	0	24	130	82.926	1.313.728	1932	966
2048	573	320	39	47	1	0	25	135	86.251	1.399.979	2009	1005
2049	596	333	41	48	1	0	26	141	89.710	1.489.689	2090	1045
2050	620	346	43	50	1	0	27	147	93.308	1.582.997	2173	1087
2051	644	360	44	52	1	0	28	152	97.049	1.680.046	2261	1130
2052	670	374	46	55	1	0	29	159	100.941	1.780.987	2351	1176
2053	697	389	48	57	1	0	30	165	104.989	1.885.975	2446	1223

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XIV región

Tabla 55. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Puente Alto – Cruce Cayuruca, ROL: T-731.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMD A	TMDAxS ent
2024	185	116	26	21	1	2	3	50	41.979	41.979	705	353
2025	195	122	28	22	1	2	4	53	44.384	86.363	745	373
2026	207	129	29	23	1	2	4	56	46.927	133.290	788	394
2027	218	137	31	24	1	2	4	59	49.616	182.906	833	417
2028	231	144	33	26	1	2	4	62	52.459	235.366	881	441
2029	244	153	34	27	1	2	5	66	55.465	290.831	932	466
2030	258	161	36	29	1	2	5	70	58.643	349.474	985	492
2031	273	171	38	30	1	2	5	73	62.004	411.478	1041	521
2032	289	180	41	32	1	2	5	78	65.556	477.034	1101	551
2033	305	191	43	34	1	3	6	82	69.313	546.347	1164	582
2034	323	202	45	36	1	3	6	87	73.284	619.631	1231	615
2035	341	213	48	38	1	3	6	92	77.484	697.115	1301	651
2036	361	225	51	40	1	3	7	97	81.923	779.038	1376	688
2037	381	238	54	42	1	3	7	103	86.618	865.656	1455	727
2038	403	252	57	45	1	3	8	109	91.581	957.237	1538	769
2039	426	266	60	47	2	3	8	115	96.828	1.054.065	1626	813
2040	451	282	63	50	2	4	9	121	102.377	1.156.442	1720	860
2041	477	298	67	53	2	4	9	128	108.243	1.264.684	1818	909
2042	504	315	71	56	2	4	10	136	114.445	1.379.129	1922	961
2043	533	333	75	59	2	4	10	143	121.003	1.500.132	2032	1016
2044	563	352	79	63	2	5	11	152	127.936	1.628.069	2149	1074
2045	596	372	84	66	2	5	11	160	135.267	1.763.336	2272	1136
2046	630	394	89	70	2	5	12	170	143.018	1.906.354	2402	1201
2047	666	416	94	74	2	5	13	179	151.213	2.057.566	2540	1270
2048	704	440	99	78	3	6	13	190	159.877	2.217.444	2685	1343
2049	744	465	105	83	3	6	14	200	169.038	2.386.482	2839	1420
2050	787	492	111	87	3	6	15	212	178.724	2.565.206	3002	1501
2051	832	520	117	92	3	7	16	224	188.965	2.754.171	3174	1587
2052	880	550	124	98	3	7	17	237	199.793	2.953.964	3356	1678
2053	930	581	131	103	3	8	18	250	211.241	3.165.204	3548	1774

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XIV región

Tabla 56. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Cerro Castillo, Ruta 9N.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	132	50	9	5	0	0	13	28	14.260	14.260	416	208
2025	139	53	9	5	0	0	13	29	15.053	29.313	439	220
2026	147	56	10	5	0	0	14	31	15.890	45.202	464	232
2027	155	59	10	5	0	0	15	33	16.773	61.975	489	245
2028	163	62	11	6	0	0	16	34	17.706	79.681	517	258
2029	173	66	12	6	0	0	17	36	18.690	98.371	545	273
2030	182	69	12	6	0	0	18	38	19.729	118.101	576	288
2031	192	73	13	7	0	0	19	40	20.826	138.927	608	304
2032	203	77	14	7	0	0	20	43	21.984	160.911	641	321
2033	214	81	14	8	0	0	21	45	23.207	184.118	677	338
2034	226	86	15	8	0	0	22	48	24.497	208.615	715	357
2035	239	91	16	8	0	0	23	50	25.859	234.474	754	377
2036	252	96	17	9	0	0	24	53	27.297	261.770	796	398
2037	266	101	18	9	0	0	26	56	28.814	290.585	841	420
2038	281	107	19	10	0	0	27	59	30.416	321.001	887	444
2039	296	113	20	10	0	0	29	62	32.108	353.109	937	468
2040	313	119	21	11	0	0	30	66	33.893	387.001	989	494
2041	330	125	22	12	0	0	32	69	35.777	422.778	1044	522
2042	349	132	23	12	0	0	34	73	37.766	460.545	1102	551
2043	368	140	25	13	0	0	35	77	39.866	500.411	1163	582
2044	389	148	26	14	0	0	37	82	42.083	542.494	1228	614
2045	410	156	28	15	1	0	39	86	44.423	586.916	1296	648
2046	433	164	29	15	1	0	42	91	46.892	633.809	1368	684
2047	457	174	31	16	1	0	44	96	49.500	683.308	1444	722
2048	482	183	32	17	1	0	46	101	52.252	735.560	1524	762
2049	509	193	34	18	1	0	49	107	55.157	790.717	1609	805
2050	538	204	36	19	1	0	52	113	58.224	848.941	1699	849
2051	567	216	38	20	1	0	55	119	61.461	910.402	1793	896
2052	599	227	40	21	1	0	58	126	64.878	975.280	1893	946
2053	632	240	42	22	1	0	61	133	68.485	1.043.766	1998	999

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XII región

Tabla 57. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Pampa Guanaco, ROL: Y-85.

Año	A	Cam	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EExAño	TMD A	TMDAx Sent
2024	31	62	14	8	1	1	8	19	20.638	20.638	248	124
2025	33	66	15	8	1	1	8	20	21.843	42.481	262	131
2026	35	70	16	9	1	1	9	21	23.119	65.600	278	139
2027	37	74	17	9	1	1	9	22	24.469	90.069	294	147
2028	39	78	18	10	1	1	10	23	25.898	115.968	311	156
2029	41	83	19	10	1	1	10	25	27.411	143.378	329	165
2030	44	87	20	11	1	1	11	26	29.011	172.390	349	174
2031	46	93	21	11	1	1	12	28	30.706	203.095	369	184
2032	49	98	22	12	1	1	12	29	32.499	235.594	391	195
2033	52	104	23	13	1	1	13	31	34.397	269.991	413	207
2034	55	110	25	14	1	1	14	33	36.406	306.396	437	219
2035	58	116	26	14	1	1	14	35	38.532	344.928	463	232
2036	61	123	28	15	1	2	15	37	40.782	385.710	490	245
2037	65	130	29	16	1	2	16	39	43.164	428.873	519	259
2038	69	138	31	17	1	2	17	41	45.684	474.557	549	274
2039	73	146	33	18	1	2	18	44	48.352	522.910	581	291
2040	77	154	35	19	1	2	19	46	51.176	574.086	615	307
2041	81	163	37	20	2	2	20	49	54.165	628.250	651	325
2042	86	173	39	21	2	2	22	52	57.328	685.578	689	344
2043	91	183	41	23	2	2	23	55	60.676	746.254	729	365
2044	96	194	43	24	2	2	24	58	64.219	810.473	772	386
2045	102	205	46	25	2	3	26	62	67.970	878.443	817	408
2046	108	217	49	27	2	3	27	65	71.939	950.382	864	432
2047	114	229	52	29	2	3	29	69	76.140	1.026.523	915	457
2048	121	243	55	30	2	3	30	73	80.587	1.107.109	968	484
2049	128	257	58	32	2	3	32	77	85.293	1.192.403	1025	512
2050	135	272	61	34	3	3	34	82	90.274	1.282.677	1085	542
2051	143	288	65	36	3	4	36	87	95.546	1.378.224	1148	574
2052	152	305	68	38	3	4	38	92	101.126	1.479.350	1215	608
2053	161	323	72	40	3	4	40	97	107.032	1.586.382	1286	643

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XII región

Tabla 58. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Dos Lagunas, ROL: Q-510.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	S R	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMDA	TMDAx Sent
2024	136	75	14	7	1	3	21	36	28.288	28.288	516	258
2025	144	80	15	7	2	4	22	38	29.889	58.178	545	273
2026	152	84	15	8	2	4	23	40	31.581	89.759	576	288
2027	160	89	16	8	2	4	25	43	33.369	123.127	608	304
2028	169	94	17	9	2	4	26	45	35.257	158.384	643	321
2029	179	99	18	9	2	4	28	48	37.253	195.637	679	340
2030	189	105	19	10	2	5	29	50	39.361	234.998	718	359
2031	200	111	20	10	2	5	31	53	41.589	276.587	758	379
2032	211	117	21	11	2	5	33	56	43.943	320.530	801	401
2033	223	124	23	12	2	6	34	59	46.430	366.961	847	423
2034	236	131	24	12	3	6	36	63	49.058	416.019	895	447
2035	249	138	25	13	3	6	38	66	51.835	467.854	945	473
2036	263	146	27	14	3	6	41	70	54.769	522.622	999	499
2037	278	154	28	15	3	7	43	74	57.869	580.491	1055	528
2038	294	163	30	15	3	7	45	78	61.144	641.635	1115	557
2039	310	172	31	16	3	8	48	82	64.605	706.240	1178	589
2040	328	182	33	17	4	8	51	87	68.261	774.501	1245	622
2041	346	192	35	18	4	9	53	92	72.125	846.626	1315	658
2042	366	203	37	19	4	9	56	97	76.207	922.833	1390	695
2043	387	215	39	20	4	10	60	103	80.521	1.003.354	1468	734
2044	409	227	41	21	4	10	63	109	85.078	1.088.432	1551	776
2045	432	240	44	23	5	11	67	115	89.893	1.178.325	1639	820
2046	456	253	46	24	5	11	70	121	94.981	1.273.307	1732	866
2047	482	268	49	25	5	12	74	128	100.357	1.373.664	1830	915
2048	509	283	52	27	6	13	79	135	106.038	1.479.702	1934	967
2049	538	299	55	28	6	13	83	143	112.039	1.591.741	2043	1022
2050	569	316	58	30	6	14	88	151	118.381	1.710.122	2159	1079
2051	601	333	61	31	7	15	93	160	125.081	1.835.203	2281	1140
2052	635	352	64	33	7	16	98	169	132.161	1.967.363	2410	1205
2053	671	372	68	35	7	17	103	178	139.641	2.107.004	2546	1273

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XII región

Tabla 59. Cálculo de TMDA por sentido de vía. Camino: Caleta Josefina, ROL: Y-85.

Año	Aut	Ca	C 2E	C +2E	SR	R	LC	Vol	EExAño	EEAxAño	TMD A	TMDAx Sent
2024	78	113	18	7	10	4	14	37	42.577	42.577	491	246
2025	82	120	19	8	11	4	15	39	44.974	87.551	519	259
2026	87	127	20	8	12	5	16	41	47.506	135.056	548	274
2027	92	134	21	9	12	5	17	44	50.180	185.237	579	289
2028	97	141	22	9	13	5	17	46	53.006	238.242	611	306
2029	103	149	24	10	14	5	18	49	55.990	294.232	646	323
2030	108	158	25	10	14	6	19	51	59.142	353.374	682	341
2031	115	167	26	11	15	6	21	54	62.472	415.846	720	360
2032	121	176	28	12	16	6	22	57	65.989	481.835	761	380
2033	128	186	29	12	17	7	23	61	69.704	551.539	804	402
2034	135	196	31	13	18	7	24	64	73.628	625.167	849	425
2035	143	207	33	14	19	8	26	68	77.774	702.941	897	448
2036	151	219	35	14	20	8	27	71	82.152	785.093	947	474
2037	159	231	37	15	21	8	29	75	86.777	871.870	1001	500
2038	168	244	39	16	22	9	30	80	91.663	963.534	1057	529
2039	178	258	41	17	24	9	32	84	96.824	1.060.357	1117	558
2040	188	273	43	18	25	10	34	89	102.275	1.162.632	1179	590
2041	198	288	46	19	26	10	36	94	108.033	1.270.665	1246	623
2042	209	304	48	20	28	11	38	99	114.115	1.384.780	1316	658
2043	221	321	51	21	29	12	40	105	120.540	1.505.320	1390	695
2044	234	339	54	22	31	12	42	111	127.326	1.632.646	1468	734
2045	247	359	57	23	33	13	44	117	134.495	1.767.141	1551	776
2046	261	379	60	25	35	14	47	124	142.067	1.909.208	1638	819
2047	275	400	63	26	37	15	49	131	150.065	2.059.273	1731	865
2048	291	423	67	28	39	15	52	138	158.514	2.217.787	1828	914
2049	307	446	71	29	41	16	55	146	167.438	2.385.225	1931	965
2050	324	471	75	31	43	17	58	154	176.865	2.562.090	2040	1020
2051	343	498	79	33	46	18	62	162	186.822	2.748.912	2154	1077
2052	362	526	83	34	48	19	65	172	197.340	2.946.253	2276	1138
2053	382	556	88	36	51	20	69	181	208.451	3.154.703	2404	1202

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de volumen de tránsito del censo de vialidad para la XII región