

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



“Determinación de la Influencia de la Incertidumbre en la confiabilidad del Método de Diseño AASHTO - 93”

Por:

Aspasia Huelen Buch Ponce

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.

Profesor Guía: Néstor René Espinoza Guillén

ABRIL 2022

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Aspectos Generales	8
1.2 La Confiabilidad.....	10
1.3 Objetivo General	11
1.4 Objetivos Específicos	12
2 MÉTODO AASHTO-93.....	13
2.1 Diseño Método AASHTO - 93	14
2.1.1 Tránsito.....	15
2.1.2 Serviciabilidad	19
2.1.3 Parámetros Dependientes de la Experiencia del Diseñador.....	21
2.1.4 Módulo Resiliente Efectivo (MR).....	24
2.1.5 Coeficiente Estructural <i>ai</i> y su Determinación	26
2.1.6 Drenaje	27
2.1.7 Número Estructural.....	29
3 TRAMOS DE ESTUDIO.....	31
3.1 Ubicación	32
3.1.1 Tramo 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata	32
3.1.2 Tramo 2: Plaza de Peajes Lo Prado	33
3.2 Análisis del tráfico.....	33
3.2.1 Tránsito Equivalente.....	33
3.2.2 Factor de Equivalencia de Carga.....	34
3.2.3 Factor de Camión	34
3.2.4 Número Total de Ejes Equivalentes.....	35
3.3 Datos del diseño original de los tramos elegido	41
3.3.1 Datos y Consideraciones del Diseño Original	42
3.3.2 Estructura existente de Tramo 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata.....	45
3.3.3 Estructura existente de Tramo 2: Plaza de Peajes Lo Prado	46
3.4 Comparación de Número de Ejes Equivalentes.	47

4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL SENSIBILIDAD	49
4.1	Análisis y comparación de los Ejes Equivalentes	49
4.1.1	Sensibilidad con Respecto al Tráfico y la Confianza.....	49
4.2	Diseño de Verificación por Capa	54
4.2.1	Determinación de los Espesores	54
4.2.2	Verificación de los espesores Mínimos en Función del Número Estructural (NE)	56
5	ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	60
5.1	Evaluación técnica y caracterización del pavimento flexible	60
5.1.1	Los Defectos superficiales del Pavimento Flexible y su Mitigación	61
5.2	Operaciones de Mantenimiento	63
5.2.1	Estrategias de Mantenimiento.....	64
5.2.2	Propuesta de Mantenimiento del para los Tamos de Estudio.....	66
6	INFLUENCIA DEL COSTO DEL MANTENIMIENTO EN LA TASA DE PEAJE	68
6.1	Presupuestos de Operaciones de Mantenimiento y Construcción	68
6.1.1	Presupuesto Construcción	68
6.1.2	Presupuesto de Mantenimiento de Restauración: Bacheo Superficial ..	69
6.1.3	Presupuesto del Mantenimiento de Rehabilitación Mayor: Reconstrucción por Capa	70
6.2	Influencia en el valor de los Peajes	72
6.2.1	Costos de Circulación	73
7	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....	79
8	BIBLIOGRAFÍA.....	81
8.1	ANEXO I: Datos del Tránsito Vehicular	84
8.2	Anexo II: Peajes Tarifa 2022	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Proyección del estado de un pavimento en el tiempo [3].....	9
Figura 1.2: Variación de la vida de diseño de un pavimento flexible relacionada con los valores de confiabilidad [6].	10
Figura 2.1: (a) Fotografía de la etapa de construcción de las Pista de Prueba AASHO; (b) Características de las secciones de prueba en los circuitos [7].	13
Figura 2.2: Formulario de calificación de la capacidad de servicio de la prueba de carretera de AASHO [16].....	20
Figura 2.3 : Historial de Rendimiento del Pavimento [16].....	21
Figura 2.4: Nivel óptima de confiabilidad [17].	24
Figura 3.1: Imagen Satelital de la Ruta 68, Google Earth.	31
Figura 3.2: Imagen satelital del Peaje Troncal Zapata, Google Earth.....	32
Figura 3.3: Imagen Satelital del Peaje Lo Prado, Google Earth.....	33
Figura 3.5: Proyección de Ejes Equivalentes de la Plaza Peajes Lo Prado.	38
Figura 3.5: Proyección de Ejes Equivalentes de la Plaza de peajes Trocal Zapata.	38
Figura 3.6: Estructura de Pavimento existente del Tramo 1 [25].....	45
Figura 3.7: Estructura de Pavimento existente del Tramo 2 [25].....	46
Figura 4.1: Gráfico de Ejes Equivalentes v/s Número Estructural del Tramo 1, variando el nivel confianza R = 70, 80 y 90 %	50
Figura 4.2: Gráfico de Ejes Equivalentes v/s Número Estructural del Tramo 2 variando la confianza R = 70, 80 y 90 %.....	51
Figura 4.3: Nivel de Confianza v/s Número Estructural del Tamo 2.	52
Figura 4.4: Nivel de Confianza v/s Número Estructural del Tamo 1.	53
Figura 4.5: Estructura del paquete estructural de un pavimento Asfáltico [22].....	54
Figura 4.6: Esquema de paquete estructural, con las capas que lo componen [22].	56
Figura 4.7: Gráfico de Número Estructural v/s Desviación Estándar del Tramo 1.	58
Figura 6.1: Gráfico del tránsito promedio porcentual según el tipo de vehículos de ambas plazas de peajes de estudio.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tramo seleccionados y Ubicación.....	18
Tabla 2.2: Índice de Serviciabilidad recomendados por el MOP [11]......	19
Tabla 2.3: Nivel recomendados de confiabilidad (R) [11].	22
Tabla 2.4: Valores de ZR para diversos grados de confianza [11]......	22
Tabla 2.5: Valores para el error estándar combinado So [17]	23
Tabla 2.6: Capacidad del drenaje para remover la humedad [11]......	28
Tabla 2.7: Coeficientes de drenaje (mi) [11]......	28
Tabla 3.1: Factor Camión propuesto por el Manual de Carreteras Vol. 3 de la Ruta 68 [11].	35
Tabla 3.2 : Cálculo del Tráfico Medio Diario Anual (TMDA), para cada plaza de peajes en dirección hacia Santiago.	36
Tabla 3.4: Ejes Equivalentes del año 2015 al 2018 para la Plaza de peajes Troncal Zapata.....	37
Tabla 3.4: Ejes Equivalentes del año 2015 al 2018, para la Plaza de peajes Lo Prado....	37
Tabla 3.5: Ejes Equivalentes y Ejes Equivalentes Acumulados para la Plaza de peajes Troncal Zapata.....	39
Tabla 3.6: Ejes Equivalentes y Ejes Equivalentes Acumulados para la Plaza de peajes Lo Prado.....	40
Tabla 3.7 : Total de Ejes Equivalentes Acumulados corregidos de ambos tramos.	41
Tabla 3.8: Volumen del Tráfico en Ejes Equivalentes del diseño original para cada tramo de estudio [25].	42
Tabla 3.9: Niveles de Confianza adoptados para cada tramo diseño original [25].	43
Tabla 3.10: Módulo resiliente para cada tramo en MPa [25].	43
Tabla 3.11: Coeficientes Estructural adoptado para cada tramo [25]......	44
Tabla 3.12: Espesores de Pavimento del Tramo 1 [25].	45
Tabla 3.13: Espesores de Pavimento del tramo 2 [25].	46
Tabla 3.14: Resumen de los parámetros de diseño ingresados en el Programa DIPAV 2.3.	47
Tabla 3.15: Número de Ejes Equivalentes obtenidos con el Método Simplificado y el programa DIPAV 2.3.....	47

Tabla 3.16: Comparación de Ejes Equivalentes obtenidos por el Programa DIPAV 2.3 y los originales.	48
Tabla 4.1: Número Estructural calculado con en función de los Ejes Equivalentes para cada tramo.	49
Tabla 4.2: Espesores Mínimos de las capas Estructuras recomendados por el Manual de Carreteras [11].	55
Tabla 4.3: Tabla resumen de los resultados obtenidos con el programa DIPAV 2.3: Espesor mínimo de la capa granular y el número estructural con las solicitudes de carga del diseño original.	57
Tabla 4.4: Tabla resumen de los resultados obtenidos con el programa DIPAV 2.3: Espesor mínimo de la capa granular y el número estructural con las solicitudes de carga proyectada.	57
Tabla 5.1. Atributo de desempeño de un pavimento y sus respectivos índices [26].	60
Tabla 5.2: Deformaciones superficiales del pavimento flexible [26].	62
Tabla 5.3 : Defectos superficiales en pavimento flexible [26].	62
Tabla 5.4: Agrietamiento en pavimento flexible [26]	63
Tabla 5.5: Resultados Esperados de la aplicación de estrategias 3R [26].	65
Tabla 5.6: Operaciones de mantenimiento de pavimento Asfáltico (MOP, 2019) [27].	66
Tabla 6.1: Presupuesto del Construcción de la Ruta 68.	69
Tabla 6.2: Presupuesto de Mantenimiento Rutinario de la Ruta 68.	69
Tabla 6.4: Tabla del Presupuesto de Mantenimiento Mayor del Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado.	70
Tabla 6.4: Tabla del Presupuesto de Mantenimiento Mayor del Tramo 1: Plaza de peajes Troncal Zapata.	70
Tabla 6.5 : Verificación del paquete estructural del Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado, modificando la capa base granular.	71
Tabla 6.6: Verificación del paquete estructural del Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado, modificando la capa asfáltica intermedia.	71
Tabla 6.7: Diferencias entre los costos del Mantenimiento Mayor modificando los espesores del paquete.	72
Tabla 6.8: Resumen de costos de inversión y mantenimientos.	73
Tabla 6.9: Datos obtenidos del INE del tránsito vehicular de cada plaza de peaje del año 2015 al 2018. Anexo1 [24].	74

Tabla 6.10: Costos de anual de la inversión y mantención anual de la carretera y el costo de circulación por vehículo.	74
Tabla 6.11: Valores determinados por circulación en la Ruta 68, determinados con el Factor de comparación.	75
Tabla 6.12: Tabla de multiplicadores de las tarifas de peajes por categorización de vehículos [32].	75
Tabla 6.13: Tabla de multiplicadores de las tarifas de peajes evaluada con 110 Km y 800 CLP [32].	76
Tabla 6.14: Extracto de boletín de “Tarifas para peajes 2022 de la Ruta 68, para usuarios con TAG o pago manual”, Anexo II.	76
Tabla 6.15: Tabla con las categorizaciones equivalentes asociados a los tipos de vehículos y el cálculo del costo del peaje en los distintos casos.	77

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INCERTIDUMBRE EN LA CONFIABILIDAD DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS POR LA AASHTO – 93

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años, la ingeniería vial ha tenido una influencia muy importante en el desarrollo de la civilización, pues sus investigaciones han mejorado los métodos de diseño de pavimentos, logrando sistemas viales más eficientes y con una mayor vida útil debido a las mejoras en métodos de diseño, en los materiales de construcción y en los métodos de mantenimiento [1].

Este desarrollo se aprecia también en Chile, donde, en los últimos años, las necesidades de contar con una red de carreteras modernas y eficientes ha llevado al país a buscar un procedimiento que le permita no sólo construir carreteras, sino también, mantenerlas en buen estado de servicio para un volumen de tráfico de carga y de personas cada vez más importante [1].

Por ello, Chile opta por un sistema basado en concesiones de diferentes tramos importantes a fin de lograr configurar una red fundamental de muy alta calidad que ha permitido solucionar parcialmente las limitaciones del transporte terrestre que aquejaban al país [1].

Como resultado de dicha decisión, Chile cuenta actualmente con una red vial de aproximadamente 77 mil kilómetros de carreteras pavimentadas, de los cuales, 3.180 Km corresponden actualmente a autopistas y carreteras interurbanas concesionadas [2].

1.1 ASPECTOS GENERALES

El programa de concesiones chileno antes mencionado, está basado en sistemas de contrato de “construcción, operación y transferencia (BOT)” bajo la modalidad de “llave en mano”, el que implica que las carreteras y/o tramos viales concesionados estarán sujetos a un sistema de cobro de peajes destinados a recuperar el financiamiento realizado, a cubrir los costos del mantenimiento y administración, y además de recaudar utilidades razonables para la concesionaria [2].

Se debe destacar que este sistema está ligado a que el usuario obtenga un servicio apropiado, incluyendo obras nuevas y mejoramiento de las existentes y que la gestión de pavimentos e instalaciones complementarias alcance un estándar de calidad técnico oportuno y adecuado [1]. Sin embargo, los usuarios de las carreteras concesionadas presentan constantemente reclamos por el monto de los peajes aduciendo que dichos precios son muy elevados. Esta situación ha motivado a realizar una resumida investigación sobre los costos de mantenimiento y su influencia sobre las tasas de peajes. Por este motivo este trabajo busca correlacionar como influye el factor de la confianza en la incertidumbre del diseño de pavimento, y a su vez en el costo de la tasa de peajes.

En la Figura 1.1 se muestra el desarrollo de la vida útil de un pavimento, donde se observa que, después de una etapa de deterioro lento y poco visible, existe una etapa crítica para éste, en la cual el deterioro y degradación del pavimento se incrementa muy rápidamente, etapa en la que se realizan labores de mantenimiento rutinario. A pesar de dicho mantenimiento el pavimento alcanza un grado de deterioro que hace necesario un mantenimiento periódico que consiste, generalmente, en trabajos más profundos de reparación de la carpeta de rodadura y en algunos casos del paquete estructural del pavimento [3]. De no ejecutarse un buen mantenimiento rutinario, el pavimento entra a una fase de deterioro acelerado que, de no ser atendido, llevará a la degradación total del y, probablemente a la reconstrucción total del tramo afectado.

Cuando el programa de mantenimiento se realiza de manera sistemática, la curva que representa la vida útil del pavimento no alcanza las dos últimas etapas y los costos de mantenimiento y operación alcanzan montos razonables que pueden y deben ser cubiertos por las recaudaciones de peaje. Un mal programa de mantenimiento provocará que, en un plazo menor a la vida útil del pavimento, éste tenga un rendimiento menor al esperado y exija una reparación más profunda [3]o se puede llegar incluso a una reconstrucción de algunos tramos de la carretera.

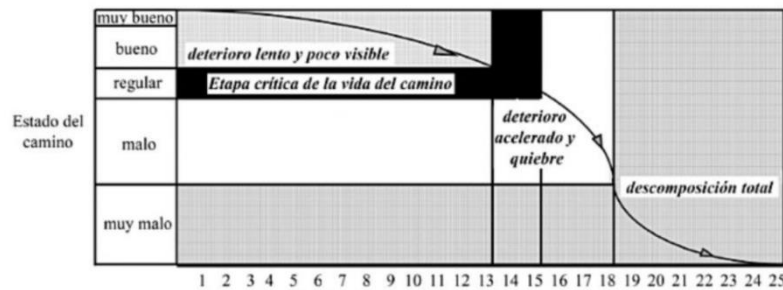


Figura 1.1: Proyección del estado de un pavimento en el tiempo [3].

El método de diseño de pavimentos utilizado en Chile es el método de la AASHTO-93, el cual es un método que estima el espesor de las capas estructurales del pavimento de tal manera que puedan soportar los esfuerzos generados por las cargas transmitidas por los ejes de los vehículos y las condiciones climáticas durante su vida útil.

En este método de diseño, la confiabilidad corresponde a un factor que está involucrado como una forma de tomar en consideración, la incertidumbre que acompaña a diferentes variables necesarias para el diseño, como son el crecimiento del volumen de tráfico, las cargas generadas por el mismo, las condiciones ambientales (meteorológicas e hidrológicas), el desarrollo del proceso de daño, las propiedades físicas y mecánicas y el rendimiento estructural de los materiales, así como también la calidad de los procesos de construcción [4].

1.2 LA CONFIABILIDAD

Se entiende por confiabilidad como "la probabilidad de que las cargas realmente aplicadas al pavimento no excedan el número de aplicaciones de la carga estándar para alcanzar el nivel mínimo de servicio propuesto en el diseño" y que la calidad de los materiales y ejecución de las obras sea buena [5].

Esta definición lleva implícita la necesidad de contar con datos de tráfico y de laboratorio confiables y representativos para cada proyecto. En donde el volumen de tráfico es una variable que, normalmente, es muy difícil de cuantificar, dado que puede tener la variable del tráfico inducido, es decir, el incremento de tráfico que induce el mejoramiento de la carretera al atraer usuarios que normalmente utilizaban otras vías.

Entonces, para poder determinar la vida útil y la intensidad del mantenimiento del pavimento de una carretera, será necesario contar con datos confiables para alcanzar resultados que reflejen los valores del nivel de confianza (R) asumidos con el método AASHTO-93.

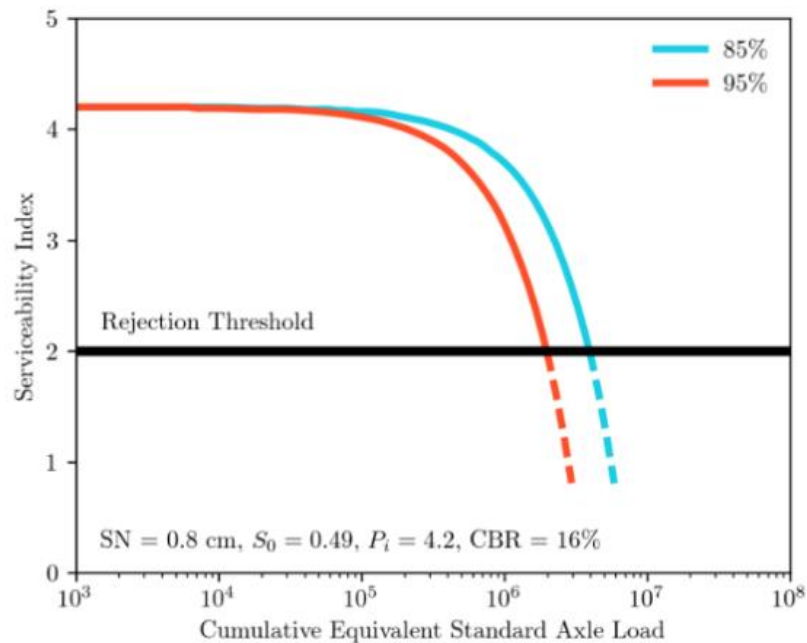


Figura 1.2: Variación de la vida de diseño de un pavimento flexible relacionada con los valores de confiabilidad [6].

Según Rodríguez *et al.* para un mismo valor de serviciabilidad final, como se puede apreciar en la Figura 1.2, para un índice de serviciabilidad final de 2, un nivel de confianza del 85% y otro de 95% se obtienen 3 y 1 millones de ejes equivalente respectivamente [6], resultados que muestran la importancia del nivel de confianza sobre los valores de diseño. Esta conclusión es muy importante ya que demuestra que el nivel de confianza puede afectar notablemente al diseño de un pavimento como lo indica la diferencia anterior.

En otras palabras, una diferencia de 10 % en el nivel de confianza puede representar una diferencia de varios millones de ejes equivalentes lo que se puede traducir en un sobre o subdimensionamiento del paquete estructural, lo que, a su vez, determinará una mayor o menor necesidad de mantenimiento del pavimento.

Por otro lado, los valores de las variaciones de los parámetros de diseño de los materiales de estructura de pavimento (CBR, módulo de resiliencia), tienen también una notable influencia sobre los espesores (números estructurales) de las capas de la estructura del pavimento.

En consecuencia, la confiabilidad en los valores de todos estos datos alcanza una importancia muy grande no solo en el diseño de los pavimentos, sino también en la determinación del plan de mantenimiento que, a su vez, determina los costos de operación de una carretera.

Considerando los antecedentes antes mencionados se puede decir que la tasa de peaje al estar condicionada a las necesidades de mantenimiento estará sujeta también a las variaciones del nivel de confianza tanto del volumen de tráfico (número de ejes equivalentes), como de la calidad de los resultados de laboratorio (clasificación de los suelos, CBR, módulo de resiliencia). Este aspecto alcanza una importancia aún mayor si se considera que, en la práctica, la determinación del nivel de confianza depende de los criterios y/o procedimientos utilizados para obtener dicho nivel de confianza; procedimientos y/o criterios que normalmente no son muy claros o están sujetos a las recomendaciones de las guías de diseño o al criterio del diseñador.

En este trabajo, se estudiará la influencia del nivel de confianza sobre los números estructurales de las capas de uno o dos tramos viales y, al mismo tiempo se hará un análisis de sensibilidad de los espesores de las capas estructurales y del volumen de tráfico asumiendo.

1.3 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es determinar la influencia del grado de confianza sobre el diseño del pavimento de dos tramos de la Ruta 68 que une Valparaíso con Santiago.

Con este estudio y asumiendo la vida útil considerada en el diseño, se determinará la necesidad de mantenimiento rutinario y periódico, y de esta manera, los costos asociados a dichos trabajos para estimar el monto de los peajes establecidos en dicha ruta.

Con estos resultados se hará una comparación con los costos actuales de las plazas de peajes de los tramos de estudio de la Ruta 68 y determinar, si existe diferencias en los valores y factores que explique la diferencia obtenida.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sugerir un sistema de gestión asociado a una estructura de pavimento ya diseñada correspondiente a la carretera elegida (Ruta 68).
- Determinar la interacción entre los parámetros de diseño sobre la base de la incertidumbre con respecto a la vida útil o desgaste del pavimento.
- Realizar un análisis de una propuesta de mantenimiento generada en este trabajo determinando los costos correspondientes y su incidencia en la tasa de peaje.
- Comparar los resultados obtenidos con los valores del peaje en los tramos elegidos.
- Proponer una posible metodología para el cálculo del valor de las tasas de peaje en función de los parámetros estudiados en este trabajo.
- Identificar y validar indicadores de calidad del pavimento que puedan definir el grado de satisfacción del usuario y estimar su posible uso en las carreteras chilenas.

2 MÉTODO AASHTO-93

El método de diseño de pavimentos en sus inicios estuvo en constante desarrollo, teniendo un proceso de mejora continua tanto el procedimiento de cálculo, como en las variables que se consideran para establecer el desgaste y resistencia de los pavimentos.

El desarrollo de los métodos de diseño de pavimentos se inició antes de la Segunda Guerra Mundial y se caracterizó por fundamentarse en la caracterización de los suelos de fundación y en la comparación de pavimentos similares que habrían tenido una misma duración [7].

Uno de los ensayos más completos y reconocidos para el desarrollo del método de pavimentos flexibles fue el desarrollado por la AASHO (hoy AASHTO) en 1958 en Illinois, Estados Unidos, que se conoce como AASHO ROAD TEST (Figura 2.1), este ensayo proporcionó la base para las guías de diseño empíricas de la AASHTO que se utilizan desde la década de 1960 hasta la actualidad [7]

Hoy en día el método para el diseño de pavimento en Chile, y en la mayoría de los países de Latinoamérica es el método AASHTO-93.

El método, tiene un enfoque empírico que se basa en observaciones de la prueba de carreteras AASHO y establece una correlación entre las condiciones del suelo, el tráfico, el cambio en las condiciones del pavimento y la estructura del pavimento [7].

Con el fin de proteger el diseño de la incertidumbre, se debe definir adecuadamente las cargas del tránsito (ejes equivalentes), las propiedades mecánicas, las condiciones ambientales, la evolución del deterioro y el rendimiento estructural de los materiales en donde se incorporan niveles de confianza que, aparentemente, deberían cubrir las deficiencias en la información utilizada [8].

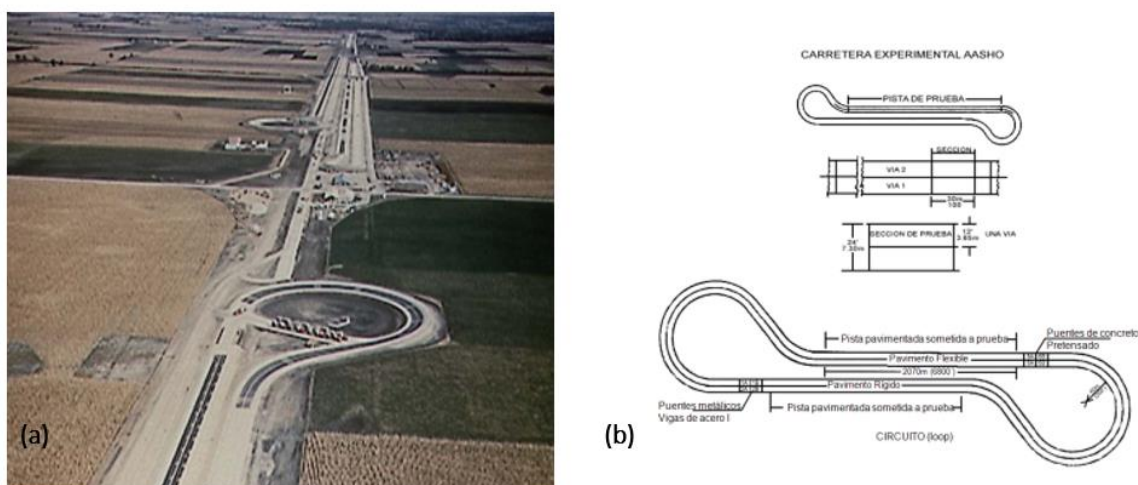


Figura 2.1: (a) Fotografía de la etapa de construcción de las Pista de Prueba AASHO; (b) Características de las secciones de prueba en los circuitos [7].

El principal propósito que persigue la metodología de diseño de pavimentos es determinar de forma clara y sencilla los espesores mínimos de las diferentes capas del paquete estructural de un pavimento, con el fin de que estos espesores generen el menor costo de construcción y de mantención. En el caso de que el espesor sea mayor que el necesario, el pavimento presentará un buen comportamiento y un bajo costo de mantenimiento, pero el costo inicial será elevado, resultado no deseado por los ingenieros ya que lo que se busca es un diseño equilibrado en costo inicial y costo de mantenimiento. En caso contrario, si el espesor no es el adecuado y es menor al necesario, se requerirá de un mantenimiento más intenso con interrupciones de tráfico que pueden llegar a ser muy costosas, haciendo del proyecto deficiente a pesar de haber logrado que el costo inicial fuera bajo. [8]

Es por esto, que la determinación de los espesores de las capas estructurales tiene una gran importancia, dado que influirá en los costos iniciales y de mantenimiento del pavimento, lo que lleva nuevamente a que el factor de confiabilidad es muy importante si se considera que son los datos de diseño los que definen los espesores finales. Es por eso, que el método AASHTO permite reconocer cuándo es necesario, realizar un estudio de sensibilidad adecuado que lleve a entregar una elección de espesores de diseño equilibrado con un costo inicial relativamente bajo y uno de mantenimiento aceptable. [9]

2.1 DISEÑO MÉTODO AASHTO - 93

El método AASHTO-93, es la actualización del método AASHTO-72 que a su vez tiene su origen en las pruebas de caminos AASHO (AASHO Road Test) entre los años 1958 y 1960 en Ottawa, Illinois [10]. Estas pruebas fueron una de las más completas a escala natural considerando un pavimento asfáltico (flexible) y uno rígido (concreto hidráulico), donde se establecieron correlaciones entre la condición del suelo, el tráfico, el cambio en las condiciones ambientales (drenaje) y la estructura del pavimento propiamente tal

En Chile, para el diseño de pavimentos flexibles se adoptó la versión de AASTHO-93 como método oficial, pero como este es un método empírico basado en ecuaciones desarrolladas a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de Ottawa, Illinois, en Chile se incorporaron modificaciones y complementos a los datos de entrada para ajustar el método a la realidad chilena sin alterar el método propiamente tal [11].

El método de diseño establece una relación entre la cantidad de ejes equivalentes (EE) con el módulo resiliente, el nivel de confianza, la variabilidad y el número estructural de cada capa, tomando en cuenta adicionalmente las pérdidas de serviciabilidad del pavimento a lo largo de su vida útil [10]. Ecuación (2.1) y (2.2).

$$EE = (NE + 25.4)^{0.38} * 10^{(-16.40 + ZR * So)} * M_R^{2.32} * [(p_i - p_f) / (p_i - 1.5)]^{1/\beta} \quad (2.1)$$

$$\beta = 0.40 + [97.81 / (NE + 25.4)]^{5.19} \quad (2.2)$$

Donde:

- EE : Ejes equivalentes de 80 kN (8.16 Ton) de rueda doble.
- NE : Número estructural (mm).
- p_f : Índice de serviciabilidad final del pavimento.
- p_i : Índice de serviciabilidad inicial del pavimento.
- Z_R : Coeficiente estadístico asociado a la confiabilidad.
- S_o : Desviación estándar combinada en la estimación de parámetros.
- M_R : Módulo resiliente de suelo (MPa).

El objetivo de este método es poder establecer los espesores de las capas que conforman el pavimento, estas son: la capa asfáltica, la capa base que puede ser de un material o de diferentes materiales (base granular, base negra: cemento asfáltico) y la capa de subbase.

Para esto es fundamental determinar el número estructural (NE) que le corresponde a cada capa del paquete estructural del pavimento en función con el número de ejes equivalentes [11].

2.1.1 Tránsito

La información del volumen de tráfico es una de las variables más importantes en el diseño de pavimento, ya que permite establecer los ejes equivalentes acumulados para un periodo determinado. Por lo tanto, es fundamental conocer la configuración del volumen del tráfico vehicular (demisiones, pesos, tipos y configuración de ruedas) para determinar el número de ejes equivalentes [12].

El método AASTHO-93 trasforma los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de dos ruedas dobles ya estandarizado con 80 kN (8.16 T) de carga. Para esto se establece el factor de equivalencia que es el cociente entre el número de ejes equivalente requeridos para producir una determinada pérdida de serviciabilidad, en función del número de ejes de determinada configuración y peso, necesaria para producir la misma pérdida de serviciabilidad [11]. Como se observa en la Ecuación 2.3

$$\text{Factor EE} = \frac{\text{Número de ejes de 80kN que causa una determinada perdida de serviciabilidad}}{\text{Número de ejes de X (kN) que causa la misma perdida de serviciabilidad}} \quad (2.3)$$

En consecuencia, para lograr un buen diseño es importante realizar un estudio del volumen de tráfico para determinar los ejes equivalentes acumulados y obtener así un espesor adecuado para el periodo de diseño elegido [8].

2.1.1.1 Información de los Censos de Tráfico

En Chile el Departamento de Estadísticas y Censo de Tránsito de la Dirección de Vialidad, es la institución responsable de censar todos los caminos de la red nacional que están bajo la tuición de la Dirección de la Vialidad con el fin de determinar las informaciones básicas necesarias, para analizar las condiciones de operación de las vías y definir políticas de diseño, construcción, mantenimiento y ampliación/explotación de la red vial [13].

La Dirección de Vialidad, a través de su departamento especializado, censa, ordenada y sistematiza todos los caminos bajo su tuición dentro del programa “Actualización y Levantamiento de Censo de Tránsito de la Red Vial” que se efectúa en los años pares para la zona sur y los años impares para la zona norte [13].

La zona norte que ha censado los años impares (2019- 2021) contempla las Regiones de:

- Región de Arica y Parinacota.
- Región de Tarapacá.
- Región de Antofagasta.
- Región de Atacama.
- Región de Coquimbo.
- Región de Valparaíso.
- Región del Libertador Bernardo O’Higgins
- Región Metropolitana.

La zona Sur que se censó en los años pares (2018 -2020) comprende las siguientes Regiones:

- Región del Maule.
- Región del Bio Bio.
- Región del Ñuble.
- Región de La Araucanía.
- Región de Los Ríos.
- Región de Los Lagos.
- Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.
- Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

A continuación, se describirán brevemente los parámetros que determina la Dirección de Vialidad para el análisis de la red Vial Nacional bajo su tutela.

a) Tránsito Medio Diario (TMDA)

El tránsito medio diario que pasa por cada punto censal se calcula como el promedio aritmético de los valores de las tres muestras censales del año (verano, invierno y primavera). En el caso que falle alguna muestra, el TMDA será la suma de ambas muestras divididas por la cantidad de muestras censadas.

b) Expansión de 12 a 24 horas

El coeficiente de Expansión Diaria (C.E) es la división el tránsito diario (0 - 24 hora) y el tránsito correspondiente en 12 hora (7 -19 hrs). Los valores del tránsito diario se obtienen de la información recogida en las estaciones permanentes (P. Peajes, Equipos), con la ecuación 2.4.

$$C.E. = \frac{T.D}{T.12} \quad (2.4)$$

Donde:

- *C.E*: Coeficiente de Expansión Diaria.
- *T.D*: Tránsito Diario (0 – 24 horas).
- *T12*: Tránsito en 12 horas (7 – 19 horas).

c) Clasificación de Vehículos:

- Autos, station wagons
- Camionetas
- Camiones simples de 2 ejes
- Camiones simples de más de 2 ejes
- Semirremolques
- Remolques
- Locomoción colectiva

Se considera que los jeeps y vehículos similares están agrupados en el tipo autos, station wagons, por otra parte, el tránsito registrado por el tipo de vehículos según cada clasificación corresponde al tránsito en ambos sentidos durante 24 horas.

d) Tasa de crecimiento

Por cada una de las ramas de los puntos censales consideradas se muestra la tasa de crecimiento respecto del censo anterior y se calcula de acuerdo con la ecuación 2.5 :

$$TC = - \sqrt{\frac{TAC}{TAN}} * 100 \quad (2.5)$$

Donde:

- *T.C*: Tasa de Crecimiento
- *TAC*: Tránsito Actual
- *TAN*: Tránsito Anterior

En consecuencia, debido a que el Departamento de Estadísticas y Censo de Tránsito solo se encarga de censar los caminos de la red vial que están bajo la administración pública de la Dirección de Vialidad, por lo cual no presenta registros de la red vial que está bajo la modalidad de caminos concesionados, donde son las concesionarias las que realizan este control.

El Instituto Nacional de Estadística (INE) genera “Boletines de Transporte y Comunicación” que incluye el tráfico de vehículos en las plazas de peaje de la Ruta 68 Santiago – Valparaíso, lo que facilitó, en este caso, en el presente trabajo ya que ello permitió un acceso oportuno a dicha información pues la concesionaria, negó todo acceso a dicha información por considerarla confidencial.

El conocimiento del volumen de tráfico y su composición es una información muy valiosa para el ingeniero civil pues le permite, a partir de un tiempo determinado, estimar la variable más importante para el diseño de un pavimento que es el número de ejes equivalentes (EE). El parámetro de la tasa de crecimiento del tránsito vehicular permite estimar el número de ejes equivalentes para la vida útil a la cual se diseña el pavimento.

2.1.1.2 El Tráfico Inducido

La determinación del volumen de tráfico permite obtener las cargas equivalentes en función de los tipos de vehículo y de un periodo de diseño. Pero en la práctica existe una variable desconocida tanto en magnitud como en su posible desarrollo y crecimiento: el tráfico inducido, componente del tráfico que es muy difícil de estimar porque no se conocen los factores que pueden inducir a los usuarios de otras vías a utilizar una vía mejorada y puesta en servicio [14]. Este volumen desconocido puede generar incrementos en el número de ejes equivalente, y hacer que el diseño no cumpla con lo esperado pues las solicitudes podrían sufrir incrementos importantes sin poder ser cuantificados lo que llevaría en caso extremo a un envejecimiento prematuro del pavimento y a la necesidad de un mayor mantenimiento rutinario y periódico [15].

2.1.1.3 Datos de Crecimiento

En este trabajo, se considerarán dos tramos de la Ruta 68, carretera concesionada que une la Región Metropolitana de Santiago y Valparaíso. En la Tabla 2.1 se presentan los tramos seleccionados y su ubicación en la Ruta 68.

La Ruta 68 está concesionada y, por ende, no está en la base de datos que maneja la Dirección de Vialidad, pero el Instituto Nacional Estadísticas (INE) dispone de un conteo de tipos de vehículos que cruzan ciertos pódicos de la Ruta 68 que publican en sus “Boletines de Transporte y Comunicación”, de donde se extraerán los datos del tránsito vehicular necesarios para la presente investigación. Además, se obtuvo del INE un resumen del tráfico de las plazas de peaje mencionadas en la Tabla 2.1 del año 2015 al 2019.

Tabla 2.1: Tramo seleccionados y Ubicación

Tramo	Plaza de Peaje	Ubicación [Km]
1	Plaza de Peaje Troncal Zapata	59300
2	Plaza de Peaje lo Prado	17900

Fuente: Propia

Y la clasificación de los vehículos que se manejaban en los boletines es:

- Motos
- Autos
- Camionetas
- Camión
- Buses de Dos Ejes
- Buses con más de Tres Ejes
- Camión con Dos Ejes
- Camión con más de Tres Ejes

Por otra parte, los detalles del volumen vehicular y las caracterizaciones de los tramos se verán con más en profundidad en el Capítulo 3: Tramos de Estudio de este trabajo.

2.1.2 Serviciabilidad

2.1.2.1 Aspectos Generales

La serviciabilidad, es la condición necesaria para proveer a los usuarios una conducción segura y confortable, por lo cual el pavimento debe tener la habilidad de servir al tráfico para el cual fue diseñado. La ecuación de diseño establece un estado de serviciabilidad inicial (p_o) y un estado final (p_f), donde el estado inicial de serviciabilidad la cual, dependerá de la tecnología disponible para la construcción del pavimento, mientras que el índice de serviciabilidad final considera el deterioro y/o los inconvenientes para transitar por el pavimento al final de la vida útil del mismo [11].

En la Tabla 2.2 se presenta los valores recomendados sobre la base de la experiencia chilena para los índices de serviciabilidad propuestos en el Manual de Carreteras del MOP [11].

Tabla 2.2: Índice de Serviciabilidad recomendados por el MOP [11].

Índice de Serviciabilidad Inicial (p_o)	4,2
Índice de Serviciabilidad Final (p_f)	2,0

Por otra parte, el cambio o pérdida en la calidad del servicio que proporciona la carretera al usuario se define con la ecuación 2.6:

$$\Delta PSI = p_o - p_f \quad (2.6)$$

Donde:

- ΔPSI : Diferencia entre los índices de servicio inicial u original y el índice de servicio final o terminal esperado
- p_o : Índice de serviciabilidad inicial
- p_f : Índice de serviciabilidad final

Para el índice de serviciabilidad inicial, el valor correspondiente a un pavimento flexible recién construido o rehabilitado generalmente es igual a 4,2 e igual a 4,5 para un pavimento rígido. En tanto que para el valor del índice de servicio terminal el valor mínimo para caminos de baja importancia es igual a 1,5, y para vías principales o arterias fundamentales puede variar entre 2,5 y 3,0 [11].

2.1.2.2 Limitaciones de los Métodos para la Determinación de la Serviciabilidad

En las pruebas realizadas en el tramo de prueba de la AASHO para determinar los índices de serviciabilidad, se realizaron inspecciones rutinarias de cada sección a cargo de un panel de evaluadores que debían llenar un formulario diseñado para este efecto. El formulario de calificación que se utilizó se muestra en la Figura 2.2. La escala utilizada en el formulario era del cero a cinco y buscaba cuantificar la condición del pavimento. Cabe señalar que esta escala de clasificación es el único parámetro de rendimiento que se utiliza en el procedimiento de diseño de espesores [7], [16].

Acceptable ?

Yes

No

Undecided

5
4 Very Good
3 Good
2 Fair
1 Poor
0 Very Poor

Section Identification _____ Rating _____

Rater _____ Date _____ Time _____ Vehicle _____

Figura 2.2: Formulario de calificación de la capacidad de servicio de la prueba de carretera de AASHO [16].

Con estos datos, los investigadores obtuvieron una clasificación promedio y la compararon con la cantidad de tráfico que solicitó cada sección del tramo de prueba, con el objetivo de construir una curva de historia de desempeño como se muestra en la Figura 2.3 .

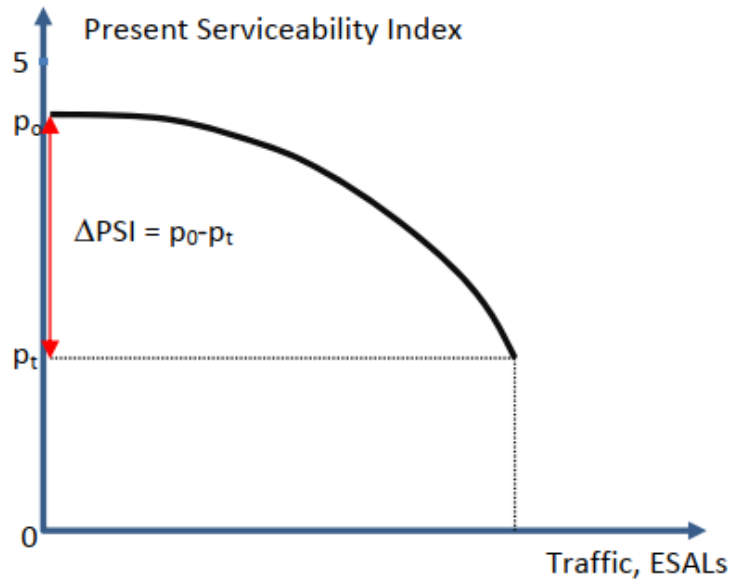


Figura 2.3 :Historial de Rendimiento del Pavimento [16].

Es por esto que el valor de serviciabilidad está limitado a las condiciones de prueba de la carretera original (Ottawa, Illinois), a pesar de que, actualmente, se han desarrollado otros procedimientos para estimar su valor de manera más representativa como a través de la medición de la rugosidad del pavimento [7].

2.1.3 Parámetros Dependientes de la Experiencia del Diseñador

2.1.3.1 Confianza

El concepto de confianza (R), fue incorporado en la guía de diseño AASHTO-86, donde se explica como la probabilidad de que el sistema estructural que forma el pavimento cumpla su función satisfactoriamente durante su vida útil o periodo de diseño, teniendo en cuenta que el pavimento tiene que resistir las condiciones del tráfico y de medio ambiente en el periodo de diseño. Es por esto que la confianza está asociada a las de fallas que puedan presentarse en el pavimento [7].

Actualmente, en el método AASTHO para la estructura de pavimento flexible, se recomienda valores desde 50 hasta 99.9 para el parámetro de confianza simbolizado por (R) como se muestra en a la Tabla 2.3, donde existen diferentes clasificaciones de funcionamiento, en el cual los niveles más altos corresponden a obras sujetas a un intenso tráfico, mientras que los niveles más bajos corresponden a caminos locales o secundarios [11]. En otras palabras, los caminos más importantes reciben un parámetro de confianza (R) más alto pues necesitan para su éxito mejores y más representativos datos de tráfico y laboratorio.

Tabla 2.3: Nivel recomendados de confiabilidad (R) [11].

Nivel de Confiabilidad (R %)	
Clasificación Funcional	Nivel recomendado por AASTHO para carreteras
Carretera Interestatal o Autopista	80 - 99.9
Red Principal o Federal	75 - 95
Red Secundaria o Estatal	75 - 95
Red Rural o Local	50 - 80

2.1.3.2 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que el número de repeticiones de carga que un pavimento puede soportar para alcanzar un determinado nivel de servicio y capacidad no sea excedido por el nivel de carga realmente aplicado sobre el pavimento [7], [11].

En la Tabla 2.4 se representa los valores de Z_R que dependen únicamente del nivel de confianza que se adopte para el diseño.

Tabla 2.4: Valores de Z_R para diversos grados de confianza [11].

Nivel de Confianza R [%]	Factor de Confiabilidad Z_R
50	0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
95	-1,645
99	-2,327

2.1.3.3 Desviación Estándar del Sistema (S_0)

Este parámetro representa las variaciones de las condiciones locales, donde se considera la influencia de las variaciones en la calidad de los materiales, del proceso constructivo elegido para el pavimento que se diseña, la posibilidad de variaciones en la predicción del tráfico a lo largo del periodo de diseño y durante la construcción de este. Finalmente, las probables variaciones que puede presentar un pavimento para el número ejes equivalentes (EE) acumuladas en el periodo de diseño [11][7].

A modo de ayuda para la elección del valor de la desviación estándar, la AASHTO-93 recomienda adoptar los valores presentados en la Tabla 2.5 [7].

Tabla 2.5: Valores para el error estándar combinado S_o [17]

Condición de Diseño	Desviación Estándar (S_o)	
	Pav. Rígido	Pav. Flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito	0,34	0,44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0,39	0,49

Una vez más, se puede apreciar que el método AASHTO-93 considera indirectamente la importancia de la confiabilidad de los datos de diseño, que por su naturaleza están acompañados de un cierto grado de incertidumbre que afecta directamente al diseño, del paquete estructural del pavimento y, en consecuencia, a los espesores de las capas estructurales. Esta incertidumbre lleva en muchos casos a diseños conservadores que alcanzan costos elevados y, en especial, en carreteras concesionadas donde el concesionario trata de reducir a un mínimo los costos de inversión a fin de maximizar sus utilidades y ganancias.

2.1.3.4 Comentario sobre los valores de Confianza, Confiabilidad y Desviación Estándar del Sistema.

La relación entre los tres parámetros mencionados anteriormente queda expresada por las ecuaciones 2.7 y 2.8 que propone el método AASTHO-93. Donde el factor de confiabilidad (F_R) se determina en función de la confiabilidad (Z_R) que penderá del directamente del nivel de confianza y de la desviación estándar del sistema (S_o) que se adopte en el diseño [11].

$$\log F_R = -Z_R * S_o \quad (2.7)$$

$$F_R = 10^{-Z_R * S_o} \quad (2.8)$$

La relevancia de conocer el valor de F_R radica en la necesidad de poder determinar la magnitud del estado de carga total (EE) que se alcanzará durante la vida útil del pavimento, y que será utilizado como dato de entrada en la ecuación de diseño del método. Ver ecuación (2.1).

Este hecho lleva a determinar un nivel de confianza (R) al que se asociará un factor de confiabilidad (Z_R) considerando una distribución normal. Por otra parte, los valores

recomendados por la AASHTO-93 para la desviación estándar se resumen en la Tabla 2.5 [11].

Además, se debe considerar que, en un caso como el de la Ruta 68 (concesionada) se busca optimizar los espesores de las capas estructurales de tal manera, que el costo inicial sea el menor y los costos de mantenimiento rutinario y periódico reducidos [7].

En otras palabras, se debe lograr un equilibrio entre costo de construcción y costo de mantenimiento para [17], poder definir, las tasas de peaje necesarias para garantizar una operación satisfactoria de la vía (incluyendo las tareas de mantenimiento rutinario y periódico), la recuperación de la inversión, la cobertura de los costos administrativos y una utilidad razonable para la concesionaria.

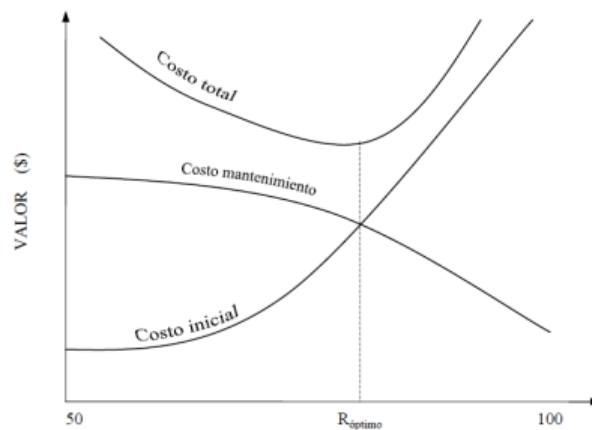


Figura 2.4: Nivel óptima de confiabilidad [17].

Las curvas de la Figura 2.4 muestran el equilibrio mencionado y se pueden obtener con un análisis de sensibilidad que, normalmente realizan las concesionarias antes de hacer sus ofertas al estado y también se puede decir que son muy comunes en el caso de una administración directa de alguna vía por las direcciones de vialidad de los diferentes países incluyendo a Chile [17]

2.1.4 Módulo Resiliente Efectivo (M_R)

2.1.4.1 Aspectos Generales

En la guía de diseño de la AASTHO-93, el módulo de resiliente (M_R) reemplaza al CBR como variable de diseño y para caracterizar los materiales de la subrasante, subbase y base [18]. En método AASHTO utilizan los valores medios resultantes en los ensayos de

laboratorio, asumiendo que las diferencias presentadas están consideradas en el nivel de confiabilidad (R) [19]

Al respecto se debe decir que en normalmente Chile no se determina directamente el módulo resiliente debido, a la falta de equipos adecuados para realizar ensayos y se recurre a relaciones empírico-teóricas que proporciona el Manual de Carreteras del MOP deducidas sobre la base de publicaciones internacionales y la experiencia chilena en este campo. Dichas relaciones permiten, que en función de los valores del CBR, estimar la magnitud del módulo resiliente requerido de acuerdo con el tipo de suelo y/o material considerado [20].

Cabe señalar, que los resultados de los ensayos de laboratorio son una función de la calidad de las muestras tomadas, de la naturaleza de los suelos involucrados y, de forma muy importante, de la experiencia y capacidad de los laboratorios a cargo de las investigaciones. Entonces, si las muestras no son representativas (cantidad y calidad) de los suelos en sitio, si los encargados de los ensayos no poseen una vasta y amplia experiencia, y si el equipamiento del laboratorio no es el más adecuado, los resultados estarán acompañados por una incertidumbre que perjudicará la confiabilidad y por ende al diseño del pavimento [20].

2.1.4.2 Procedimientos para la Determinación del Módulo Resiliente

Considerando que el método AASHTO-93 requiere la determinación de un módulo Resiliente Efectivo (MR), es necesario describir brevemente los posibles procedimientos para determinar un valor aproximado de este parámetro y se puede decir, en general, que se tienen tres procedimientos que pueden llevar a su determinación, uno directo y dos indirectos.

Procedimiento 1: realizar en laboratorio varios ensayos para la determinación del módulo resiliente considerando variaciones en el contenido de agua o humedad que reflejen aproximadamente las humedades estacionales de la zona del proyecto. Con estos valores y el nivel de daño que podría sufrir el pavimento luego, utilizando el procedimiento del método se determina el módulo resiliente [19]

Procedimiento 2: realizar mediciones de deflectometría en la carretera a ser mejorada, solo si es el caso ya que este procedimiento se aplica a pavimentos existente para los cuales se debe diseñar un refuerzo o una reconstrucción total. En este método indirecto, estima los valores de módulo resiliente a partir de correlaciones entre las mediciones de deflexión del pavimento [7].

Procedimiento 3: realizar ensayos de CBR en laboratorio considerando las condiciones de humedad más desfavorables para las muestras, condiciones que están orientadas a emular la influencia de las lluvias sobre la resistencia de las capas del pavimento en la zona del proyecto. Luego, con dichos valores se utilizan las relaciones empírico-teóricas del Manual de Carreteras del MOP y se determina el valor aproximado del módulo resiliente[20].

La experiencia chilena muestra que el procedimiento más utilizado hasta la fecha es el tercero, tanto para carreteras nuevas como para el mejoramiento de vías existentes

pavimentadas debido a la falta de equipos adecuados para la determinación del módulo resiliente. Entonces, lo más común en Chile, es determinar el CBR y, mediante relaciones empírico-teóricas para calcular el valor más aproximado del módulo resiliente recurriendo a las relaciones propuestas y recomendadas por el Manual de Carreteras del MOP [20].

Como se puede deducir, este procedimiento incorpora una incertidumbre difícil de cuantificar, que normalmente se soluciona aplicando un mayor nivel confiabilidad y en consecuencia mayores espesores de las capas estructurales del pavimento.

2.1.4.3 Comentarios sobre la Influencia del Módulo Resiliente y del CBR en el Diseño de Pavimentos

Haciendo un análisis a los procedimientos de determinación de estos dos parámetros, es decir, del módulo resiliente y del CBR, se puede decir que ambos presentan una incidencia del factor humano y del equipamiento de laboratorio muy importante ya que, en ambos casos la disponibilidad de muestras adecuadas, de equipos bien calibrados y apropiados, y la experiencia de los técnicos de laboratorio, llevará a valores representativos de estos parámetros [14], [20].

Por otra parte, la medición del módulo de resiliencia es susceptible a las variaciones del contenido de humedad, que produce alteraciones en la resistencia de los suelos, que además no presentan un único valor, sino que hay un número infinito de valores dependiendo de las condiciones de la prueba. Por lo tanto, una de las dificultades de obtener el módulo de resiliencia, es que simule las condiciones de humedad en el transcurso del año [19], [21]

Finalmente, se debe considerar que estos parámetros afectan a otras variables de diseño que a su vez inciden en los espesores de los coeficientes y el número estructurales, variables que determina los espesores de las capas estructurales de un pavimento flexible

Y, como ya se mencionó anteriormente, una mala determinación de espesores se traducirá en una vida útil más corta o con mayores espesores para garantizar una buena serviciabilidad del pavimento, en ambos casos los costos finales de operación de la carretera serán los más afectados por estos costos iniciales y de mantenimiento.

2.1.5 Coeficiente Estructural (a_i) y su Determinación

El coeficiente estructural o coeficiente de capas (a_i) está en función de los parámetros de resistencia y deformabilidad de los materiales que constituyen las diferentes capas que componen la estructura de un pavimento flexible y, en consecuencia, sirven para desarrollar el diseño del paquete estructural del pavimento correspondiente [7]

Para determinar los valores de los coeficientes estructurales, la AASHTO-93 presenta, en su guía de diseño un método gráfico basados en una serie de ábacos identificados con cada capa en particular [18].

2.1.6 Drenaje

Una de las variables meteorológicas que tiene una gran influencia en las propiedades de los materiales que constituye el paquete estructural es la humedad. Es por esto, que con el fin de reducir o eliminar el agua del pavimento, el método AASTHO - 86 incorpora un coeficiente de drenaje (m_i) en la ecuación de diseño que afectan a la base y subbase [18].

De esta manera, método permite la inmersión completa de la base y la subbase. Sin embargo, se debe tener en cuenta que muchas veces la falla de un pavimento se inicia en la subrasante la cual si se satura puede perder parte de su resistencia a los esfuerzos de corte e incrementar su deformabilidad, llegando en casos extremos a procesos de expansión que desplazan a las capas superiores deformando el pavimento [18].

2.1.6.1 Calidad de la Información Meteorológica

El diseño adecuado, el desempeño esperado y el mantenimiento de un pavimento dependen de las informaciones meteorológicas cuya calidad debe ser no sólo representativa de la zona del proyecto sino también confiable y completa [11].

Las variables meteorológicas de mayor relevancia en el desempeño del pavimento es la temperatura, la humedad y las precipitaciones pluviales (incluyendo nieve, granizo, escarcha) por lo cual al momento de iniciar un estudio de diseño de pavimentos se tienen que recabar esas informaciones de fuentes confiables, pues una mala información se reflejará en un mal desempeño del pavimento en el sistema de drenaje [14].

Entonces, los registros de precipitaciones, flujo subterráneo y de temperatura (registros de máximas y mínimas) permitir al diseñador contar con datos que le den la posibilidad de elegir así condiciones más desfavorables para el proyecto y conseguir un diseño razonable [11].

2.1.6.2 Elección del Coeficiente de Drenaje y su Importancia

El coeficiente de drenaje (m_i) depende de la capacidad de drenaje de la zona de proyecto que definirá el tiempo que necesite el pavimento para evacuar el agua acumulada y el tiempo durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación en el transcurso de un año [8].

En la Tabla 2.6 se indican, cinco categorías de calidad del drenaje de la base, en función del tiempo que demora la evacuación del 50% del agua de saturación [11].

Tabla 2.6: Capacidad del drenaje para remover la humedad [11].

Calidad del Drenaje	Tiempo en que tarde el agua en ser Evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	El agua no drena

En la Tabla 2.7 muestra los coeficientes de drenaje recomendados por el Manual de Carretes para el país según la región.

Tabla 2.7: Coeficientes de drenaje (mi) [11]

REGIÓN	Precipitación	Base Permeable	Base: Finos hasta 10%		Base: más 10% fino	
			Subras. Gran.	Subras. Finos.	Subras. Gran.	Subras. Finos.
IV	≤ 100mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,05
	> 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,05 - 0,80
V a IV	≤ 150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,00
	> 150mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
VII a IX	≤ 350 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,00	0,80
	> 350 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00 - 0,80	0,80
X	≤ 1.500 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,15	1,00 - 0,80	0,80 - 0,60
	> 1.500 mm	1,40 - 1,30	1,15 - 1,20	1,15 - 1,00	0,80	0,60
XI a XII	≤ 500 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
	> 500 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,15	0,80	0,80

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

2.1.7 Número Estructural

2.1.7.1 Consideraciones Generales

El diseño de pavimento flexibles por el método AASHTO busca identificar el número estructural (NE) para un estructural de pavimento, que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para poder determinar el número estructural se define la ecuación (2.9), que relaciona los coeficientes estructurales y de drenaje con los espesores de cada capa de la estructura [18]

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_iD_im_i \quad (2.9)$$

Donde:

- SN : Número estructural

- a_i : Coeficiente estructural de la capa i

- D_i : Espesor en cm, asociado al coeficiente estructural a_i

- m_i : Coeficiente de drenaje de la capa i

La determinación del número estructural se puede lograr resolviendo a la ecuación empírica de diseño desarrollado por el método, empleando un programa computacional o utilizando los diagramas y ábacos de la guía de diseño de la AASHTO-93.

Este proceso no entrega un resultado único y existen infinitas soluciones que satisfacen la ecuación (2.9), en donde se deben tener en cuenta criterios de espesores mínimos para la protección y estabilidad de las capas, además costo de los materiales (menores espesores en materiales de alto costo y mayores espesores en los de bajo costo) entre otros criterios [18].

2.1.7.2 Factores que Influyen en la magnitud del Número Estructural y de los espesores de las Capas Estructurales

Los factores que más influencia tienen sobre la magnitud del número estructural son los siguientes [18]:

1. Las propiedades de resistencia al corte y deformabilidad de los materiales que constituirán las capas estructurales del pavimento
2. El número de ejes equivalentes
3. El rango de serviciabilidad (inicial y final)
4. La confiabilidad
5. Las condiciones de drenaje

Como se puede apreciar son variados los factores que influyen en el valor del número estructural de un pavimento y son variables que, normalmente, están acompañadas de un cierto grado de incertidumbre que debe ser cubierto por la confiabilidad.

Ahora bien, para la determinación del espesor de las capas, normalmente se parte de un espesor mínimo inicial para la capa más resistente y de mayor costo. Luego en función del costo y método constructivo se van fijando los demás espesores hasta alcanzar a cubrir totalmente el valor del número estructural o superarlo ligeramente con la suma de los espesores independientes [18], [22].

Con el uso de un software esta tarea se hace más sencilla pues es suficiente con cambiar un espesor y redistribuir los demás para lograr un diseño adecuado.

3 TRAMOS DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron dos tramos de la Ruta 68, por ser una de las vías de mayor tráfico en la Quinta Región y donde se tienen condiciones muy variables tanto de tipo de vehículos como de suelos. En este caso debido a la limitación en la posibilidad de obtener datos de laboratorio al haberse negado la concesionaria a proporcionarlos por considerarlos información confidencial de la misma manera que con los datos de tráfico se tuvo que recurrir a otras fuentes de información para poder desarrollar los análisis correspondientes a esta memoria.

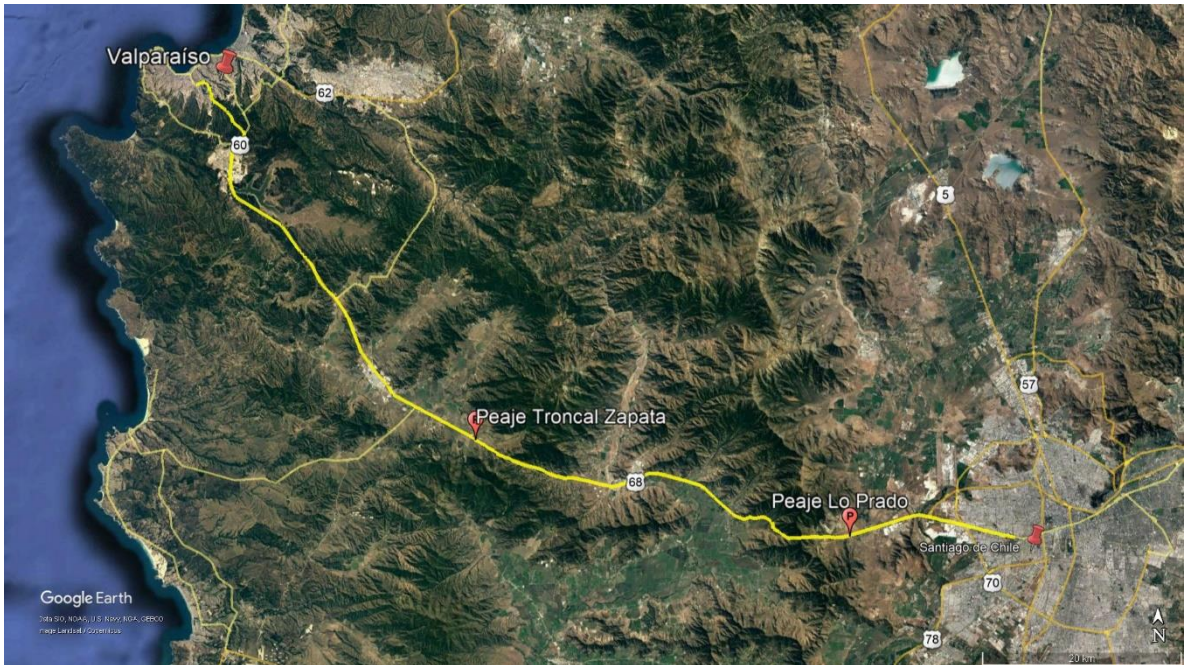


Figura 3.1: Imagen Satelital de la Ruta 68, Google Earth.

Por ese motivo, una vez elegidos los tramos se procedió a obtener información del INE sobre la composición y volumen de tráfico de la vía [23], para posteriormente realizar la verificación del diseño del paquete estructural existente (mencionados en el punto 3.3.1) y al mismo tiempo establecer una metodología y frecuencia de mantenimiento que permitan alcanzar un nivel tal que se haga posible la determinación aproximada de las tasas de peaje considerando impuestos, reposición de la inversión y utilidades de la concesionaria.

3.1 UBICACIÓN

Los tramos de carretera elegidos corresponden a los dos tramos de la Ruta 68 más conocida como el camino a Valparaíso que une la Región Metropolitana con el Litoral Central. El primer tramo corresponde al tramo administrado por la Plaza de peajes troncal Zapata y el otro al administrado por la Plaza de peajes Lo Prado. Estas plazas de peajes están presentes en el camino interurbano más importante que tiene actualmente Chile con una extensión aproximada de 110 km aproximadamente.

Para los análisis de este trabajo se utilizarán los datos del flujo del tráfico de ambas plazas de peaje proporcionados por el INE que los determinó mediante conteo vehicular en dos portales de ambas plazas. Con este volumen de tráfico y su composición se procederá a [23]estimar el volumen de tráfico aproximado que se le solicitará a la carretera al final de su vida útil y a determinar las necesidades de mantenimiento periódico y rutinario de la vía asfaltada.

A continuación, se presentan las plazas de peajes donde el INE determinó el volumen de tráfico de cada caso y su composición aproximada, datos que permitirán determinar el número de ejes equivalentes para, luego, proceder con los análisis respectivos.

3.1.1 Tramo 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata

En la Figura 3.2 se presenta una imagen satelital del Peaje Troncal Zapata que se encuentra a 63.5 km de Santiago.

Los datos otorgados por el INE de esta plaza de peajes se presentan en el Anexo I [23]



Figura 3.2: Imagen satelital del Peaje Troncal Zapata, Google Earth.

3.1.2 Tramo 2: Plaza de Peajes Lo Prado

En la Figura 3.3 se presenta una imagen satelital de la plaza de peajes Lo Prado que es el primer peaje al salir de Santiago que se encuentra a 22.1 km aproximadamente.

Los datos otorgados por el INE de esta plaza de peajes se presentan en el Anexo I [23].



Figura 3.3: Imagen Satelital del Peaje Lo Prado, Google Earth.

3.2 ANÁLISIS DEL TRÁFICO

3.2.1 Tránsito Equivalente

Con el método AASHTO-93 los pavimentos se diseñan para resistir un tráfico equivalente expresado en función de ejes equivalente simples cuya magnitud se estima considerando los diferentes tipos de vehículos, su peso o carga por eje, el número y tipo de ejes (simples, tándem y tridiem) mediante hipótesis de equivalencia adecuados al método [18].

En él se proyectan pavimentos que deben resistir un número de carga durante su vida útil. Es por esto que la caracterización del tránsito es fundamental para saber qué tipo de vehículos circulan, así como el peso y el número de ejes que los vehículos poseen [18].

En el método considera con factores de especiales conversión, tales como el factor camión y los factores de equivalencia entre ejes múltiples (2 y 3) con el eje simple de referencia, todos deducidos sobre la base del daño relativo que inducen los diferentes sistemas de ejes en el pavimento [11]

Entonces se deja establecido que todos los análisis se realizarán sobre dicha base, es decir, considerando el número total de ejes equivalentes que representa el volumen total del tráfico vehicular con su compleja composición, es decir, las diferentes configuraciones de

ejes y cargas son representadas por un número de pasadas de un eje simple patrón de rueda doble de 18 kip (80kN) que da una variable denominada como ESAL (o EE) , que en significa “ carga de ejes equivalentes simple” [11].

3.2.2 Factor de Equivalencia de Carga

El factor de equivalencia de cargas representa la pérdida de serviciabilidad ocasionada por la carga de un determinado tipo (configuración) de ejes y aquella producida por el eje simple patrón de 18 kip [24].

En el Manual de Carreteras Volumen N°3 se presenta en las tablas 3.603.202 A1/A2/A3 los factores de equivalencia de carga (factor EE) para distintos tipos (configuraciones) de ejes, distintos tipos de pavimentos y una distinta serviciabilidad final considerando la experiencia chilena en el diseño y construcción de pavimentos.

3.2.3 Factor de Camión

El factor camión (FC) se determina con la ecuación 3.1, y es un factor que describe el daño ocasionado por el paso de vehículos pesados sobre un pavimento y está en función del número de ejes equivalentes (EE) y el número de camiones. Entonces la idea del factor camión se explica, por ejemplo, que un vehículo pesado que tenga un FC igual a 3 implica que el daño producido por una pasada de este vehículo equivale al daño de 3 pasadas de un Eje simple patrón de 18 kip [24].

El factor camión se debe, rigurosamente hablando, determinar para cada tipo de camión o vehículo como un promedio de una determinada configuración de tráfico [24].

$$Factor\ Camión\ (FC) = \sum Factor\ EE \quad (3.1)$$

El Manual de Carreteras del MOP propone un factor camión en función del tipo de pavimento (rígido o flexible), del tipo de vehículo pesado a considerar, del sentido de tránsito de la pista, y del índice de serviciabilidad final.

En la Tabla 3.1 se presenta, a modo ilustrativo, una parte de la tabla 3.603.202 C “Ejes Equivalentes por Vehículo” del Manual de Carreteras Volumen N°3 que se utilizó para el cálculo de ejes equivalentes (EE) en este estudio.

Tabla 3.1: Factor Camión propuesto por el Manual de Carreteras Vol. 3 de la Ruta 68 [11].

Ejes Equivalentes por Vehículo							
Pavimento Flexible							
Plaza Localización	Pista	Camión Simple		Camión Múltiple		Bus	
		pf =2,0	pf=2,5	pf =2,0	pf=2,5	pf =2,0	pf=2,5
Curacaví Ruta 68	12	0,3	0,3	1,6	1,53	2,03	1,95
	32	0,3	0,3	1,45	1,39	2,11	1,75

Donde:

-Pista 12: Pista o pistas con tránsito alejándose de Santiago.

-Pista 32: Pista o pistas con tránsito acercándose de Santiago.

3.2.4 Número Total de Ejes Equivalentes

En este trabajo, método simplificado para el cálculo de los ejes equivalentes se utilizará la ecuación (3.2) Este método utiliza un factor camión promedio (Tabla 3.1) en lugar de un factor camión para cada tipo de vehículo.

$$EE = 365 \times F_D F_p F_{EE} F_{ci} \sum_{i=1}^n TMDA_i \quad (3.2)$$

Donde:

- EE : Ejes Equivalentes Totales.
- F_D : Factor de Distribución o Sentido.
- F_p : Factor de Pista.
- F_{EE} : Factor de Ejes Equivalentes para un vehículo tipo.
- F_{ci} : Tasa de crecimiento en el periodo "i".
- $TMDA_i$: Tránsito Medio Diario Anual Acumulado.

Para este cálculo se utilizarán los datos de volumen del tráfico proporcionados por el INE de las plazas de peajes mencionadas anteriormente. Todos los datos utilizados en este trabajo se han concentrado, ordenado y agrupado en el Anexo I.

Con dichos valores se calculó el tránsito medio diario Anual (TMDA), adicionalmente se estableció el sentido de las pistas y el coeficiente de equivalencia para lograr la determinación del número de ejes equivalentes que represente a la configuración del tráfico vehicular ver Tabla 3.1 de cada plaza de peajes. Además, los valores considerados para los factores de Dirección y Pista fueron de 0,8 y 0,5 respectivamente [25].

Cabe aclarar que se solo se cuenta con datos de los años del 2015 al 2018, y que se descartaron los datos del año 2019, debido a que dicho período no corresponde a un año normal con respecto al flujo vehicular por el comienzo de la pandemia del Covid-19 y las diferentes cuarentenas decretadas por el Ministerio de Salud.

Tabla 3.2 :Cálculo del Tráfico Medio Diario Anual (TMDA), para cada plaza de peajes en dirección hacia Santiago.

PLAZA DE PEAJE TRONCAL ZAPATA													
Tipo de Vehículo	Tipo de Ejes	Tipo de Rodadura	TMDA 2015	Carga del vehículo por eje	Pista	Factor equivalente FC	TMDAxFC 2015	TMDA 2016	Factor equivalente FC 2016	TMDA 2017	Factor equivalente FC 2017	TMDA 2018	Factor equivalente FC 2018
Auto- Camionetaonesta - Moto	Doble	Simple	161	7	12	0,3	48	189	57	218	65	160	48
						0,3	48		57		65	48	
BusDosEjes	Doble	Doble y Simple	680	16	12	2,3	1.563	739	1.701	739	1.700	754	1.734
						2,1	1.434		1.560		1.560	1.734	
BusdeTresEjes	Triple	Doble	209	25	12	2,3	480	195	447	215	495	227	522
						2,1	440		410		454	522	
Camion	Doble	Simple	14.882	7	12	0,3	4.465	16.082	4.825	16.543	4.963	17.213	5.164
						0,3	4.465		4.825		4.963	5.164	
CamionDosEjes	Doble	Doble	950	18	12	1,6	1.520	1.008	1.612	985	1.576	940	1.504
						1,5	1.378		1.461		1.428	1.504	
CamionMasdeTresEjes	Triple	Doble, doble y simple	1.235	23	12	1,6	1.976	1.253	2.004	1.428	2.285	1.411	2.257
						1,5	1.791		1.816		2.071	2.257	

PLAZA DE PEAJE LO PRADO													
Tipo de Vehículo	Tipo de Ejes	Tipo de Rodadura	TMDA 2015	Carga del vehículo por eje	Pista	Factor equivalente FC	TMDAxFC 2015	TMDA 2016	Factor equivalente FC 2016	TMDA 2017	Factor equivalente FC 2017	TMDA 2018	Factor equivalente FC 2018
Auto- Camionetaonesta - Moto	Simple	Simple Simple	193	7	12	0,3	58	247	74	286	86	228	68
						0,3	58		74		86	68	
BusDosEjes	Doble	Doble y Simple	913	16	12	2,3	2.101	971	2.233	994	2.287	971	2.234
						2,1	1.927		2.049		2.098	2.234	
BusTresMasEjes	Triple	Doble, Doble , simple	203	25	12	2,3	467	203	467	211	485	214	492
						2,1	429		429		445	492	
Camion	Simple	Simple	17.527	7	12	0,3	5.258	18.756	5.627	19.386	5.816	20.059	6.018
						0,3	5.258		5.627		5.816	6.018	
CamionDosEjes	Doble	Doble simple	1.091	18	12	1,6	1.746	1.154	1.846	1.118	1.789	1.087	1.738
						1,5	1.583		1.673		1.621	1.738	
CamionTresMasEjes	Triple	Doble, doble y simple	1.270	23	12	1,6	2.031	1.282	2.051	1.475	2.361	1.401	2.241
						1,5	1.841		1.859		2.139	2.241	

Fuente: Propia

Los resultados del tráfico medio diario anual con su respectiva configuración del tráfico y factor camión asociado se presentan en la Tabla 3.2.

Con estos cálculos se puede determinar el número de ejes equivalentes para cada año del periodo del 2015 al año 2018. Donde se consideró el facto de dirección 0,8 y de pista 0,5 [25].

En las Tablas 3.4 y 3.5 se presentan los resultados de los ejes equivalentes para cada año para ambas plazas de estudio (Plaza de peajes troncal Zapata y Lo Prado).

Tabla 3.4: Ejes Equivalentes del año 2015 al 2018 para la Plaza de peajes Troncal Zapata.

Años	Ejes Equivalentes (EE)
2015	1.467.658
2016	1.554.319
2017	1.618.315
2018	1.639.372

Tabla 3.4: Ejes Equivalentes del año 2015 al 2018, para la Plaza de peajes Lo Prado.

Años	Ejes Equivalentes (EE)
2015	1.702.575
2016	1.795.611
2017	1.872.171
2018	1.867.566

Fuente: Propia

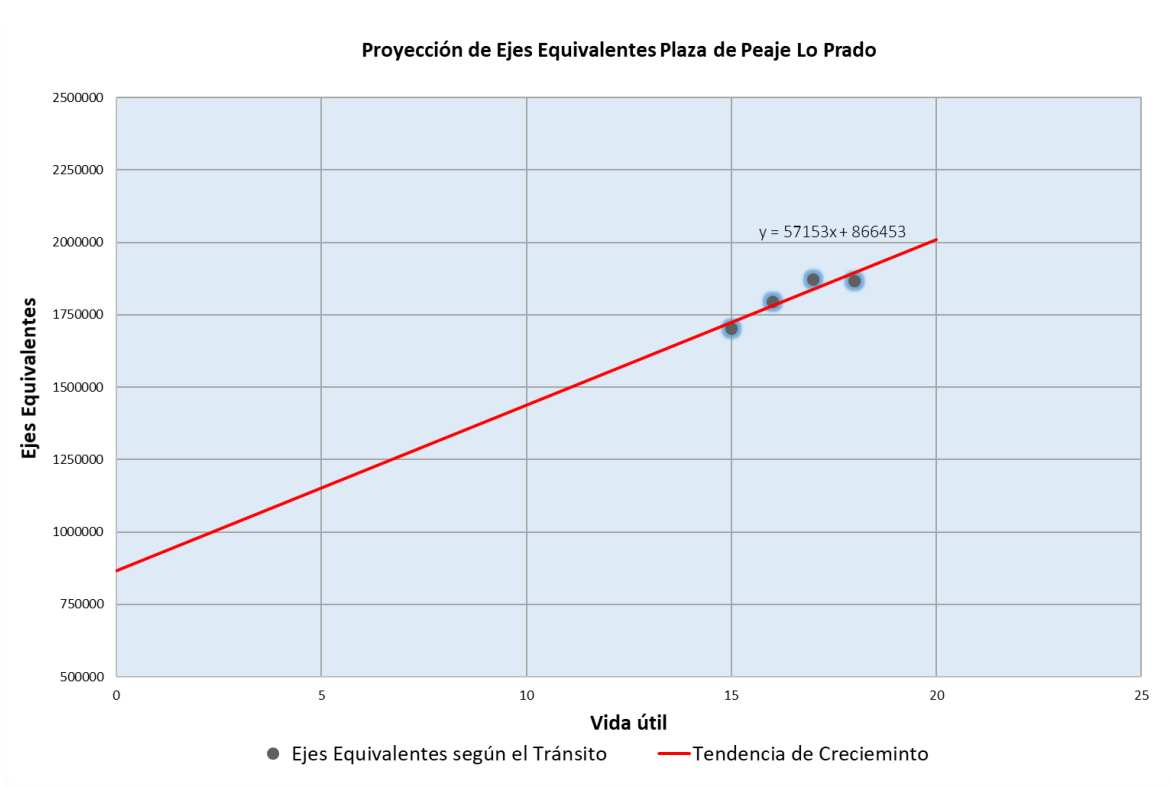


Figura 3.4: Proyección de Ejes Equivalentes de la Plaza Peajes Lo Prado.

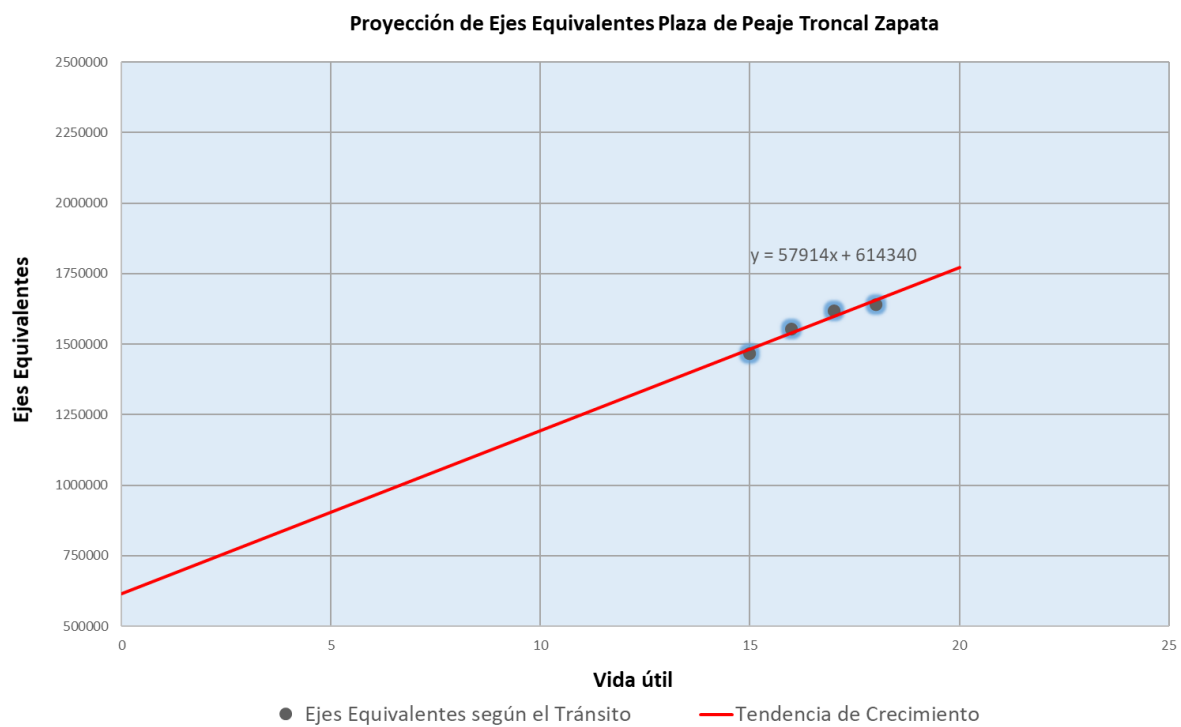


Figura 3.4: Proyección de Ejes Equivalentes de la Plaza de peajes Trocal Zapata.

Estos valores, permitieron realizar una proyección de datos anteriores adelante con el objetivo de estimar aproximadamente del volumen de tráfico inicial de diseño y del volumen de tráfico final (con un total de 20 años). Con este cálculo se logró determinar el volumen de tráfico probable de los años sin información, lo que hizo posible finalizar la investigación a pesar de las limitaciones de información. Este cálculo se presenta en forma gráfica en las Figuras 3.4 y 3.5.

Las dos proyecciones de los datos realizadas mediante una regresión lineal dieron coeficientes de correlación de 0,93 y 0,86 para la Plaza de peajes Troncal Zapata y la Plaza de peajes Lo Prado respectivamente, valores que permiten asumir que el comportamiento de las proyecciones representa una buena estimación, por lo cual se asumió que los análisis y diseños posteriores tendrán una buena base de información sobre el volumen de tráfico de cada año y así poder determinar la influencia del grado de confianza en los diseños de pavimentos de los dos tramos que podría justificar las tasas de peaje o indicar una modificación de las mismas.

En las Tablas 3.5 y 3.6 se presentan los resultados obtenidos de los ejes equivalentes y los ejes equivalentes acumulados para el periodo del 2000 al 2020 para ambos tramos de estudio dejando en claro que son valores determinados sobre una base de datos muy reducida ya que obtener una mayor información fue imposible.

Tabla 3.5: Ejes Equivalentes y Ejes Equivalentes Acumulados para la Plaza de peajes Troncal Zapata.

Año	Ejes Equivalentes	Ejes Equivalentes Acumulados
2000	614.340	614.340
2001	672.254	1.286.594
2002	730.168	2.016.762
2003	788.082	2.804.844
2004	845.996	3.650.840
2005	903.910	4.554.750
2006	961.824	5.516.574
2007	1.019.738	6.536.312
2008	1.077.652	7.613.964
2009	1.135.566	8.749.530
2010	1.193.480	9.943.010
2011	1.251.394	11.194.404
2012	1.309.308	12.503.712
2013	1.367.222	13.870.934
2014	1.425.136	15.296.070
2015	1.483.050	16.779.120
2016	1.540.964	18.320.084
2017	1.598.878	19.918.962
2018	1.656.792	21.575.754
2019	1.714.706	23.290.460
2020	1.772.620	25.063.080
Total Ejes Equivalentes Acumulados		25.063.080

Tabla 3.6: Ejes Equivalentes y Ejes Equivalentes Acumulados para la Plaza de peajes Lo Prado.

Año	Ejes Equivalentes	Ejes Equivalentes Acumulados
2000	866.453	866.453
2001	923.606	1.790.059
2002	980.759	2.770.818
2003	1.037.912	3.808.730
2004	1.095.065	4.903.795
2005	1.152.218	6.056.013
2006	1.209.371	7.265.384
2007	1.266.524	8.531.908
2008	1.323.677	9.855.585
2009	1.380.830	11.236.415
2010	1.437.983	12.674.398
2011	1.495.136	14.169.534
2012	1.552.289	15.721.823
2013	1.609.442	17.331.265
2014	1.666.595	18.997.860
2015	1.723.748	20.721.608
2016	1.780.901	22.502.509
2017	1.838.054	24.340.563
2018	1.895.207	26.235.770
2019	1.952.360	28.188.130
2020	2.009.513	30.197.643
Total Ejes Equivalentes Acumulados		30.197.643

Con el número de ejes equivalente determinado se debe elegir un valor para el grado de confiabilidad de los datos y de la desviación estándar a fin de poder determinar el factor de corrección necesario para una adecuada determinación del número de ejes equivalente para el diseño del pavimento.

Dicha corrección se realiza siguiendo la ecuación (3.3):

$$EE_{Corregido} = EE * F_R \quad (3.3)$$

Donde F_R es el factor de corrección que se determinan en función del grado o nivel de confianza y la desviación estándar del sistema adoptada, como se presentaron en la ecuación (3.4):

$$F_R = 10^{-Z_R * S_o} \quad (3.4)$$

Para este cálculo inicial para la obtención de los ejes equivalentes corregidos, se asumirá un nivel de confianza del 80% y una desviación estándar en el comportamiento de los datos del tráfico considerando un pavimento flexible de 0,49, entonces:

$$F_R = 10^{-(-0.841 * 0.49)} = 2.58 \quad (3.5)$$

Con este factor de corrección se determina finalmente los valores del número de ejes equivalente corregido como se presenta en la Tabla 3.7 para cada plaza de peajes.

Tabla 3.7 :Total de Ejes Equivalentes Acumulados corregidos de ambos tramos.

Tramos	EEAcumulados	EECorregido
Plazade Peajes Troncal Zapata	25.063.080	64.662.746
Plaza de Peaje Lo Prado	30.197.643	77.909.919

3.3 DATOS DEL DISEÑO ORIGINAL DE LOS TRAMOS ELEGIDO

Durante una revisión bibliográfica posterior al análisis de los datos del INE se ubicó una información corresponde a datos y valores utilizados por la constructora que realizó los trabajos en la Ruta 68 después de haber sido concesionada.

Dichos datos se encontraban en un trabajo de título en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Valparaíso realizada por Nash *et al* [25]y se adoptaron dichos datos a fin de contar con valores para una posterior comparación con el diseño que se realizara en función con los datos obtenidos del INE en este trabajo.

A continuación, se presentan datos que corresponden al diseño original de los tramos elegidos, que fueron diseñados con el método AASHTO-93 siguiendo las indicaciones y exigencias que establece la Dirección de Vialidad y el Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y Criterios de Diseño considerando un periodo de 20 años de vida útil.

Posteriormente se procederá a comparar los datos del diseño original con los obtenidos en este trabajo. En donde el análisis de los datos procesados se realizará con la ayuda del programa DIPAV 2.3 utilizado como herramienta del método AASHT-93 en la última versión de este programa. Este programa fue desarrollado siguiendo el método y las ecuaciones de la “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993” y “AASHTO Pavement Overlay Design” y fue desarrollado por los ingenieros del Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón (IBCH) [22].

Luego de dichas comparaciones se podrecerá a realizar un análisis de sensibilidad del coeficiente de confianza y como este influye en el diseño del paquete estructural del pavimento de los tramos elegidos.

3.3.1 Datos y Consideraciones del Diseño Original

Los datos que se presentan a continuación fueron obtenidos de Nash *et al* [25]. A continuación, se presentarán los parámetros más relevantes que se utilizaron en el diseño, que coinciden con las recomendaciones del Manual de Carreteras Vol. 3.

- **Volumen de tráfico (Ejes Equivalentes)**

En la Tabla 3.8 se presenta la evaluación del tráfico de los dos tramos de estudio en función de los ejes equivalentes (EE) que corresponden a uno de los antecedentes recopilados para su posterior comparación.

Cabe mencionar que se consideraran que los datos de “Camino Casablanca” equivalente al Tramo 1: Plaza de peajes Troncal Zapata, por su cercanía y entendiendo que el camino se divide en tramos homogéneos se asumirá que las solicitudes acumuladas durante la vida de diseño (EE) son iguales o que presentan sensibilidades similares.

Tabla 3.8: Volumen del Tráfico en Ejes Equivalentes del diseño original para cada tramo de estudio [25].

Ubicación	Km	Ejes Equivalentes Acumulados
Camino Casablanca	73.50 a 77.55	68.600.000
Acceso Oriente y Poniente a Túnel Lo Prado	19.60 a 24.44	46.010.000

- **Índice de Serviciabilidad (P)**

Los valores de serviciabilidad inicial y finales del diseño original son los recomendados según el Manual de Carretera Vol. 3 [25]

- **Nivel de Confianza R (%)**

Para el nivel de confianza se utilizaron los coeficientes recomendados por el Manual de Carreteras Vol. 3 para en el diseño de ambos tramos. El nivel de confianza utilizado fue de 80 % que tiene asociado un coeficiente de confiabilidad (Zr) de -0,841 asumiendo una distribución normal de los datos [25].

Tabla 3.9: Niveles de Confianza adoptados para cada tramo diseño original [25].

Nivel de Confianza	Tamo 1: Camino Casablanca	Tramo 2: Acceso Oriente y Poniente a Túnel Lo Prado
R(%)	80	80
Z _r	-0,841	-0,841
S _o	0,45	0,45

- **Módulo Resiliente**

Para determinar el módulo resiliente se utilizan correlaciones de tipo empírico teórico de validez comprobada que propone el Manual de Carreteras.

Por otra parte, el módulo de resiliencia utilizado en el diseño original para la subrasante se muestra en la Tabla 3.10 y un valor de CBR igual a un 20 % para la subrasante natural, poniendo en algunos sectores un mejoramiento en el suelo de fundación [25].

Tabla 3.10: Módulo resiliente para cada tramo en MPa [25].

Módulo Resiliente	Tamo 1: Camino Casablanca	Tramo 2: Acceso Oriente y Poniente a Túnel Lo Prado
M _R (MPa)	114	114

- **Coefficiente Estructural**

Para la determinar los coeficientes estructurales de cada capa se utilizaron los siguientes valores [25]:

- ❖ Base Granular con un CBR de 80 %
- ❖ Base Asfáltica con Estabilidad Marshal de 6000 N
- ❖ Capa Asfáltica intermedia de Estabilidad Marshal de 8000 N
- ❖ Capa Asfáltica superior de Estabilidad Marshal de 9000 N

En donde se utilizaron ecuaciones 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 que son relaciones matemáticas de tipo empírico-teórico propuestas por el Manual de Carreteras Vol. 3, para estimar el coeficiente estructural de cada capa en función de distintos parámetros (E, EM, CBR).

- ✓ Coeficiente estructural de mezcla asfáltica (a_1)

$$a_1 = 0.0052 * E^{(0.55)} \quad E: \text{Módulo de Elasticidad en MPa} \quad (3.6)$$

$$a_1 = 0.0078 * EM^{(0.441)} \quad EM: \text{Estabilidad Marshal en N} \quad (3.7)$$

- ✓ Coeficiente estructural de base granulares (a_2)

$$a_2 = 0.032 * CBR^{(0.32)} \quad \text{para } 80\% < CBR < 100\% \quad (3.8)$$

- ✓ Coeficiente estructural de subbase granulares (a_3)

$$a_3 = 0.058 * CBR^{(0.19)} \quad \text{para } 30\% < CBR < 40\% \quad (3.9)$$

En la Tabla 3.11 se presentan los coeficientes estructurales del diseño original para ambos tramos:

Tabla 3.11: Coeficientes Estructural adoptado para cada tramo [25].

Capas	Coeficiente Estructural a_i Tramos 1-2
Capa 1: Mezcla Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 9000 N	0,43
Capa 2: Mezcla Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 8000 N	0,41
Capa 3: Base Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 6000 N	0,36
Capa 4: Base Granular	0,13

- **Coeficiente de Drenaje**

Para el coeficiente de drenaje se siguieron las recomendaciones de la Manual de Carreteras Vol. 3 y se determinó que un coeficiente de drenaje de 1 en la capa asfálticas y base, y un coeficiente de drenaje de 1,2 para la subbase granular para ambos tramos de estudio[25].

3.3.2 Estructura existente de Tramo 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata

Para el Tramo 1, como se mencionó anteriormente se utilizará los antecedentes del tramo de carretera del kilómetro 66.60 al 71.60 que corresponden a la plaza de peaje del Troncal Zapata de la cual se tienen los datos de tráfico y además se asume que el camino se divide en tramos homogéneos por lo que las solicitaciones acumuladas durante la vida de diseño (EE) son iguales o similares en este tramo de carretera de la Ruta 68.

En la Figura 3.6 se presenta la estructura de pavimento existente y los espesores de cada capa.

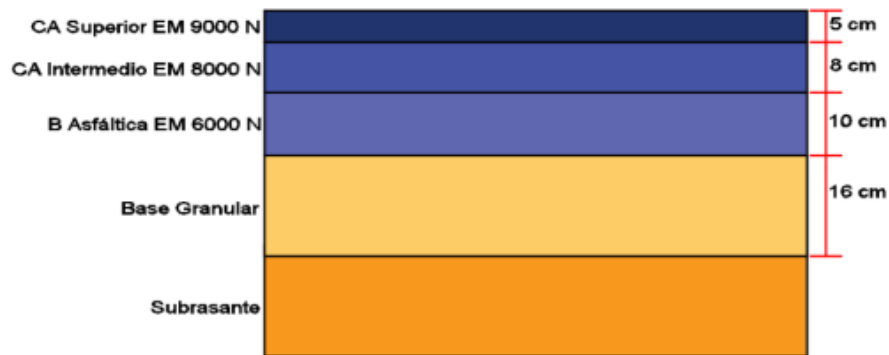


Figura 3.5: Estructura de Pavimento existente del Tramo 1 [25].

En la Tabla 3.12 se presenta un resumen de los datos del Tramo 1.

Tabla 3.12: Espesores de Pavimento del Tramo 1 [25].

Capas	Espesores (cm)	ai	mi	NE
Capa 1: Mezcla Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 9000 N	5	0,43	-	2,15
Capa 2: Mezcla Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 8000 N	8	0,41	-	3,28
Capa 3: Base Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 6000 N	10	0,33	-	3,30
Capa 4: Base Granular	16	0,13	1,2	2,50
Total, Espesor (cm)	39	NE Estructural		11,23
		NE Asfáltico		8,73

3.3.3 Estructura existente de Tramo 2: Plaza de Peajes Lo Prado

A continuación, en la Figura 3.7, se presenta la estructura de pavimento existente y los espesores de cada capa del Tramo 2 [25].

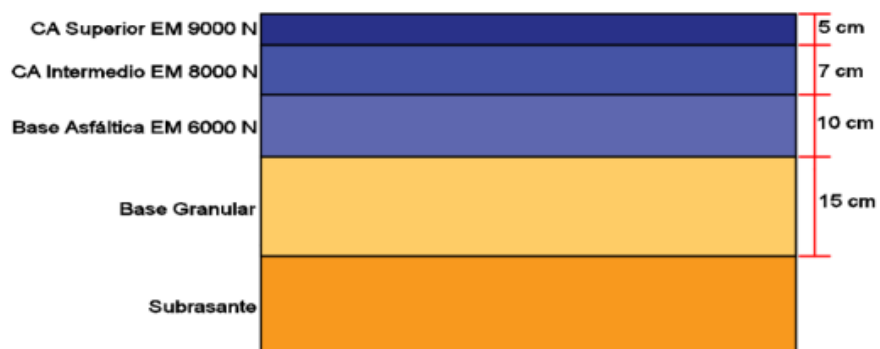


Figura 3.6: Estructura de Pavimento existente del Tramo 2 [25].

En la Tabla 3.13 se presenta un resumen de los datos del Tramo 2.

Tabla 3.13: Espesores de Pavimento del tramo 2 [25].

Capas	Espesores (cm)	a_i	m_i	NE
Capa 1: Mezcla Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 9000 N	5	0,43	-	2,15
Capa 2: Mezcla Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 8000 N	7	0,41	-	2,87
Capa 3: Base Asfáltica en Calientes, Estabilidad Marshal 6000 N	10	0,33	-	3,30
Capa 4: Base Granular	15	0,13	1,2	2,34
Total, Espesor (cm)	37	NE Estructural		10,66
		NE Asfáltico		8,32

3.4 COMPARACIÓN DE NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES.

En esta parte del trabajo, se presenta la comparación entre el número de ejes equivalentes originales del diseño [25] especificado en la Tabla 3.8 y el número de ejes equivalentes calculados con el programa DIPAV 2.3 con los datos del tráfico proporcionados por el INE.

En la Tabla 3.14 se muestran un resumen de los parámetros de diseño que se utilizaran para para el cálculo de los ejes equivalentes con los datos del tránsito proyectado [23].

Tabla 3.14: Resumen de los parámetros de diseño ingresados en el Programa DIPAV 2.3.

		Tramo 1 : Plaza de Peaje Troncal Zapata	Tramo 2: Plaza de Peaje Lo Prado
Indice de Serviabilidad	Po	4.2	4.2
	Pf	2.0	2.0
Nivel de Confianza	R(%)	80	80
	Zr	-0.841	-0.841
	So	0.49	0.49
Modulo Resiliente [Mpa]		114	114

Con respecto a la desviación estándar que se utilizó en los diseños, se adoptó de un valor mayor con respecto al diseño original de 0,49, dado que se considera que pueden existir errores en el tránsito asumiendo un criterio más conservado para la desviación estándar como se muestra en la Tabla 2.5.

Por otra parte, se comparan los ejes equivalentes acumulados estimados con el método simplificado desarrollado en el punto 3.2.4. con los ejes equivalentes acumulados obtenidos con el programa DIPAV 2.3 como se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Número de Ejes Equivalentes obtenidos con el Método Simplificado y el programa DIPAV 2.3.

Tramos	EEMetodoSimpl.	EEDIPAV 2.3
Tramos 1: Plazade Peajes Troncal Zapata	64.662.746	64.262.267
Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado	77.909.918	75.771.828

En esta comparación se obtuvo una diferencia del 1 a 3 % respectivamente para cada tramo de estudio. Esta diferencia se explica debido a que en el método simplificado solo se utiliza un factor camión (FC) promedio para cada tipo de vehículo (Tabla 3.1) y en el programa DIPAV 2.3 se realizan los cálculos considerando cada tipo de vehículo por separado como lo establece el método de la AASHTO-93.

En el programa DIVAP 2.3 sigue el método y las ecuaciones descritas por la guía AASTHO-93, en donde el factor camión (FC) se determina entre la razón de pérdida de serviciabilidad causada por la carga específica de los ejes de cada tipo de vehículo y la producida por el eje estándar de 80 kN en el mismo pavimento.

El objetivo de realizar la comparación de la Tabla 3.15 es tener una referencia y seguridad que los datos obtenidos con el programa son congruentes (diferencia 1 a 3%). Esta comparación nos permite seguir con el análisis propuesto: de poder comparar los ejes equivalentes del diseño originales y los determinados a través de las proyecciones del tránsito vehicular con los datos entregados por el INE utilizando el Programa DIPAV 2.3.

En la Tabla 3.16 se presentan los resultados obtenidos del número de ejes equivalentes calculados con el Programa DIPAV 2.3 utilizando los parámetros anteriormente mencionados en la Tabla 3.14 y los ejes equivalentes del diseño originales, en donde se presenta una diferencia del 7 y 38 % respectivamente a cada tramo de estudio.

Tabla 3.16: Comparación de Ejes Equivalentes obtenidos por el Programa DIPAV 2.3 y los originales.

Tramos	EE _{DIPAV 2.3}	EE _{Originales}
Tramos 1: Plazade Peajes Troncal Zapata	64.262.267	68.600.000
Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado	75.771.828	46.010.000

Estos resultados pueden decir que en los tramos de estudio de la Ruta 68 existe la posibilidad que el paquete estructural esté sobre o sub dimensionado en función de las solicitaciones que están recibiendo.

Con respecto al Tramo 1 se observa que el número de ejes equivalentes obtenidos con los datos del tránsito proyectado es menor que el considerado en el diseño original, donde existe una diferencia del 7% mencionada anteriormente que equivalen a 4.337.733 ejes equivalentes. Por lo cual en este tramo la vida útil del pavimento sería mayor dado que el nivel de carga solicitado es menor que el del diseño original.

Y en el caso del Tramo 2 ocurre lo opuesto que, donde se presenta que la proyección de ejes equivalentes es mucho mayor que la del diseño original con una diferencia del 38 % que equivale a 28.761.828 de ejes equivalentes, por lo cual se puede señalar que en este tramo el pavimento alcanza la falla antes de cumplir su vida útil.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL SENSIBILIDAD

En esta parte del trabajo se presentará el análisis sensibilidad en función al nivel confianza y cómo influye en la obtención del número estructural (NE), tanto para los ejes equivalentes de diseño y los obtenidos en este trabajo para ambos tramos de estudio utilizando el programa DIPAV 2.3.

Para el cálculo de los ejes equivalentes calculados con la proyección del tránsito vehicular (datos del INE) se utilizó una distribución porcentual interna del tránsito del 31% para ambos tramos de estudio, que es lo que recomienda la tabla 3.603.202 D. del Manual de Carreteras Vol. 3 [11].

4.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS EJES EQUIVALENTES

En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ejes equivalentes proyectados con el programa DIPAV 2.3 y los ejes equivalentes originales para cada tramo con su respectivo número estructural.

Tabla 4.1: Número Estructural calculado con en función de los Ejes Equivalentes para cada tramo.

Tramos	DIPAV 2.3		Original	
	EE	SN [mm]	EE	SN DIPAV 2.3 [mm]
Tramos 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata	64.262.267	112	68.600.000	113
Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado	75.771.828	114	46.010.000	106

Los valores del número estructural (NE) para ambos casos se obtuvo utilizando el programa DIPAV 2.3, tanto para las proyecciones del tránsito vehicular realizada con los datos del INE como para la verificación del número estructural del diseño original.

En este último caso, en donde se verificó el valor del NE de diseño coinciden con los resultados entregados por el programa DIPAV 2.3. Esto se logra cuidando que los parámetros utilizados fueran del diseño original que se presentaron el Capítulo 3.3.1.

4.1.1 Sensibilidad con Respecto al Tráfico y la Confianza

En una primera etapa de este trabajo se analizó el comportamiento del diseño con los datos originales en ambos tramos, con el fin de determinar cómo influye el grado de confianza en la determinación del número estructural (NE). Para esto se hizo variar el grado de confianza y se determinó, para cada caso el número estructural en función del número de ejes equivalentes. La variación del grado de confianza fue de 70, 80 y 90 %.

4.1.1.1 Variación de la Confianza para el Tramo 1

En la Figura 4.1 se muestran las curvas de Ejes equivalentes v/s Número Estructural para el primer tramo de estudio: plaza de peaje Troncal Zapata obtenidas con el programa DIPAV 2.3, donde se observa que para un volumen de tráfico a medida que aumenta el grado de confianza también se produce un aumento en la magnitud del número estructural por ende aumenta el espesor del paquete estructural del pavimento.

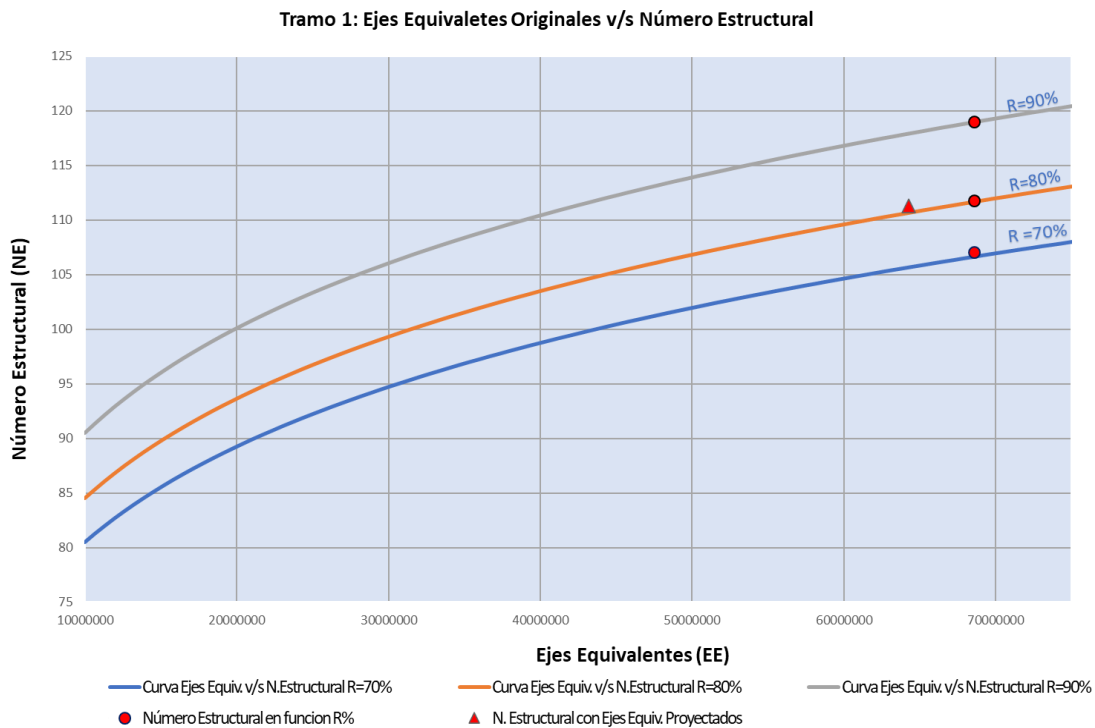


Figura 4.1: Gráfico de Ejes Equivalentes v/s Número Estructural del Tramo 1, variando el nivel de confianza R = 70, 80 y 90 %

Los resultados obtenidos muestran que, manteniendo el número de ejes equivalentes constante, con un valor de 68.600.000 (EE) y variando el nivel de confianza del diseño, el número estructural tiende a variar en el mismo sentido, es decir se observa un incremento en el número estructural asociado a un incremento en el grado de confianza.

Un incremento del grado de confianza de 70% a 80% significa un aumento en el número estructural de 107 [mm] a 112 [mm], es decir, un incremento de 5% de espesor en el paquete estructural. Siguiendo con el análisis, el incremento de 80% a 90% del nivel de confianza implica una variación del número estructural de 112 [mm] a 119 [mm], que corresponde a un incremento de 6% en el paquete estructura.

Entonces se puede concluir que al adoptar valores del nivel de confianza más altos implica un aumento en el espesor del paquete estructural lo que es lógico pues el grado de confianza indica la ausencia de falla del pavimento por lo que requiere un aumento en los espesores de las capas.

Por otra parte, en el mismo gráfico de la Figura 4.1 se muestra el valor obtenido para el número estructural que correspondiente al análisis de la proyección utilizando los datos del INE. En donde existe una diferencia del orden del 7% con los ejes equivalentes de diseño.

En donde, se presenta diferencia del orden del 1% al determinar el número estructural asociado a cada estado de carga. Por lo tanto, existe una mayor variación en el NE al adoptar distintos niveles de confianza, que cambiando los ejes equivalentes tiene una pequeña diferencia.

4.1.1.2 Variación de la Confianza para el Tramo 2

En la Figura 4.2 se presentan las curvas de Ejes equivalentes v/s Número Estructural para el Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado, en donde se observa un comportamiento similar al caso anterior, donde a medida que aumenta el nivel de confianza también incrementa el número estructural lo que se explica debido a que las condiciones de diseño no varían.

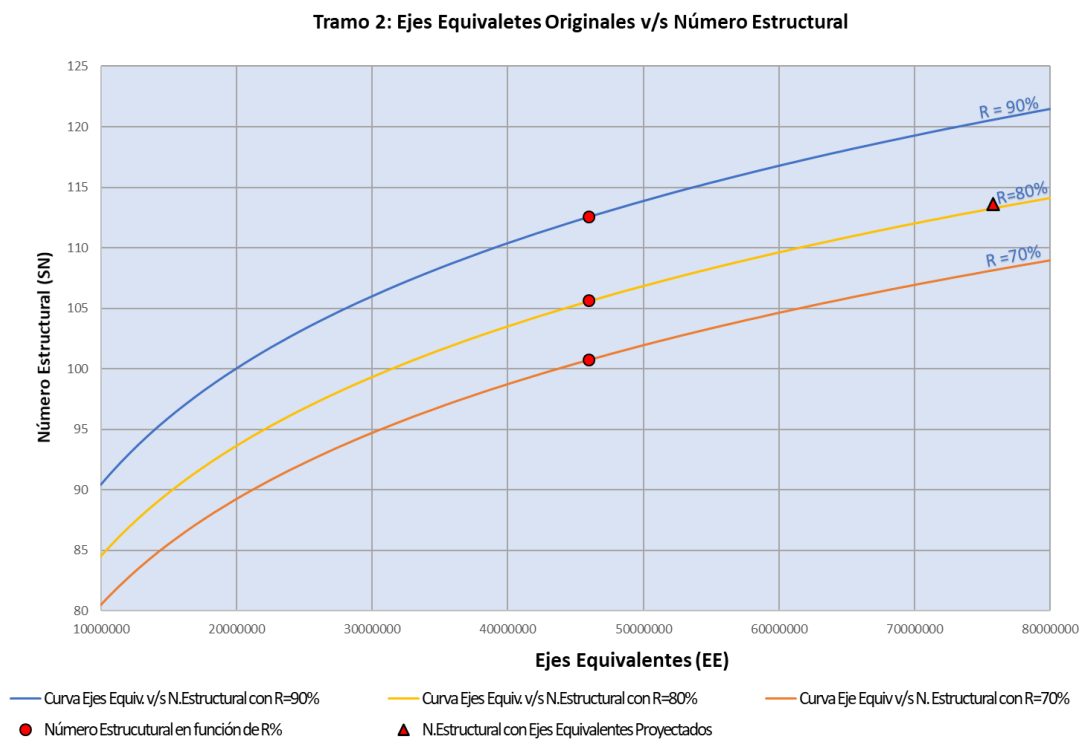


Figura 4.2: Gráfico de Ejes Equivalentes v/s Número Estructural del Tramo 2 variando la confianza R = 70, 80 y 90 %

De igual manera en la Figura 4.2, se superponen los ejes equivalentes determinado en este trabajo (calculado con los datos del INE) que requiere número estructural mayor de 114 [mm] versus el NE de diseño de 106 [mm], presentando una diferencia de 7%, es decir, que este tramo se encuentra subdimensionado y que las proyecciones del volumen tráfico utilizadas en el diseño original fueron superadas.

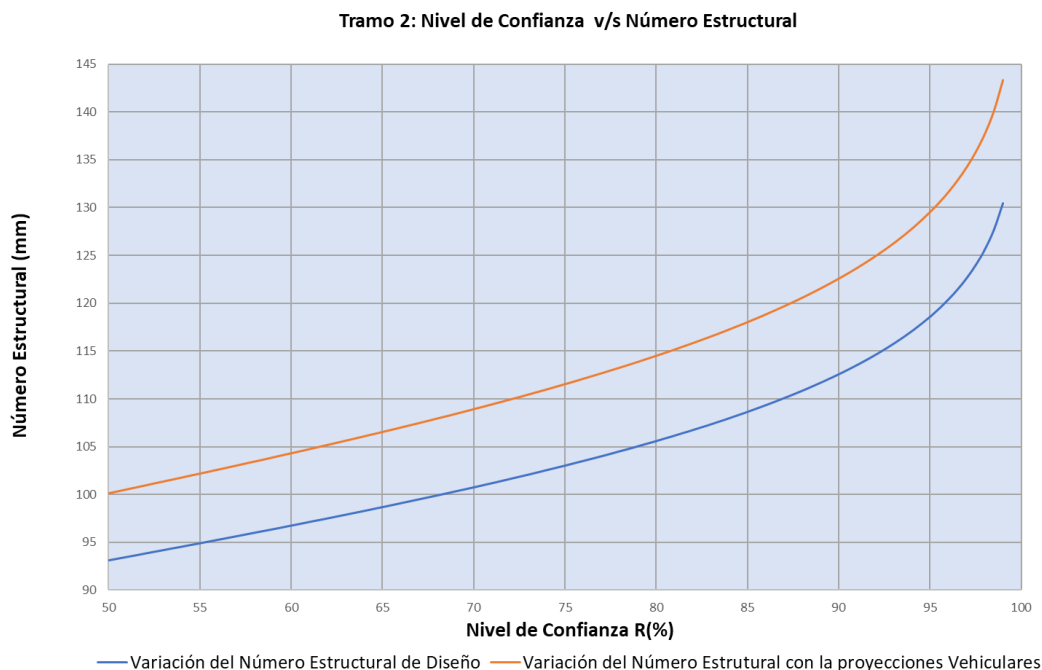


Figura 4.3: Nivel de Confianza v/s Número Estructural del Tamo 2.

Por otra parte, se puede explicar la diferencia que existe en la determinación del número estructural del Tamo 2 observando las curvas de la Figura 4.3 que presenta la gráfica del Nivel de Confianza v/s Número Estructural de dicho tramo. En donde aprecia la diferencia del estado de carga de los ejes proyectados y los de diseño, en donde se puede decir, que a mayor estado de carga mayor será el número estructural asociado.

A diferencia de lo que ocurren en el Tramo 1 donde las curvas de la Figura 4.4 prácticamente son iguales debido a que ambos volúmenes de tráfico son muy parecidos (casi iguales) y entregan resultados similares del número estructural con diferencias casi despreciables.

Tramo 1: Nivel de Confianza v/s Número Estructural

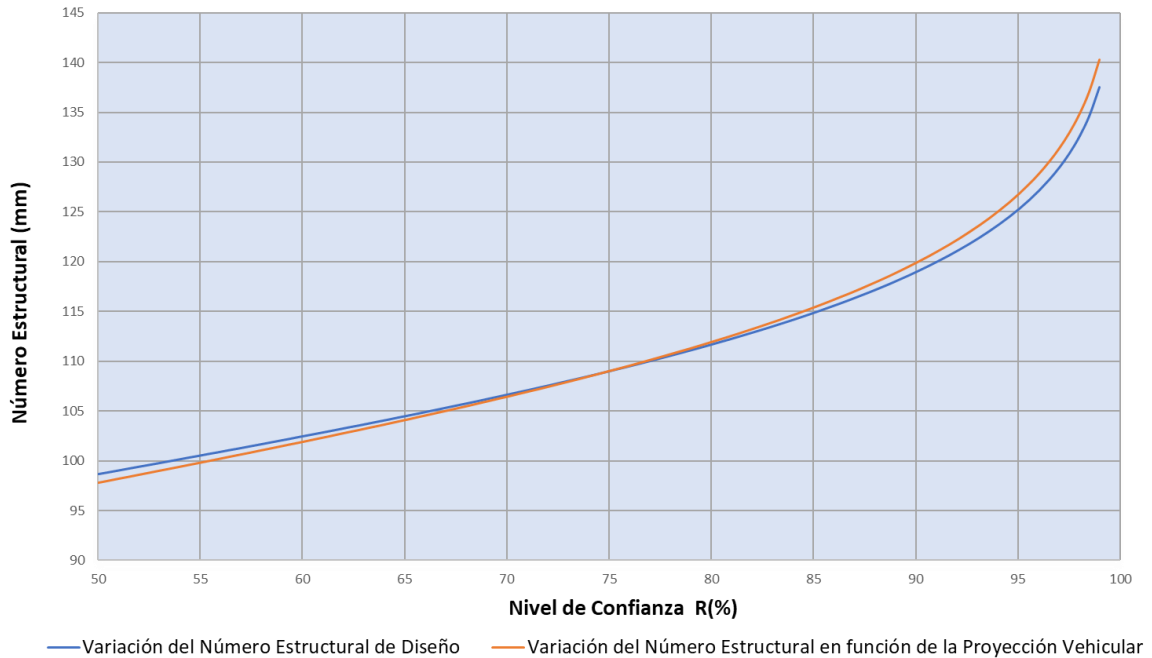


Figura 4.4: Nivel de Confianza v/s Número Estructural del Tamo 1.

Por otra parte, se puede apreciar que en ambos tramos las curvas de Nivel de Confianza v/s Número Estructural para valores de confiabilidad bajos entre 50% y 80% el incremento del número estructural es paulatino mientras que para valores superiores a 80 % del nivel de confianza el NE tiene mayores variaciones, esto se puede explicar por la naturaleza de las curvas.

Teniendo en cuenta la sensibilidad del número estructural a las variaciones de la confianza adoptada, es importante establecer adecuadamente el SN requerido dado que, sobre esa base, se determinan los espesores de las diferentes capas.

Además, existen muchas combinaciones posibles que satisfacen y dan solución a la ecuación de diseño, sin embargo, es importante considerar la lógica de la verificación por capas que implica una protección para cada una de las capas considerando un espesor mínimo suficiente para asegurar la protección de la capa inferior. Si esta condición no se cumple, las capas no estarán protegidas adecuadamente y serán susceptibles a la erosión, ahuellamiento y deterioro prematuro.

4.2 DISEÑO DE VERIFICACIÓN POR CAPA

El pavimento flexible es un sistema multicapa como se muestra en la Figura 4.5 , por lo cual debe ser diseñado considerando una secuencia de capas que a partir de la subrasante que contemple una subbase, una base y la o las capas asfálticas. Por lo tanto, el primer cálculo es determinar el número estructural que se requiere para la calidad de subrasante que se tiene en la zona del proyecto, para, posteriormente, establecer los espesores mínimos de las capas estructurales y asfálticas, para asegurar que no se generen fallas en la subrasante.

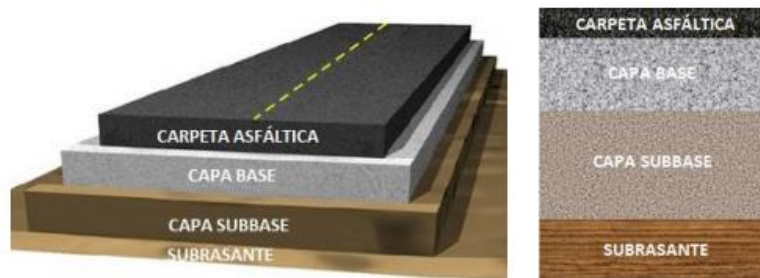


Figura 4.5: Estructura del paquete estructural de un pavimento Asfáltico [22].

4.2.1 Determinación de los Espesores

Como se mencionó anteriormente unos de los objetivos principales del método AASHTO es poder establecer los espesores de las capas que conforman el pavimento.

Para esto es fundamental determinar el número estructural (NE) que le corresponde a cada capa ya sea resolviendo la ecuación (2.1) de forma manual, lo cual es muy tedioso, o por medio de ábacos disponibles en el manual que puede ser más rápido, aunque menos preciso por lo errores al trazar las líneas o recurriendo a un programa computacionales adecuado.

En este caso se recurrirá al programa DIPAV 2.3 que permite realizar estas determinaciones con mayor exactitud y rapidez.

Para poder determinar el número estructural es necesario definir y determinar previamente las siguientes variables:

- ❖ El tránsito estimado por carriles (W_{18}) a lo largo de la vida útil del pavimento.
- ❖ Confiabilidad (R).
- ❖ Desviación estándar de las variables S_o .
- ❖ Pérdida de Serviciabilidad ΔPSI .
- ❖ Y finalmente el módulo resiliente efectivo de la subrasante (M_R).

La ecuación (2.16) establece una relación entre el número estructural con los espesores de cada capa:

$$NE = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \quad (2.16)$$

En donde, a_1, a_2, a_3 son los coeficientes estructurales de capa, son magnitudes adimensionales que están en función de distintos parámetros como del módulo resiliente, CBR, etc.

Por otro lado, para poder determinar los módulos resilientes de las capas asfálticas se deben utilizar las ecuaciones de tipo empíricas propuestas por el Manual de Carreteras, para posteriormente realizar el análisis de verificación.

Por otra parte, m_2, m_3, m_3 son los coeficientes de drenaje, mientras que D_1, D_2, D_3 son espesores de capas, que pueden estar expresadas en el sistema de unidades del país, por lo tanto, el número estructural llevará las mismas unidades que los espesores de las diferentes capas de pavimento.

Esta ecuación de diseño no tiene una solución única, ya que hay infinitas combinaciones de espesores que pueden satisfacer el espesor requerido por el número estructural. Sin embargo, para facilitar la elección de los espesores existen ciertas recomendaciones o criterios que establecen espesores mínimos de capas para que estas puedan ser construidas y sirvan de protección a la capa inferior reduciendo al mismo tiempo las deformaciones permanentes de las capas superiores que presentan una mayor resistencia.

4.2.1.1 Estabilidad y Facilidad de la Construcción

Como se mencionó anteriormente los espesores tienen que cumplir ciertas limitaciones para poder satisfacer los requerimientos de los métodos constructivos y de estabilidad.

En la Tabla 4.2 presentan dichas limitaciones que se refieren específicamente a los espesores mínimos de la capa asfáltica sobre una base granular. Sin embargo, en las bermas pueden colocarse espesores menores y/o variables.

Tabla 4.2: Espesores Mínimos de las capas Estructuras recomendados por el Manual de Carreteras [11].

Tipo de Capas	Espesor mínimo [mm]
Capa Asfáltica Única	50
Mas de una capa Asfáltica	40
Capa Granular	150

Además, por razones constructivas y a fin de evitar el incremento en los diseños de las capas asfálticas ligadas se debe redondear a los 5 [mm] superiores y las capas no ligadas a los 10 [mm] superiores [11].

Por otra parte, no es práctico ni económico colocar capas de un espesor menor al mínimo establecido, dado que sería poner en riesgo la estabilidad de la estructura del pavimento.

Estos espesores mínimos mantienen no solo la estabilidad de la estructura, sino que también permiten un buen desempeño en casos de congelamiento o para mitigar los efectos de suelos expansivos [22].

4.2.2 Verificación de los espesores Mínimos en Función del Número Estructural (NE)

Esta metodología se base en el concepto que las capas granulares no tratadas deben estar protegida de las tensiones vertical excesiva dado que se podrían provocar deformaciones permanentes [22]. Para esta verificación se busca que los espesores cumplan con el mínimo requerido para prevenir ahuellamiento y daños en la estructura [22].

$$D_1^* \geq \frac{NE_1}{a_1} \quad NE_1^* = a_1 D_1 > NE_1 \quad (4.1)$$

$$D_2^* = \frac{NE_2 - NE_1^*}{a_2 m_2} \quad NE_1^* + NE_2^* > NE_2 \quad (4.2)$$

$$D_3^* = \frac{NE_3 - (NE_1^* + NE_2^*)}{a_3 m_3} \quad (4.3)$$

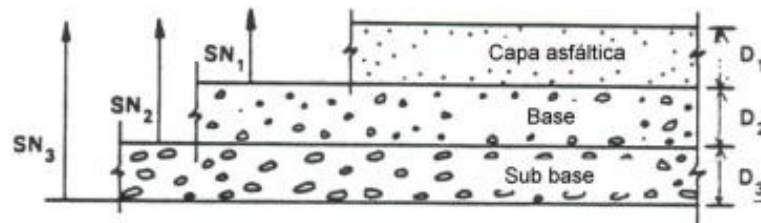


Figura 4.6: Esquema de paquete estructural, con las capas que lo componen [22].

Las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3) describe el procedimiento para determinar los espesores mínimos. Donde el la Figura 4.6 se presentan el esquema del paquete estructural con los espesores ($D_{1,2,3}$) asociados a cada capa y se respectivo NE.

En esta parte de trabajo se calculará y se verificará el espesor mínimo para la capa granular con su respectivo número estructural. Estos cálculos se realizarán aplicando el estado de carga de diseño y el proyectado utilizando el programa DIPAV 2.3.

En la Tabla 4.3, se presenta el resumen de los resultados obtenidos, del espesor mínimo requerido para la capa granular y el número estructural requerido y alcanzado del paquete estructural para cada tramo de estudio.

Tabla 4.3: Tabla resumen de los resultados obtenidos con el programa DIPAV 2.3: Espesor mínimo de la capa granular y el número estructural con las solicitudes de carga del diseño original.

	Base Granular Diseño Original [mm]	Base Granular min DIPAV 2.3 [mm]	Número Estructural Requerido $NE_{requerido}$	Número Estructural Alcanzado $NE_{alcanzado}$
Tramos 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata	160	156	112	112
Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado	150	144	106	107

Con los resultados de la Tabla 4.3 se verifica que el espesor de la capa granular del diseño original es mayor que el espesor mínimo obtenido.

Además, en ambos tramos de estudio se cumple la condición que el número estructural alcanzado sea mayor o igual al requerido, cumpliendo con la ecuación (4.4). Esta verificación se realizó para el estado de carga de diseño.

$$NE_{alcanzado} \geq NE_{requerido} \quad (4.4)$$

Del mismo modo, se realizarán las verificaciones de la capa granular y el NE del paquete estructural del diseño original, pero con las solicitudes de carga que se obtuvieron con las proyecciones del tráfico [23].

En la Tabla 4.4 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, que buscan determinar si los espesores del diseño original son los adecuados para las solicitudes de cargas proyectadas.

Por lo tanto, se verifican los mismos espesores del diseño original y del número estructural requeridos y alcanzados para cada tramo que cumplen la condición de la ecuación 4.4.

Tabla 4.4: Tabla resumen de los resultados obtenidos con el programa DIPAV 2.3: Espesor mínimo de la capa granular y el número estructural con las solicitudes de carga proyectada.

	Base Granular Diseño Original [mm]	Base Granular min DIPAV 2.3 [mm]	Número Estructural Requerido $NE_{requerido}$	Número Estructural Alcanzado $NE_{alcanzado}$
Tramos 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata	160	158	112	112
Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado	150	201	115	107

Nota: Es importante señalar que los cálculos que realiza el programa son de forma exacta y sin redondeo es por esto, que en una primera instancia en este análisis solo se interpretará la magnitud de los espesores y del número estructural y que estos cumplan con la condición de la ecuación 4.4. antes de revisar si estos obedecen a las sugerencias de los espesores mínimo y el redondeo superior sugerido por el Manual de Carretera.

Con respecto al Tramo 1, la Tabla 4.4 la capa granular presenta una disminución del espesor de 160 a 158 [mm], esta diferencia no es significativa dado que son 2 [mm] que se pueden explicar debido a que las solicitaciones de cargas proyectadas en este tramo son un 7% menos que las de diseño original.

Por otra parte, en la Tabla 4.3 en el Tramo1 el espesor mínimo para la capa granula fue de 156 [mm], en donde el estado de la carga de diseño es mayor, esto se puede explicar debido a que se adoptó un criterio más conservador en la elección de la desviación estándar aplicada a los datos de las proyecciones del tráfico de un 0,49 mientras que en el diseño original fue de 0,45.

En la Figura 4.7 se presta el gráfico de Desviación Estándar (S_o) v/s Número Estructural [mm], se puede apreciar lo anteriormente señalado, que la adoptar una desviación estándar mayor aumenta el número estructural, por lo tanto, el espesor de las capas que componen el paquete estructural también aumentará.

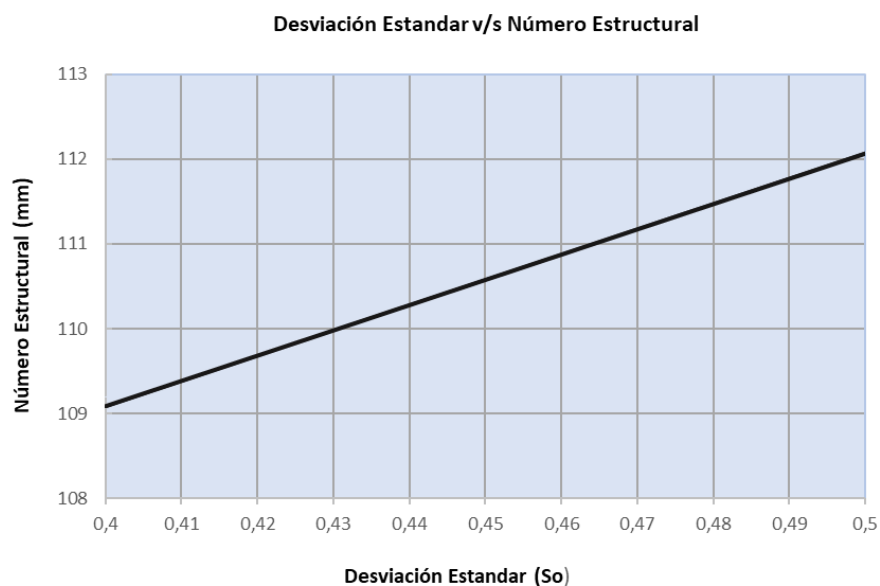


Figura 4.7: Gráfico de Número Estructural v/s Desviación Estándar del Tramo 1.

Con respecto al número estructural requerido y alcanzado en ambos tramos de estudio, tanto para la verificación con las cargas de diseño originales y las proyectadas se cumplen la condición de la ecuación (4.1.) excepto en el Tramo 2.

En donde en el Tramo 2 la ecuación (4.1) no se cumple, debido a que se presenta un incremento en el espesor de la capa granular de 150 a 201 [mm], esto se puede explicar dado que el nivel de carga en este tramo 38 % mayor que las cargas de diseño originales, lo que equivale a 28.761.828 de ejes equivalentes adicionales. Por lo tanto, el valor mínimo si se le aplica la carga proyectada tiene que ser de 201[mm] para la capa granular y manteniendo los otros espesores.

Entonces el aumento de las solicitaciones en el paquete estructural implica el aumento del espesor de la capa granular, que a su vez del número estructural requerido de 106 a 115 [mm] para cumplir con la condición la ecuación (4.1),

Mas adelante, se estudiará cómo influye en los costos de mantenimiento al tener una variación de los espesores del paquete estructural.

5 ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

En el presente capítulo se sugiere una propuesta para el sistema de gestión enfocado en el de mantenimiento adecuado para los requerimientos de los dos tramos de estudio de la Ruta 68, con la información disponible. Determinado los costos del mantenimiento requeridos y, posteriormente, la influencia que tiene dichas propuesta de gestión sobre la tasa de peajes.

Es importante destacar la importancia del correcto mantenimiento en los pavimentos dado que estos tienen por propósito servir al tránsito de forma segura, confortable y eficiente [26]

El concepto de mantenimiento de pavimentos se refiere a la acción de cuidar las características iniciales del servicio que presta el camino y que estas se prolonguen durante un tiempo determinado, por lo tanto, se requiere tener una preocupación permanente del Estado o de la concesionaria, dado que los caminos son esenciales para el desarrollo de la comunidad y su condición afecta directamente el bienestar de las personas [26].

Es por esto, que es necesario contar con un mantenimiento adecuado de los caminos de la red a un costo apropiado, de modo de asegurar un nivel de servicio predefinido [26].

5.1 EVALUACIÓN TÉCNICA Y CARACTERIZACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

La calidad del pavimento se puede medir en términos de grado de satisfacción que éste proporciona a los usuarios, en donde ésta se puede estimar en términos del servicio que se le presta al usuario, su resistencia y durabilidad.

La caracterización del pavimento se puede realizar de forma objetiva tanto para el usuario como para el agente vial, que es el administrador de la obra que puede ser el Estado o la concesionaria. Sin embargo, la caracterización del pavimento se puede identificar en términos de indicadores de desempeño funcional y estructural.

Tabla 5.1. Atributo de desempeño de un pavimento y sus respectivos índices [26].

Atributo del Pavimento	Función en el Pavimento	Características del Pavimento	Ejemplos de Indicadores o Índices
Funcional	Serviciabilidad	Rugosidad	Índice de Rugosidad Internacional (IRI)
		Serviciabilidad	Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)
	Seguridad	Textura	Profundidad Media de la Textura (MDT)
		Fricción	Índice de Fricción Internacional (IFI)
Estructural	Integridad Estructural	Defectos Superficiales	Índice de Deterioro Superficiales
		Propiedades Mecánicas	Deflexiones Módulo de Elasticidad

En donde los primeros se relacionan con la rugosidad, textura y resistencia al deslizamiento y los indicadores estructurales incluyen el módulo elástico de la estructura de pavimento, las deformaciones y las deflexiones como se muestra en la Tabla 5.1 en donde se resumen los principales indicadores o índices como atributo del pavimento.

Entonces, los principales indicadores de la calidad del estado del pavimento están en función de los atributos de este. En donde las características funcionales del pavimento (con excepción de la serviciabilidad) se pueden medir a partir de la obtención del micro perfil del pavimento que describe las irregularidades de este, caracterizando las longitudes de onda (rugosidad, textura y ficción). La textura se clasifica en micro texturas y macrotextura que son longitudes de onda imperceptibles para el usuario si circula a más de 50 km/h, por otro parte, la rugosidad presenta longitudes de onda mayor lo cual repercute en los aumentos de los esfuerzos resistentes que actúan sobre los automóviles, aumentando su costo de operación[26].

Es importante mencionar que el conocer la magnitud de algunas de las características no solamente permite conocer las condiciones presentes en el pavimento, sino que también constituye un dato de entrada para estimar los costos de operaciones de los usuarios y el aporte a la seguridad vial del pavimento [26].

En consecuencia, este trabajo se concentrará en los atributos estructurales del pavimento específicamente en la caracterización de los defectos superficiales que puede poseer un pavimento flexible.

5.1.1 Los Defectos superficiales del Pavimento Flexible y su Mitigación

El deterioro superficial de un pavimento en términos generales consiste en una serie de manifestaciones superficiales en la capa de rodadura causada por el tráfico, clima y el envejecimiento de la superficie. Este deterioro, usualmente dificulta y hace menos segura la circulación vehicular, en donde el usuario se ve afectado en un aumento en el costo de operación [26].

Las principales causas de los deterioros superficiales son:

- ❖ Un diseño insuficiente de la superestructura
- ❖ Inestabilidad de los taludes y terraplenes
- ❖ Deficiencia constructiva
- ❖ Solicitaciones no previstas
- ❖ Y mantenimiento inadecuada.

En un pavimento flexible, los deterioros superficiales se agrupan en tres categorías: defectos superficiales, deformaciones superficiales y agrietamiento.

En la Tabla 5.3 se presentan los tipos de defectos superficiales las causas y las posibles medidas correctivas.

Tabla 5.2: Deformaciones superficiales del pavimento flexible [26].

Defectos	Causas Probables	Medidas de Corrección
Perdida de Agregados. Remoción de partículas de la ($d > 6\text{mm}$) superficie.	<ul style="list-style-type: none"> •Déficit de ligante •Fracturación y/o desintegración de partículas debido a las cargas o a la acción de heladas 	<ul style="list-style-type: none"> •Sello asfáltico de tratamiento superficial.
Desgranamiento. Pérdida progresiva de material desde la superficie hacia abajo	<ul style="list-style-type: none"> •Agregados Sucios •Insuficiente contenido de Asfalto •Mala adherencia entre el asfalto y el agregado. •Infiltración de agua por compactación deficiente de la mezcla. •Endurecimiento del asfalto por envejecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Sello sobre bacheo previo o colocación de mezcla en caso de una condición severa.
Exudación. Exceso de ligante en la superficie permitiendo una textura suave y resbaladiza, preferentemente en la zona de circulación	<ul style="list-style-type: none"> •Exceso de contenido de asfalto en la mezcla em la mezcla con relación al contenido de huecos del agregado mineral. •Repavimento directo sobre pavimentos que tienen exceso de asfalto. •Pavimento sobre bases con exceso de imprimante. 	<ul style="list-style-type: none"> •Repavimentación para una condición extensa y severa. •Quemado y sellado para una condición localizada.

Tabla 5.3 : Defectos superficiales en pavimento flexible [26].

Defectos	Causas Probables	Medidas de Corrección
Ondulación por desplazamiento. Deformación plástica del pavimento principalmente en sentido longitudinal.	<ul style="list-style-type: none"> •Mezcla asfáltica de baja estabilidad. •Deficiencia entre la capa de rodado y la capa subyacente. •Frenadas bruscas de vehículos pesados en intersecciones. 	<ul style="list-style-type: none"> •Nivelación con mezcla en sitio y repavimentación para la condición extensa. •Reconstrucción de sectores para condición localizada.
Ahuellamineto. Depresión transversal en la zona circulación.	<ul style="list-style-type: none"> •Baja capacidad de las capas estructurales. •Mezclas asfálticas de baja estabilidad. •Berma inestable que no garantiza soporte lateral. 	<ul style="list-style-type: none"> •Nivelación y repavimentación para una condición extensa, severa y peligrosa para tráfico de alta velocidad
Distorsión. Pérdida importante de la geometría transversal original.	<ul style="list-style-type: none"> •Falla de la infraestructura. •Insuficiente capacidad de soporte de la subrasante. 	<ul style="list-style-type: none"> •Bacheo profundo para selecciones localizadas. •Nivelación y repavimentación para condición generalizada. •Reemplazo de material inadecuado y ejecución de un nuevo pavimento.

Tabla 5.4: Agrietamiento en pavimento flexible [26]

Defectos	Causas Probables	Medidas de Corrección
Agrietamiento longitudinal en la zona de circulación. Arietamiento en sentido longitudinal situado en la zona de circulación.	<ul style="list-style-type: none"> •Cargas excesivas con relación a la estructuración del pavimento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Picado y sellado cuando se trata de una grieta. •Repavimentación para una condición severa que presenta varias grietas aproximadamente paralelas.
Agrietamiento longitudinal en el centro del la vía. Grietas longitudinales próximas al eje central de la calzada.	<ul style="list-style-type: none"> •Picado y sellado cuando se trata de una grieta. •Repavimentación para una condición severa que presenta varias grietas aproximadamente paralelas. 	<ul style="list-style-type: none"> •Picado y sellado de la grieta.
Agrietamiento transversal. Grietas perpendiculares al eje de la calzada.	<ul style="list-style-type: none"> •Contracciones debido a bajas temperaturas. •Ligante asfáltico inadecuado. •Refracción de grietas en repavimentación. 	<ul style="list-style-type: none"> •Picado y sellado de la grieta •En caso de condiciones severa y extensa repavimentar
Agrietamiento tipo piel de cocodrilo. Grietas que forman una red, en forma de bloques de tamaños irregulares cuyas dimensiones son indicativas del nivel en el cual ocurre la falla. Este agrietamiento normalmente va acompañado de deformaciones verticales y ocurre en capas asfálticas de poco espesor.	<ul style="list-style-type: none"> •Diseño Estructural insuficiente •Acumulación de agua en las capas subyacentes a la carpeta asfáltica. •Mezclas asfálticas muy frágiles debido a bajas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> •Bacheo profundo para una condición localizada •Eliminación de la infiltración de aguas superficiales mediante sellos y de las aguas subterráneas con drenes. •Repavimentación o reconstrucción para la condición severa y extensa.

5.2 OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

Las operaciones de mantenimiento tienen como principal objetivo de recuperar o mejorar la condición de la infraestructura vial y prolongar su vida de servicio, por lo tanto, las operaciones de mantenimiento dependerán del grado de deterioro de la infraestructura, para lograr mejorar los indicadores específicos como por ejemplo la rugosidad, ahuellamiento, agrietamiento, etc. [26].

Para organizar las operaciones de mantenimiento se agrupan en función del grado de deterioro para facilitar la identificación y evaluación de estrategias costo-eficiencia.

5.2.1 Estrategias de Mantenimiento

Las estrategias de mantenimiento son un conjunto de operaciones de mantenimiento que permiten mejorar los índices o indicadores de desempeño estructural y funcional de la infraestructura en general y de un pavimento en particular [26], [27].

La elección de la estrategia de mantenimiento dependerá de los deterioros que se requieran eliminar, del nivel de deterioro de la infraestructura, de los estándares de mantenimiento a nivel de red y de proyecto, de las políticas de mantenimiento adoptadas y del resultado esperado [27].

5.2.1.1 Enfoque 3R: Restauración, Rehabilitación y Reconstrucción

Las estrategias de mantenimiento se pueden clasificar de distintas formas en función de sus propósitos.

La organización más usada en pavimentos es la agrupación de estrategias en tres: restauración, rehabilitación y reconstrucción. (Clasificación también se conoce como 3R o RRR).

Las estrategias de restauración actúan en etapas tempranas en el ciclo de vida del pavimento, y están orientadas a la prolongación de la vida del pavimento, por lo cual es de carácter preventivo.

Por otra parte, las actividades de rehabilitación actúan cuando la condición del pavimento manifiesta la necesidad de recuperar la serviciabilidad del pavimento, es por esto que dependiendo de grado de intervención puede ser preventiva o reactiva, en donde en ambos casos se busca recuperar la serviciabilidad [26].

En cambio, las operaciones de reconstrucción por su parte se refieren al reemplazo parcial o total del pavimento cuando se ha cumplido la vida útil de éste y es necesario sustituirlo para recuperar su serviciabilidad [26].

Las estrategias de restauración prolongan la vida de servicio, pero no implica un incremento en la serviciabilidad del pavimento cuando se aplican. En cambio, en el caso de la rehabilitación o reconstrucción al aplicar las operaciones de mantenimiento se espera como resultado recuperar o mejorar la serviciabilidad del pavimento inmediatamente después de ejecutada la intervención, lo cual permite prolongar la vida de servicio, pero a un costo de inversión mayor[26].

Las operaciones de restauración tienen como principal objetivo restaurar la capa de rodadura cuando presenta los primeros indicios de deterioro. Su aplicación es permanente en el tiempo y estas son de bajo costo en comparación con las otras estrategias de mantenimiento. Por ende, protegen a la estructura de un deterioro acelerado permite que las operaciones de mantenimiento futuras sean de un menor costo. Estas operaciones se denominan, normalmente, mantenimiento rutinario [26].

Por otra parte, la rehabilitación proporciona una nueva superficie de rodadura, aumenta la comodidad al conducir, la seguridad y la resistencia al desplazamiento. Las operaciones de rehabilitación aportan una capacidad estructural adicional al pavimento lo que significa que la vida útil se ve acrecentada [26], [27].

La reconstrucción consiste en la reposición total del pavimento, cuando esté ha quedado funcional y estructuralmente obsoleto. Es por esto que la reconstrucción busca reemplazar parte o la totalidad de las capas del pavimento.

En la Tabla 5.5 se presentan los resultados esperados de cada estrategia.

Tabla 5.5: Resultados Esperados de la aplicación de estrategias 3R [26].

Estrategias	Aumento de capacidad	Aumento de resistencia	Reducción del envejecimiento	Restauración de deterioro
Restauración			x	x
Rehabilitación		x	x	x
Reconstrucción	x	x	x	x

5.2.1.2 El Enfoque del Manual de Carretera de Chile

En el Manual de Carreteras Volumen 7: “Mantenimiento Vial” se describen las operaciones de mantenimiento, en donde se agrupan por periodicidad y según el sistema de ejecución en operaciones rutinarias, periódicas y eventuales.

Bajo el enfoque de las 3R, se pueden relacionar las estrategias de operaciones de mantenimiento que establece el Manual de Carreteras. En donde, las operaciones rutinarias se ejecutan cada año con intervalos regulares y tiene como objetivo la conservación, limpieza y buen funcionamiento de la obra física. Entre ellas se cuentan: limpieza de faja, limpieza de obras de drenaje, reperfilado de capas granulares, bacheos, reparaciones y reemplazo de señaléticas, reemplazo de barreras de contención, etc. Estas operaciones de mantenimiento rutinario bajo el enfoque de preservación del pavimento son equivalentes a las estrategias de restauración[26], [27].

Las operaciones periódicas, corresponden a ajustes cíclicos, a distintos intervalos de tiempo con el fin de corregir fallas o prevenir daños mayores, causados por el clima, tráfico y tiempo de servicio, por lo que se puede clasificar como una operación de tipo preventivo en donde bajo el enfoque 3R también corresponden a obras de restauración. Entre las operaciones periódicas se cuentan: recebo de capas granulares (acción de agregar material para la capa de rodadura como reemplazo del que se ha perdido por la acción del tránsito y/o las acciones meteorológicas), sellado asfáltico, reparación de defensas fluviales, etc. estas operaciones son de carácter preventivas, o eventualmente de rehabilitación menor [27].

En cambio, las operaciones eventuales corresponden a aquellas derivadas de actividades no recurrentes, como son aquellas operaciones relacionadas con emergencias por lo que no están programadas. Como por ejemplo despeje de derrumbes, colocación de puentes modulares, control de inundaciones, etc.

Sin embargo, el Manual de Carreteras también define, según la intensidad o el grado de intervención las operaciones de rehabilitación y reposición que equivalen a la rehabilitación, mientras que las operaciones de reconstrucción bajo el enfoque de 3R son equivalentes a una rehabilitación mayor y reconstrucción total o parcial bajo el enfoque de preservación de pavimentos[27].

De este modo se puede decir que las operaciones rutinarias, periódicas y eventuales definidas en el Manual de Carreteras Vol. 7 corresponden a operaciones de restauración, siendo totalmente compatibles el enfoque 3R descrito.

En la siguiente Tabla 5.6 se resumen las operaciones de mantenimiento más comunes según cada categoría de mantenimiento, para pavimentos asfálticos:

Tabla 5.6: Operaciones de mantenimiento de pavimento Asfáltico (MOP, 2019) [27].

Estrategias	Operación de Mantenimiento
Restauración	Reemplazo de carpeta de rodadura Bacheo Superficial o Profundo Tratamientos Superficiales Sellado de Grietas
Rehabilitación	Recapado de hormigón Recapado asfáltico
Reconstrucción	Reconstrucción por capas Reconstrucción mediante reciclado

5.2.2 Propuesta de Mantenimiento del para los Tamos de Estudio

Una vez establecidos y determinadas las operaciones de mantenimiento dispuestas por el Manuel de Carretera, se propone realizar operaciones de mantenimiento en función de los resultados obtenidos de la vida útil de los tramos de estudio (sección 3.4).

- Para el Tramo 1, en donde la vida útil pavimento sería mayor se realizan operaciones de mantenimiento de restauración (rutinario): bacheo y reemplazo de barreras de contención.
- Para el Tramo 2, se establecen operaciones de mantenimiento de reconstrucción equivalente a una rehabilitación mayor, debido a que en este tramo se superaría la vida útil del pavimento.

5.2.2.1 Bacheo

Para el mantenimiento rutinario se propone un bacheo superficial que consiste en la reparación de agujeros irregulares existentes en el pavimento producto del efecto combinado del agrietamiento localizado, problemas locales en la subrasante, base y/o subbase y elementos afectados por el efecto combinado del clima y de las sobrecargas del tránsito[26].

El bacheo superficial se aplica cuando:

- Existen áreas del pavimento en que se entremezclan grietas y fisuras, así como trozos separados y sueltos de poca profundidad.
- Baches poco profundos, de menos de 50 [mm].
- Desplazamientos localizados de asfalto.

La operación de bacheo superficial, que consiste en la colocación de un parche superficial de una capa de mezcla asfáltica directamente sobre la zona con el pavimento dañado. Se puede disponer usando mezcla en caliente o en frío.

En el siguiente capítulo se establecerán las partidas de forma general correspondientes a esta operación rutinaria de mantenimiento.

5.2.2.2 Reconstrucción por Capas

La reconstrucción por capas consiste en reemplazar el pavimento existente, incluyendo la base y la subbase por un pavimento nuevo sin aumentar la cota dependiendo si se requiere una mayor capacidad estructural o no.

Este tipo de operaciones permite corregir características como la capacidad estructural del pavimento, condición que se requiere corregir en el Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado, donde las solicitudes del tráfico proyectado serían mayores que las de diseño.

Por ende, se propone establecer una reconstrucción por capas, para los espesores originales y otra para espesores obtenidos en función de las solicitudes del tráfico proyectado, para estudiar la influencia del costo de mantenimiento en la tasa de peaje.

6 INFLUENCIA DEL COSTO DEL MANTENIMIENTO EN LA TASA DE PEAJE

En este capítulo se presentarán estimaciones de los presupuestos de construcción y mantenimiento con el objetivo de establecer el costo por la utilización de la infraestructura vial, por ende, este análisis no pretende explicitar en forma exacta los costos de mantención y construcción, pero sí tener una estimación de ello y como éstos influyen en la tasa de peajes.

Entonces, se presentará el presupuesto de un mantenimiento rutinario y una rehabilitación mayor requerido para cada tramo de estudio. Además, se exponen los costos para una rehabilitación mayor para el Tramo 2 con el paquete estructural modificado, para analizar la varios de los precios de dicho mantenimiento.

Por otra parte, para la construcción de los presupuestos se utilizaron los precios de referencia que se manejan el Servicio de Viviendas y Urbanización de Valparaíso (SERVIU) en el documento oficial de “Listado de valores referenciales de costos de construcción para obras nuevas para el año 2018” con precios actualizados del año 2020 y 2021 [28].

6.1 PRESUPUESTOS DE OPERACIONES DE MANTENIMIENTO Y CONSTRUCCIÓN

A continuación, se presentarán los presupuestos preliminares de construcción y mantención de la Ruta 68 con la configuración del paquete estructural original con el objetivo de tener una estimación del costo de construcción de la carretera y posteriormente generar una estimación del cobro de la tasa de peaje que se realiza por la utilización de la infraestructura.

Por otra parte, con el fin de simplificar el análisis se establecen las partidas más comunes y representativas en función al costo según presupuestos de referencia de conservación y rehabilitaciones de caminos publicados en Mercado Público [29], como la preparación del terreno, movimiento de tierras, y el costo de las capas del pavimento asfáltico.

6.1.1 Presupuesto Construcción

En Tabla 6.1 se presenta a continuación una estimación del presupuesto de construcción de la Ruta 68 que tiene una extensión de 110 km. El paquete estructural considerado en este caso fue el del Tramo 1, dado que este presenta la mayor resistencia en ambos tramos analizados.

Tabla 6.1: Presupuesto del Construcción de la Ruta 68.

Construcción					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Precio Total
I A.- Preparación de Área de trabajo					
a.1	Despeje y Limpieza de Faja	Km	110	\$ 800.000	\$ 88.000.000
a.2	Retino Manual de Basura y Desechos	mes	24	\$ 2.662.838	\$ 63.908.112
a.3	Remoción de Pavimento Asfáltico	m2	1540000	\$ 5.200	\$ 8.008.000.000
a.4	Remoción de Barreras de Contención Laterales	m	110000	\$ 7.800	\$ 858.000.000
a.5	Remoción de Tachas	N°	18400	\$ 5.200	\$ 95.680.000
Sub total I					\$ 9.113.588.112
II B.-Movimiento de Tierra					
b.1	Relleno estructural (incorpora material) e=0,1	m3	154000	\$ 21.700	\$ 3.341.800.000
b.2	Excavación con retroexcavadora (incluye transporte a botadero).	m3	600600	\$ 1.572	\$ 944.143.200
b.3	Compactación y perfilado suelo natural.	m2	1540000	\$ 5.600	\$ 8.624.000.000
b.4	Preparación de la subrasante.	m2	1540000	\$ 3.040	\$ 4.681.600.000
b.5	Emparejamiento y compactación de veredones en tierra	m2	1540000	\$ 4.900	\$ 7.546.000.000
b.6	Retiro de excedentes	m3	600600	\$ 4.500	\$ 2.702.700.000
Sub total II					\$ 27.840.243.200
III C.- Capas Granulares					
c.1	Base Granular, CBR ≥ 80%	m3	154000	\$ 19.245	\$ 2.963.730.000
c.2	Base Asfáltica e = 0.1 m	m3	154000	\$ 260.000	\$ 40.040.000.000
Sub total III					\$ 43.003.730.000
IV D.- Pavimento Asfáltico					
d.1	Riego de Liga	m2	1540000	\$ 1.280	\$ 1.971.200.000
d.2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	m3	123200	\$ 247.000	\$ 30.430.400.000
d.3	Concreto Asfáltico de Rodadura	m3	77000	\$ 260.000	\$ 20.020.000.000
Sub total IV					\$ 52.421.600.000
Total Gral:					\$ 132.379.161.312

Fuente: Propia

6.1.2 Presupuesto de Mantenimiento de Restauración: Bacheo Superficial

En el caso del presupuesto del Mantenimiento de Restauración (o rutinario) de la Tabla 6.2 se propone realizar un bacheo superficial a lo largo del camino En este caso se consideró una restauración parcial en un periodo de 1 año con una extensión de 3 km aprox. del camino.

Tabla 6.2: Presupuesto de Mantenimiento Rutinario de la Ruta 68.

Operación de Mantenimiento Rutinaria de Restauración: Bacheo Superficial					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Precio Total
I A.- Preparación de Área de trabajo					
a.1	Despeje y Limpieza de Faja	Km	25	\$ 800.000	\$ 20.000.000
a.2	Retino Manual de Basura y Desechos	mes	12	\$ 2.662.838	\$ 31.954.056
a.3	Remoción de Pavimento Asfáltico	m2	10780	\$ 5.200	\$ 56.056.000
Sub total I					\$ 108.010.056
II B.- Movieminto de Tierra					
b.1	Compactación y perfilado suelo.	m2	10780	\$ 5.600	\$ 60.368.000
Sub total II					\$ 60.368.000
III C.- Pavimento Asfálticos					
c.1	Bacheo Superficial Manual con Mezcla en Caliente	m2	10780	\$ 20.392	\$ 219.825.760
c.2	Sello Localizado con Lechada	m2	10780	\$ 7.600	\$ 81.928.000
c.3	Nivelación de berma granulares no revestidas en pavimentos asfálticos	m2	10780	\$ 3.613	\$ 38.948.140
Sub total III					\$ 340.701.900
Total Gral:					\$ 509.079.956

Fuente: Propia

6.1.3 Presupuesto del Mantenimiento de Rehabilitación Mayor: Reconstrucción por Capa

A continuación, se presenta el presupuesto del mantenimiento mayor para ambos tramos de estudio considerando un periodo de un año que equivale a una extensión de 3 km aproximadamente.

Tabla 6.4: Tabla del Presupuesto de Mantenimiento Mayor del Tramo 1: Plaza de peajes Troncal Zapata.

Operación de Mantenimiento Rehabilitación Mayor, Tramo 1: Plaza de Peajes Troncal Zapata					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Precio Total
I A.- Preparación de Área de trabajo					
a.1	Retino Manual de Basura y Desechos	mes	12	\$ 2.662.838	\$ 31.954.056
a.2	Remoción de Pavimento Asfáltico	m2	43120	\$ 5.200	\$ 224.224.000
a.3	Remoción de Barreras de Contención Laterales	m	43120	\$ 7.800	\$ 336.336.000
a.4	Remoción de Tachas	N°	1000	\$ 5.200	\$ 5.200.000
Sub total I					\$ 597.714.056
II B.-Movimiento de Tierra					
b.1	Excavación con retroexcavadora (incluye transporte a botadero).	m3	16816,8	\$ 1.572	\$ 26.436.010
b.2	Compactación y perfilado suelo natural.	m2	43120	\$ 5.600	\$ 241.472.000
b.3	Emparejamiento y compactación de veredones en tierra	m2	43120	\$ 3.040	\$ 131.084.800
Sub total II					\$ 398.992.810
III C.- Capas Granulares					
c.1	Base Granular, CBR ≥ 80%	m3	6899,2	\$ 19.245	\$ 132.775.104
c.2	Base Asfáltica	m3	4312	\$ 260.000	\$ 1.121.120.000
Sub total III					\$ 1.253.895.104
IV D.- Pavimento Asfáltico					
d.1	Riego de Liga	m2	43120	\$ 1.280	\$ 55.193.600
d.2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	m3	3449,6	\$ 247.000	\$ 852.051.200
d.3	Concreto Asfáltico de Rodadura	m3	2156	\$ 260.000	\$ 560.560.000
Sub total IV					\$ 1.467.804.800
Total Gral:					\$ 3.718.406.770

Fuente: Propia

Tabla 6.4: Tabla del Presupuesto de Mantenimiento Mayor del Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado

Operación de Mantenimiento Rehabilitación Mayor, Tramo2 : Plaza de Peaje Lo Prado					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Precio Total
I A.- Preparación de Área de trabajo					
a.1	Retino Manual de Basura y Desechos	mes	12	\$ 2.662.838	\$ 31.954.056
a.2	Remoción de Pavimento Asfáltico	m2	43120	\$ 5.200	\$ 224.224.000
a.3	Remoción de Barreras de Contención Laterales	m	43120	\$ 7.800	\$ 336.336.000
a.4	Remoción de Tachas	N°	1000	\$ 5.200	\$ 5.200.000
Sub total I					\$ 597.714.056
II B.-Movimiento de Tierra					
b.1	Excavación con retroexcavadora (incluye transporte a botadero).	m3	15954,4	\$ 1.572	\$ 25.080.317
b.2	Compactación y perfilado suelo natural.	m2	43120	\$ 5.600	\$ 241.472.000
b.3	Emparejamiento y compactación de veredones en tierra	m2	43120	\$ 3.040	\$ 131.084.800
Sub total II					\$ 397.637.117
III C.- Capas Granulares					
c.1	Base Granular, CBR ≥ 80%	m3	6468	\$ 19.245	\$ 124.476.660
c.2	Base Asfáltica	m3	4312	\$ 260.000	\$ 1.121.120.000
Sub total III					\$ 1.245.596.660
IV D.- Pavimento Asfáltico					
d.1	Riego de Liga	m2	43120	\$ 1.280	\$ 55.193.600
d.2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	m3	3018,4	\$ 247.000	\$ 745.544.800
d.3	Concreto Asfáltico de Rodadura	m3	2156	\$ 260.000	\$ 560.560.000
Sub total IV					\$ 1.361.298.400
Total Gral:					\$ 3.602.246.233

Fuente: Propia

6.1.3.1 Consideraciones de Costos en la selección de Espesores de las Capas

Como se mencionó anteriormente en el Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado el paquete estructural no cumple con la condición de la ecuación (4.4) que, establece que el número estructural alcanzado sea mayor o igual al requerido, si se le aplica las proyecciones de carga realizadas con los (INE) [23], que representa un 38% más que las cargas del diseño original. Entonces, con el objetivo de aumentar la capacidad estructural, se modifican y posteriormente se verifica el paquete estructural.

En este caso se modificó la capa base granular y se establece un espesor de 205 [mm], teniendo en consideración los redondeos recomendados, espesor mínimo por el Manual de Carreteras y el determinado en este trabajo (201 [mm]), y que cumpla con la ecuación (4.4).

Como en la Tabla 6.5 se muestran los resultados de verifica el paquete estructural del Tramo 2 manteniendo los espesores originales de las capas superiores y aumentando a 205 [mm] la capa de la base granular.

Tabla 6.5 : Verificación del paquete estructural del Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado, modificando la capa base granular.

Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado							
Nombre de Capa	Coefficiente Estructural (α)	Coefficiente de Drenaje (mi)	Espesores Especificados(mm)	Espesores Calculados (mm)	Número Estructural (mm)	Espesor Asumido (mm)	Número Estructural (mm)
Capa Asfáltica Superior	0,43	1	50	50	22	50	22
Capa Asfáltica Interior	0,41	1	70	70	29	70	29
Base Asfáltica	0,33	1	100	100	33	100	33
Base Granular	0,13	1,2		201	31	205	32
NE alcanzado					115	NE requerido	115

Por otra parte, también se busca modificar otra capa del paquete estructural del Tramo 2, con el objetivo de analizar el costo al aumentar la resistencia del paquete estructural de distintas capas. En la Tabla 6.6 se presenta la verificación al modificar la capa asfáltica intermedia de 70 [mm] a 90 [mm], en donde se cumple las recomendaciones de redonde por el Manual de Carretera y con la ecuación (4.4).

Tabla 6.6: Verificación del paquete estructural del Tramo 2: Plaza de peajes Lo Prado, modificando la capa asfáltica intermedia.

Tramos 2: Plaza de Peaje Lo Prado							
Nombre de Capa	Coefficiente Estructural (α)	Coefficiente de Drenaje (mi)	Espesores Especificados(mm)	Espesores Calculados (mm)	Número Estructural (mm)	Espesor Asumido (mm)	Número Estructural (mm)
Capa Asfáltica Superior	0,43	1	50	50	22	50	22
Capa Asfáltica Interior	0,41	1	70	70	29	90	37
Base Asfáltica	0,33	1	100	100	33	100	33
Base Granular	0,13	1,2		201	31	150	23
NE alcanzado					115	NE requerido	115

Una vez establecidos y verificados las combinaciones de los espesores se analiza la influencia del consto de una rehabilitación mayor: reconstrucción por capas; teniendo en cuenta como precio referencial el costo del paquete estructural original que se presentó en la Tabla 6.4.

Tabla 6.7: Diferencias entre los costos del Mantenimiento Mayor modificando los espesores del paquete.

Diferencias de Costos			
Tramo 2: Plaza de Peaje lo Prado	Valor Paquete Estructural [\$]	Diferencia [\$]	Diferencia [%]
Paquete Estructural Original	\$ 3.602.246.233		
Paquete Estructural Modificado Capa Base Granular	\$ 4.021.027.046	\$ 418.780.813	12%
Paquete Estructural Modificado Capa Asfáltica Intermedia	\$ 3.816.614.726	\$ 214.368.493	6%

Fuente: Propia

Como se presenta en la Tabla 6.7 si se modifica la capa base granular la diferencia con respecto al presupuesto del paquete estructural original es de un 13% que equivalente alrededor de 418 millones de pesos, mientras que modificando la capa asfáltica intermedia se presenta una diferencia del 6% en comparación al valor original.

Así mismo, esta alza de precios en el costo del mantenimiento se puede explicar como consecuencia del aumento en el número estructural requerido por el incremento de las solicitudes; donde en un principio el NE requerido es de 106 [mm] para el paquete original y modificado tanto la capa base granular y asfáltica intermedia el NE requerido es de 115 [mm].

6.2 INFLUENCIA EN EL VALOR DE LOS PEAJES

En este punto se tomarán todos los valores anteriormente propuestos para realizar una estimación del costo de la inversión total de la Ruta 68 con el objetivo de presentar un procedimiento para poder calcular el costo por pasada de los vehículos en función de la inversión total y de los mantenimientos propuestos.

Por lo tanto, las consideraciones para establecer el costo total de la Ruta 68 son:

- El costo de la construcción de 110 km de la Ruta 68.
- Se estima una tasa de interés promedio del 2.5 % total de la construcción en función a la tasa de interés del Banco Mundial en el periodo del 2015 al 2019 [30].
- Un mantenimiento rutinario que cubra el 70% de la totalidad de la ruta anualmente durante 25 años de concesión.
- Un mantenimiento de rehabilitación mayor de 75 % del total de la carretera en los 25 años de concesión.
- Se considera el 15% de utilidades del presupuesto en función a referencia de presupuesto de rehabilitación y mejoramientos de caminos de la quinta región publicados en Mercado Público [29]

Todas estas consideraciones están resumidas en la Tabla 6.8 que presentan el costo estimado final de la Ruta 68, en donde se obtuvo un valor aproximado de 702 mil millones de pesos. En el siguiente punto se presentará los resultados estimados del costo por circulación según el volumen de tránsito vehicular obtenido del INE [23].

Tabla 6.8: Resumen de costos de inversión y mantenimientos.

Análisis de Costos	
Descripción	Valor
Costo de Construcción	\$ 132.379.161.312
Interés 2.5 % anual en los 25 años	\$ 82.736.975.820
Costo total de mantenimiento rutinario anual de la carretera en los 25 años.	\$ 287.002.538.900
Costo total de mantenimiento de rehabilitación mayor de la carretera en 25 años.	\$ 108.606.374.136
Utilidades 15 %	\$ 91.608.757.525
Total	\$ 702.333.807.693

Fuente: Propia

Nota: La consideración del porcentaje de mantenimiento rutinario y de rehabilitación mayor se obtuvieron de valores referenciales de la literatura [26], [31].

6.2.1 Costos de Circulación

Con todas las consideraciones que se mencionaron se procede a calcular el precio por pasada en función de la cantidad de vehículos que transitan por la autopista. Teniendo en cuenta en una primera instancia del análisis solo la cantidad de vehículos que circulan por las plazas de peajes independiente del tipo de vehículo.

En la Tabla 6.9 se muestra un resumen del tránsito vehicular de ambas plazas de peajes en el periodo del 2015 al 2018., de la cual se determina el promedio anual de los vehículos que transitan por las plazas de peajes de 12.756.441 vehículos.

Tabla 6.9: Datos obtenidos del INE del tránsito vehicular de cada plaza de peaje del año 2015 al 2018. Anexo1 [24].

PLAZA DE PEAJE TRONCAL ZAPATA (REGIÓN 05)							
Suma de Total	TIPO DE VEHÍCULO (pasadas de vehículos)						
	Año	Total de Auto - Camioneta	Total de AutoCarro	Total de CamionDosEjes	Total de CamionTresMasEjes	Total de BusDosEjes	Total de BusTresMasEjes
10.947.140	2015	9.053.493	23.942	577.965	751.353	413.473	126.914
11.598.703	2016	9.649.047	33.014	604.604	751.623	443.687	116.728
11.995.673	2017	9.926.025	49.126	591.034	856.898	443.573	129.017
12.336.653	2018	10.327.912	9.946	563.823	846.515	452.265	136.192

PLAZA DE PEAJE LO PRADO (REGIÓN 05)							
Suma de Total	TIPO DE VEHÍCULO (pasadas de vehículos)						
	Año	Total de Auto - Camioneta	Total de AutoCarro	Total de CamionDosEjes	Total de CamionTresMasEjes	Total de BusDosEjes	Total de BusTresMasEjes
12.810.927	2015	10.661.994	22.851	663.953	772.299	555.669	134.161
13.653.581	2016	11.410.134	47.427	701.848	779.959	590.654	123.559
14.164.641	2017	11.789.562	73.470	683.179	883.905	605.700	128.825
14.544.616	2018	12.267.771	28.451	661.398	862.428	593.103	131.465

Por parte, en la Tabla 6.10 se presentan los resultados obtenidos del costo anual de la inversión de 28 mil millones de pesos aproximadamente, este valor se obtiene dividiendo el costo total de la inversión en los 25 años de concesión.

Tabla 6.10: Costos de anual de la inversión y mantención anual de la carretera y el costo de circulación por vehículo.

Descripción	Valor
Costo de total de inversión y el mantenimiento por año	\$ 28.093.352.308
Valor pasado vehicular	\$ 2.202

Fuente: Propia

Por lo tanto, el costo por transitar en la carretera independiente del tipo de vehículos se obtiene dividiendo el costo de inversión anual por el promedio anual de vehículos que circula por la Ruta 68, obteniendo un valor de circulación por pasada alrededor de \$2.200.

Teniendo en cuenta este valor como referencia, se busca determinar el precio para las diferentes categorías de vehículos y posteriormente comparar los precios de las plazas de peajes de estudio.

Para esto se establecen factores de comparación para cada tipo de vehículo en función al peso. En donde los vehículos más livianos que corresponden a auto, camiones con y sin remolquen serán el peso de referencia (categoría Tipo A). En la Tabla 6.11 se presentan los valores determinados por circulación para las distintas categorías.

Tabla 6.11: Valores determinados por circulación en la Ruta 68, determinados con el Factor de comparación.

Categoría	Tipo de vehículos	Factor	Valor [\$]
A	Automóviles, camionetas, furgones con uno más ejes adicionales	1	\$2.202
B	Camiones y buses de dos ejes	5,72	\$12.597
C	Camiones y Buses de más de dos ejes	16,72	\$36.822

Fuente: Propia

Por otra parte, se pueden tener valores de referencia de estimaciones de la tasa de peajes la Tabla 6.12 que, fue desarrollada para Chile y publicada en la revista N°67 de la CEPAL, en donde se categoriza a los a los vehículos en función del peso, es decir desde el más liviano hacia el más pesados. Esta tabla se creó con el fin de determinar el pago que realizan las distintas categorías de vehículos en autopistas en relación con el daño que cada una de ellas provoca a la infraestructura [32].

Tabla 6.12: Tabla de multiplicadores de las tarifas de peajes por categorización de vehículos [32].

CHILE: RELACIONES ENTRE CATEGORÍAS DE PEAJE			
Categoría de vehículo	Tipo de vehículos	Peaje (USD/Km)	Multiplicador de tarifa
1	Automóvil, camioneta y furgón	0,0231	1,00
2	Automóvil y camioneta con remolque	0,0347	1,50
3	Camión leve y ómnibus de 2 ejes	0,0416	1,80
4	Ómnibus de más de 2 ejes	0,0717	3,10
5	Camión de más de 2 ejes	0,0925	4,00

Además, en la Tabla 6.12 el precio del peaje se encuentra en función de dólar por kilómetro recorrido por ende permite tener una referencia global y rápida para determinar el precio por kilómetro.

En este caso se ha utilizado el precio del dólar de 800 CLP y una extensión de 110 km (distancia aproximada que existe entre las dos plazas de peajes) en donde los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13: Tabla de multiplicadores de las tarifas de peajes evaluada con 110 Km y 800 CLP [32].

Categoría de vehículos	Tipo de vehículos	Peaje [USD/ Km]	Multiplicador de Tarifa	Peaje [1/km]	Valor Peaje CLP
1	Automóvil y camioneta con remolque	0,0231	1,0	18,48	\$2.033
2	Automóvil, camioneta y furgón	0,0347	1,5	27,76	\$4.580
3	Camión y ómnibus de 2 Ejes	0,0416	1,8	33,28	\$6.589
4	Ómnibus de más de 2 ejes	0,0717	3,1	57,36	\$19.560
5	Camión de más de 2 ejes	0,0925	4,0	74	\$32.560

Como se muestra en la Tabla 6.13 el precio de un vehículo de primera categoría que sería un automóvil o camioneta sería alrededor de \$2.033.

Con respecto a los valores de la tasa de peaje de la concesionaria, hoy en día el cobro está discretizado no tan solo en el tipo de vehículo si no también en la modalidad de pago (con o sin TAG, Manual e infractores) y del horario y día de la semana que se transite, como se puede ver en el boletín del Anexo II.

Tabla 6.14: Extracto de boletín de “Tarifas para peajes 2022 de la Ruta 68, para usuarios con TAG o pago manual”, Anexo II.

Tarifas para usuarios con TAG habilitado o que utilicen las vías de pago manual					
Categorías	Tipo de vehículo	Tarifa Troncales Zapata y Lo Prado		Tarifas troncales Zapata y Lo Prado	Tarifal Troncal Sur
		Normal	Fin de Semana		
Tipo A	Autos, Camionetas y station Wagon con uno o más ejes adicionales	\$2.200	\$3.300	\$900	\$900
Tipo B	Camionetas y Buses de dos ejes, Maquinas Agrícola, de construcción y camionetas doble rueda trasera	\$4.000	\$6.000	\$1.600	\$1.600
Tipo C	Camiones y Buses de mas de dos ejes	\$7.100	\$10.600	\$2.800	\$2.800
Tipo D	Motos	\$700	\$1.000	\$300	\$300

En esta parte del trabajo, se enfocará en el cobro de la tarifa “Normal” de los peajes troncales que son los tramos de estudios como se ve en la Tabla 6.14.

En la Tabla 6.14 se muestra la discretización por categoría que utiliza la concesionaria de la Ruta 68 que son Tipo A, B, C y el precio asociado a cada una de ella. Por otra parte, la categoría tipo D no se utilizará para el análisis dado que son motos y esta no han sido consideradas en el cálculo.

Como la categorización establecida por la CEPAL son distintas a las categorías de las concesionarias y establecidas en este trabajo, se utilizó por las categorías 1, 4 y 5 que son equivalentes a la clasificación de tipo de vehículos que se está comparando. Se muestra en la Tabla 6.15

Tabla 6.15: Tabla con las categorizaciones equivalentes asociados a los tipos de vehículos y el cálculo del costo del peaje en los distintos casos.

Categoría Concesionaria	Tipo de vehículos	Valores obtenidos	Valor Peaje CEPAL	Valor Peaje Normal Concesionaria	Comparación con los valores obtenidos [%]	Comparación con valores de la CEPAL [%]
A	Automóviles, camionetas, furgones con uno más ejes adicionales	\$2.202	\$2.033	\$4.400	-100%	8%
B	Camiones y buses de dos ejes	\$12.597	\$19.560	\$8.000	36%	-55%
C	Camiones y Buses de más de dos ejes	\$36.822	\$32.560	\$14.200	61%	-12%

Fuente: Propia

Con el fin de tener una relación entre los cobros, se estimaron los costos por pasada por las dos plazas de peajes (Troncal Zapata y Lo Prado) donde cada plaza de peaje cubre una longitud aproximada de 54 km.

Por otra parte, los valores estimados con la tabla de la CEPAL se calcularon con una distancia recorrida igual a la considerada para los costos en este estudio.

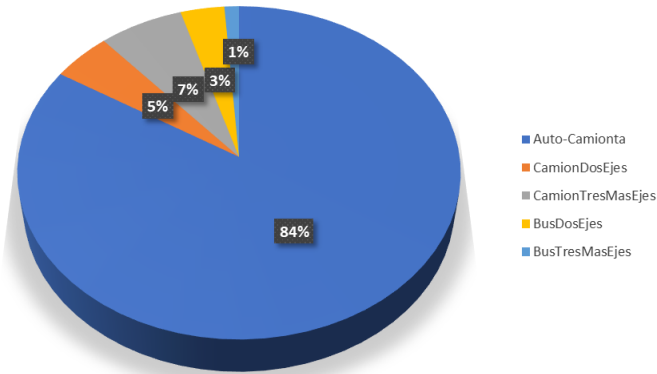
En este trabajo, el valor base para el cobro a los vehículos Tipo A por transitar por la Ruta 68 es de \$2.202 pesos (considerando las dos plazas de peajes).

Entonces, a fin de determinar las diferencias se compararán los valores de la concesionaria y los de la CEPAL con los precios establecidos en este trabajo, es decir, que para la primera categoría de vehículos Tipo A, los vehículos más livianos, el valor obtenido en este trabajo es de \$2.202, el costo propuesto por CEPAL es de \$2.033 y el de la concesionaria \$4.400. Por lo tanto, el precio de la concesionaria presenta una diferencia del 100% con respecto a los valores de este trabajo, mientras que el valor propuesto en este trabajo sería un 8% más caro que el valor propuesto por la CEPAL.

Para los vehículos Tipo B, vehículos de mayor peso, el valor determinado en este trabajo es de \$12.597, el valor de la CEPAL es igual a \$19.560 y el valor cobrado por la concesionaria es de \$8.000. Con estos valores, se obtiene que el precio de la concesionaria estarían un 36 % debajo del precio estimado en este trabajo y el de la CEPAL es un 55 % más alto.

Completando, para categoría Tipo C vehículos de mayor capacidad y peso en este trabajo se obtuvo un valor de \$36.822, el costo de la CEPAL es de \$32.560 y el de la concesionaria de \$14.200, lo que lleva a que el precio de las concesionarias sea 61 % más barato con respecto al precio obtenido en este trabajo y con respecto a la CEPAL la diferencia es 12% más barato.

Tránsito promedio según el tipo de vehículo del Tramo 1: Plaza de Peaje Zapata



Tránsito promedio según el tipo de vehículo del Tramo 2: Plaza de Peaje Lo Prado

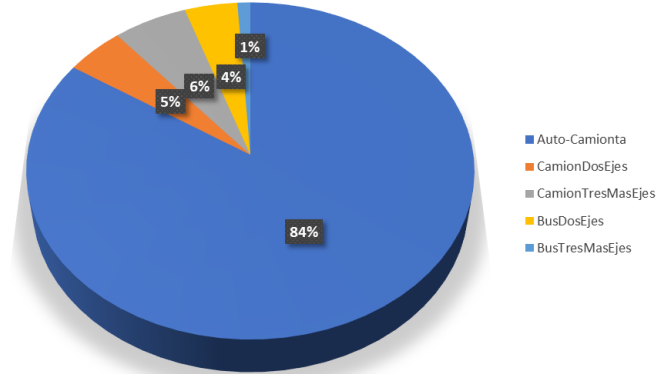


Figura 6.1: Gráfico del tránsito promedio porcentual según el tipo de vehículos de ambas plazas de peajes de estudio.

En función de estos resultados es importante conocer el porcentaje que cada tipo de vehículos que está transitando en la autopista concesionada, el cual podemos ver en la Figura 6.1, en donde ambas plazas de peajes tienen un comportamiento similar en la distribución de la flota de vehículos que transita por ella, con el fin de conocer los tipos de automóvil que tiene mayor presencia en la autopista.

En donde, se puede ver que en Figura 6.1 muestra que los vehículos con mayor presencia corresponden a la categoría de Tipo A para ambas plazas de peajes que representan la mayor diferencia en cobro de la tasa de peajes.

En donde los peajes que están pagando los vehículos livianos es el doble a los estimados en este trabajo, mientras que para las categorías más pesadas estos estarían pagando menos.

7 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Cabe señalar, que los valores utilizados en los estudios siempre estarán influenciados por la incertidumbre de alguna variable, incerteza que es difícil de reducir debido a la naturaleza de los datos, como es el caso de los parámetros de diseño de los suelos, que son materiales naturales que no han tenido un control de calidad en su formación, el volumen del tráfico que puede estar afectado por condiciones económicas y de generación de volúmenes de carga. Por lo tanto, toda variable que influye a los parámetros de diseño que no son controladas aumentan el sesgo en el análisis de los resultados.

Es por lo anterior que el objetivo de este trabajo de título fue estudiar la influencia del nivel de confianza sobre los diseños del pavimento de dos tramos de la Ruta 68 que une Valparaíso con Santiago, donde se determinó la influencia de la sensibilidad entre los parámetros de diseño sobre la vida útil del pavimento. En donde se obtuvo, que a un mayor nivel de confianza en el diseño exige mayores espesores en el paquete estructural, por lo tanto, es importante la determinación del nivel de confianza ya que una mala estimación de ella implica costos adicionales durante la construcción y operación de la carretera.

Por otra parte, se realizó una propuesta de mantenimiento en que se analizaron los costos correspondientes, determinados en este trabajo, y la incidencia que tienen en la tasa de peaje. En donde se concluyó que la tasa de peaje absorbe el 56% de los costos de mantenimiento. Por lo que es importante establecer la vida útil del pavimento, para que éstos no presenten mantenimiento inadecuado que puedan traer costos excesivos para los usuarios.

En este trabajo de título se realizó un diseño comparable al diseño original de los tramos estudiados de la Ruta 68, lo que dio los siguientes resultados:

- Tramo 1: Plaza de peaje Zapata, tiene un menor tráfico de acuerdo con la información otorgada por el INE [23], por lo tanto, en este caso se tendría una vida útil mayor, dado que el nivel de carga es menor que el de diseño original.

-Tramo 2: Plaza de peaje Lo Prado presenta un mayor tráfico, respecto de lo que informa el INE [23], entonces se espera que en este tramo el pavimento falle antes de alcanzar la vida útil de diseño.

Con estos resultados se concluye que el Tramo 1 necesitará mantenimiento rutinario y el Tramo 2 un mantenimiento periódico, si se consideran sólo los 20 años de vida útil que se estableció en el diseño original de ambos tramos.

Cabe señalar que, la concesión dura un periodo de 25 años, debido a que la información disponible no es suficiente, se sugirió un sistema de gestión para el mantenimiento que cubre dicho periodo (Capítulo 5: Análisis de Estrategias de Mantenimiento).

Se propuso una metodología para el cálculo del valor de las tasas de peaje en función de los parámetros estudiados en este trabajo, en donde se asumieron los costos de las tasas de interés, utilidades y frecuencia del mantenimiento, obteniéndose el precio referencial por circulación de la Ruta 68.

Se compararon los resultados obtenidos del costo de circulación con las tarifas de la concesionaria, en donde se obtuvo que:

1.- Para la categoría de vehículos más livianos Tipo A, la concesionaria por transitar por ambas plazas de peaje cobra \$4.400, y el costo de circulación calculado en este trabajo es de \$2.202 y con respecto a la CEPAL este valor es de \$2032.

Por lo tanto, se puede concluir que la tarifa cobrada por la concesionaria es 100% más cara que la estimada en este estudio y con respecto al valor propuesto por la CEPAL, es 8% más caro.

2.- Para las categorías Tipo B, Camiones y Buses de dos ejes, la concesionaria establece un precio de \$8.000, el costo de circulación calculado es de \$12.597 y el valor propuesto por la CEPAL es de \$19.560.

En consecuencia, es un 36% más barato el precio establecido por la concesionaria respecto del valor calculado, y en un 55 % más barato el recio calculado en este trabajo con respecto a la CEPAL.

3.- Y para la categoría Tipo C que representan los vehículos más pesados, el precio de la tarifa de peajes es de \$14.200 por transitar por ambas plazas de peajes, el costo de circulación en este trabajo es de \$36.822 y el valor propuesto por la CEPAL es de \$32.560.

Entonces, se obtuvo que la tarifa de la concesionaria es un 61% más barata con respecto al valor estimado por circulación y de un 12% más caro con el valor estimado por la CEPAL.

Finalmente, se puede decir que el costo del peaje de los vehículos livianos cobrado por la concesionaria es de 100 % más caro con respecto al precio determinado en este estudio, es decir, esta diferencia que estaría subsidiando a los vehículos más pesado.

Por otra parte, los resultados alcanzados indican que los reclamos de los usuarios con vehículos livianos están justificados no así los reclamos del transporte pesado que está subsidiado por los peajes de los vehículos livianos.

En este trabajo se ha determinado la importancia del mantenimiento y sus costos, por lo que se consideró necesario identificar los parámetros que determinan la calidad del pavimento que puedan definir el grado de satisfacción del usuario. Dichos parámetros de desempeño son la rugosidad (medición del IRI), la estabilidad del pavimento (deflectometría) y la seguridad (adherencia de los neumáticos, la reflectividad de la pintura y de la señalización vertical).

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Engel, R. Fischer, and A. Galetovic, *El Programa Chileno de Concesiones de Infraestructura: Evaluación, Experiencias y Perspectivas*, vol. 7, no. proyecto 9608. 2001, pp. 202–245.
- [2] IKONS ATN, “Informe Final Estudios de Trifas en Carreteras y Autopistas Urbanas en Chile,” 2005.
- [3] H. E. T. C. A. de Solminihac, *Gestión de Infraestructura Vial.pdf*, Ediciones UC., vol. 1. Santiago , 2018. Accessed: Apr. 18, 2022. [Online]. Available: https://books.google.cl/books/about/Gesti%C3%B3n_de_infraestructura_vial.html?id=kw6DDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true
- [4] M. Sanchez-Silva, O. Arroyo, M. Junca, S. Caro, and B. Caicedo, “Reliability based design optimization of asphalt pavements,” *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 281–294, 2005, doi: 10.1080/10298430500445506.
- [5] AASHTO, “AASHTO guide for design of pavement structures 1993 edition.” 2001.
- [6] M. A. Rodríguez, T. Echaveguren Navarro, and G. Thenoux Zeballos, “Including reliability in the AASHTO-93 flexible pavement design method integrating pavement deterioration models,” *Revista de la Construcción*, vol. 16, no. 2, pp. 284–294, 2017, doi: 10.7764/RDLC.16.2.284.
- [7] G. Corredor M, “Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHTO y Maestría en Vías Terrestres ó Módulo III Diseño de Pavimentos I Sección para Delegados de La Cámara de la Construcción,” Venezuela.
- [8] L. Aristizabal Morales, J. Hoyos Arenas, L. Gil Obando, M. Gomez Echeverry, and D. Gomez Jimenez, “DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE POR LOS MÉTODOS AASTHO Y RACIONAL,” Universidad Libre Facultad de Ingeniería, 2014. doi: 10.1080/14768320500230185.
- [9] L. Monsalve, L. Giraldo, and J. Maya, “DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RIGIDO,” Tesis , Universidad Del Quindío, Armenia, 2012.
- [10] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, “Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación.” Santiago, Chile, 2018.
- [11] Ministerio de Obras Publicas Dirección de Vialidad, “Manual de Carreteras, Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño,” *Mop*, vol. 3, no. 1, p. 1285, 2018.
- [12] S. Olavarria and Universidad Austral de Chile, “CARACTERIZACIÓN DE TRÁNSITO DE VEHÍCULOS PESADOS EN BASE AL MÉTODO AASHTO DE ESPECTROS DE CARGA, PARA LAS REGIONES XIV Y X,” Tesis, Universidad Autral de Chile , Valdivia, Chile , 2013.

- [13] Dirección de Vialidad, “Información de Tránsito - Dirección de Vialidad.” <http://servicios.vialidad.cl/censo/index.htm> (accessed Apr. 18, 2022).
- [14] J. Pattillo Bergen, “Consideraciones generales sobre diseño de pavimentos asfálticos,” *Revista de Ingeniería de Construcción*, no. No. 4, pp. 94–110, Mar. 1998.
- [15] L. M. Galindo, D. R. Heres, and L. Sánchez, “Tráfico inducido en México: contribuciones al debate e implicaciones de política pública / Induced Traffic in Mexico: Contributions to the Debate and Public Policy Implications,” *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 21, no. 1, p. 123, 2006, doi: 10.24201/edu.v21i1.1263.
- [16] D. H. , Timm, Mary. , Robbins, Nam. , Tran, C. Redezno, and NationalAsphaltPavementAssociation, “FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN – STATE OF THE PRACTICE,” Jul. 2014.
- [17] F. Satomayor Alejandro and Universidad Tecnica Federico Santa Maria, “Sensibilización de los parámetros utilizados en el diseño de pavimentos rígidos para la guía empírico-mecanicista de diseño de pavimentos GEMDP AASHTO 2008,” 2017. Accessed: Apr. 13, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11673/22662>
- [18] Escuela de Caminos de Montaña de la Facultad de Ingeniería, *Diseño de Pavimentos – AASHTO 93*. La Paz , La Paz, Bolivia, 2006, pp. 1–246.
- [19] Facultad de Ciencias y Tecnología, “PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO MÉTODO AASHTO-93: Capítulo IV,” in *Manual Completo Diseño de Pavimentos*, vol. Capitulo IV, Universidad Mayor de San Simón, Ed. Cochabamba, Bolivia, 2015, pp. 122–172.
- [20] Comisión de diseño y evaluación de pavimentos, “Informe N°1: Algunas recomendaciones para el diseño de pavimentos en Chile según AASHTO,” Santiago, Chile, Dec. 1996.
- [21] J. Moreno, “CAPÍTULO 4: El módulo resiliente,” Tesis de grado, universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2005. doi: <https://orcid.org/0000-0002-3709-0463>.
- [22] Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, “Manual de Diseño de Pavimentos (AASHTO-93) y DIPAV 2.3.”
- [23] Instituto Nacional de Estadísticas, “Boletines de transporte y comunicaciones : Plaza de peajes ,” *INE, Chile* , Jan. 01, 2015. <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/transporte-y-comunicaciones> (accessed Apr. 15, 2022).
- [24] J. Flores, “Impacto en el Diseño del Pavimentos debido a la Actualizaciones de Factores Camion en la región del Bio-Bio,” Tesis , Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile , 2015.

- [25] A. B. Nash, "Verificación del Diseño de un Pavimento Flexible existente, diseñado con AASHTO 93, por medio de Elementos Finitos," Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 2020.
- [26] H. de Solminihac, T. Echeveguren, and A. Chamorro, *Gestión de la Infraestructura Vial*, Tercera. Santiago, Chile: Ediciones UC, 2018.
- [27] M. dirección de vialidad Chile, "Manual de Carreteras Volumen N°7: Mantenimiento Vial," in *Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, 2019th ed., vol. Volumen N°7, no. 1, 2014, p. 1285. [Online]. Available: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES DE CARRETERAS 2019/MC-05-14 Seccion Suelos y Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES_DE_CARRETERAS_2019/MC-05-14_Seccion_Suelos_y_Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf)
- [28] "Listados de precios unitarios SERVIU.pdf." 2018, Valparaíso.
- [29] "Mercado Público - La plataforma de compras públicas y oportunidades de negocio del Estado de Chile." <https://www.mercadopublico.cl/Home> (accessed Apr. 13, 2022).
- [30] "Tasa de interés real (%) - Chile | Data." <https://datos.bancomundial.org/indicador/FR.INR.RINR?locations=CL> (accessed Apr. 13, 2022).
- [31] C. Catillo Contreras, "Formulación de una metodología general para la elección de programas de conservación de pavimentos viales y su aplicación a la Región de Magallanes," Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [32] Ricardo. Sánchez and UN. ECLAC. Natural Resources and Infrastructure Division., "El pago por el uso de la infraestructura de transporte vial, ferroviaria y portuaria, concesionada al sector privado," Naciones Unidas, CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura, Unidad de Transporte, Santiago de Chile, Nov. 2003.

8.1 ANEXO I: DATOS DEL TRÁNSITO VEHICULAR

PLAZA DE PEAJE TRONCAL ZAPATA (REGIÓN 05)								
Año/Mes	Suma de Total	TIPO DE VEHICULO (pasadas de vehículos)						
		Suma de AutoCamioneta	Suma de AutoCarro	Suma de CamionDosEjes	Suma de CamionTresMasEjes	Suma de BusDosEjes	Suma de BusTresMasEjes	Suma de Motos
2015	11021186	9053493	23942	577965	751353	413473	126914	74046
1	1164297	983512	4612	49900	64468	41817	10143	9845
2	1092887	923694	2436	45987	62164	40152	9692	8762
3	874523	693988	1595	51486	77384	31573	11789	6708
4	854341	696420	1024	47215	62645	30126	11258	5653
5	851330	703508	1471	43272	55989	29967	11721	5402
6	811842	658527	1157	46357	60420	29277	11990	4114
7	876758	717425	2081	48611	63186	32238	10293	2924
8	791108	639750	1453	45989	58811	31604	9730	3771
9	843023	683164	1661	48018	63611	32133	9862	4574
10	921433	752329	1298	49497	63972	37775	10415	6147
11	909499	744139	1525	49332	57378	39377	10023	7725
12	1030145	857037	3629	52301	61325	37434	9998	8421
2016	11678955	9649047	33014	604604	751623	443687	116728	80252
1	1236493	1053043	6148	52408	60083	42630	11218	10963
2	1152233	978859	4430	50405	58511	40262	10581	9185
3	966958	792451	2561	51683	67014	35692	10049	7508
4	805441	646418	2408	47293	62895	33137	9177	4113
5	858187	698944	1670	48305	60907	34703	9042	4616
6	820734	666905	1880	47127	59218	32928	8576	4100
7	971023	812183	2321	48681	58631	35626	9254	4327
8	916406	746034	2197	52733	65629	34886	9569	5358
9	941427	772367	1900	50196	65908	35129	9362	6565
10	1016451	842267	2964	49723	63090	40136	10197	8074
11	953333	776086	2050	52557	65481	39716	9887	7556
12	1040269	863490	2485	53493	64256	38842	9816	7887
2017	12077062	9926025	49126	591034	856898	443573	129017	81389
1	1310151	1118751	3055	55001	67940	42511	11403	11490
2	1197509	1019062	2502	50745	65695	39197	10425	9883
3	982067	791782	1820	54775	79956	35848	10523	7363
4	926182	764037	2387	45131	65224	33158	9733	6512
5	857915	685454	2083	49559	72763	34129	9935	3992
6	823898	659226	2150	46578	69812	32331	10861	2940
7	990837	817402	2758	48562	71656	35717	10662	4080
8	913399	733866	4192	50150	74152	36111	10690	4238
9	966330	793858	5811	46655	68482	34625	10830	6069
10	1041491	851788	8512	47825	74453	40070	11312	7531
11	984847	794583	6725	48421	74199	41232	11083	8604
12	1082436	896216	7131	47632	72566	38644	11560	8687

PLAZA DE PEAJE TRONCAL ZAPATA (REGIÓN 05)								
Año/Mes	Suma de Total	TIPO DE VEHICULO (pasadas de vehículos)						
		Suma de AutoCamioneta	Suma de AutoCarro	Suma de CamionDosEjes	Suma de CamionTresMasEjes	Suma de BusDosEjes	Suma de BusTresMasEjes	Suma de Motos
2018	12422638	10327912	9946	563823	846515	452265	136192	85985
1	1318252	1116952	1748	52090	79956	43194	13757	10555
2	1236373	1050850	1599	47203	74797	39582	12620	9722
3	1030000	841368	977	48068	84483	36001	11243	7860
4	939751	770006	435	45496	73486	34155	10288	5885
5	934306	764359	399	46305	70993	35915	10615	5720
6	864162	700496	473	46041	68611	34755	10502	3284
7	1021798	855337	641	45127	69514	36389	10621	4169
8	949852	773096	698	47688	73289	38168	11601	5312
9	969262	815417	631	40407	60810	34572	11143	6282
10	1033915	842263	607	50695	79110	41386	12017	7837
11	1046482	882670	663	47158	54806	41160	10898	9127
12	1078485	915098	1075	47545	56660	36988	10887	10232
2019	12190343	10277246	16614	528765	786119	348854	175792	56953
1	1239665	1055058	1813	53002	70065	39941	10861	8925
2	1262347	1091859	1709	46013	64953	36419	13623	7771
3	1068083	890098	1442	48103	76206	33406	12839	5989
4	1005822	844514	1376	35477	66751	35535	16506	5663
5	907695	769322	1021	30246	62367	29656	12566	2517
6	865569	717661	1044	41854	61049	28068	13691	2202
7	1055296	886606	1245	47038	73262	29228	15170	2747
8	997298	839369	1466	45947	63768	26958	16179	3611
9	990123	842288	1577	42074	59068	24865	16547	3704
10	849335	706966	1305	43392	57542	21950	15106	3074
11	869417	720043	1310	44335	64580	19186	15284	4679
12	1079693	913462	1306	51284	66508	23642	17420	6071

PLAZA DE PEAJE LO PRADO (REGIÓN 05)								
Año/Mes	Suma de Total	TIPO DE VEHICULO (pasadas de vehículos)						
		Suma de AutoCamioneta	Suma de AutoCarro	Suma de CamionDosEjes	Suma de CamionTresMasEjes	Suma de BusDosEjes	Suma de BusTresMasEjes	Suma de Motos
2015	12905534	10661994	22851	663953	772299	555669	134161	94607
1	1311689	1107775	4088	57562	67086	52643	10936	11599
2	1210993	1020753	3650	52397	63818	50126	9890	10359
3	1034657	830188	1920	58628	78904	43825	12469	8723
4	1005976	825489	1267	54382	64335	41383	11772	7348
5	1004412	834962	1457	49975	57716	40861	11971	7470
6	959412	783833	1134	53112	62501	41107	12110	5615
7	1024419	843428	1695	55911	64763	43742	10857	4023
8	948555	774959	1080	52802	60398	43971	10205	5140
9	1012872	830353	1397	54480	64741	44746	10886	6269
10	1089888	896175	1453	56759	65533	51254	10951	7763
11	1087114	896045	1440	58223	59440	51587	10765	9614
12	1215547	1018034	2270	59722	63064	50424	11349	10684
2016	13756457	11410134	47427	701848	779959	590654	123559	102876
1	1394690	1189655	3494	59375	61905	54575	12784	12902
2	1293834	1097733	5212	57339	59948	50688	11777	11137
3	1142671	940489	4592	59974	69417	47798	10617	9784
4	973524	790282	2815	54845	65084	45504	9409	5585
5	1033273	849171	1976	55604	63242	47461	9486	6333
6	983089	805679	1930	53658	61585	45618	9103	5516
7	1137780	953929	3243	56122	61568	47810	9497	5611
8	1091414	893707	4370	59386	67939	49453	9510	7049
9	1126301	929343	4522	57708	67782	48580	9853	8513
10	1194193	986714	10169	59139	65145	51733	11275	10018
11	1145653	938640	2434	63911	69116	51500	10074	9978
12	1240035	1034792	2670	64787	67228	49934	10174	10450
2017	14268606	11789562	73470	683179	883905	605700	128825	103965
1	1487696	1268126	4942	63217	69078	54948	13564	13821
2	1339964	1140065	2426	56193	66877	52177	10249	11977
3	1176145	958267	1813	61763	82425	51621	10249	10007
4	1102264	915062	3265	51889	67197	46197	10005	8649
5	1042907	843524	2295	56845	75575	49107	9994	5567
6	997884	808620	2172	55139	72833	45855	9079	4186
7	1171159	971726	2898	57230	74639	48606	10727	5333
8	1093139	886923	4192	60078	76710	49489	10195	5552
9	1153917	950158	11766	54507	71200	47446	11193	7647
10	1235833	1014387	13642	52435	77492	56386	11731	9760
11	1184306	960576	14943	58945	76297	52753	10482	10310
12	1283392	1072128	9116	54938	73582	51115	11357	11156

PLAZA DE PEAJE LO PRADO (REGIÓN 05)								
Año/Mes	Suma de Total	TIPO DE VEHICULO (pasadas de vehículos)						
		Suma de AutoCamioneta	Suma de AutoCarro	Suma de CamionDosEjes	Suma de CamionTresMasEjes	Suma de BusDosEjes	Suma de BusTresMasEjes	Suma de Motos
2018	14657254	12267771	28451	661398	862428	593103	131465	112638
1	1496876	1271558	2091	60209	82663	54179	13016	13160
2	1378617	1172079	3008	53703	76390	48924	12456	12057
3	1239537	1019403	4543	59488	87767	46992	10419	10925
4	1124035	929088	1702	57662	74598	43507	9297	8181
5	1117104	919424	6807	55233	70705	47101	9917	7917
6	1046558	861251	1022	49610	69706	49173	10862	4934
7	1194894	1007863	1022	55469	70164	44430	10311	5635
8	1141230	941668	524	55436	75027	51252	10240	7083
9	1153287	979942	655	43647	61773	48732	10488	8050
10	1235404	1019717	689	57165	79813	55843	12075	10102
11	1245065	1051002	3729	58625	55543	52687	11706	11773
12	1284647	1094776	2659	55151	58279	50283	10678	12821
2019	14499421	12328311	18489	530051	790610	564004	189176	78780
1	1415101	1206581	1610	59776	72275	51888	11726	11245
2	1397293	1211282	1615	47867	65306	47980	13412	9831
3	1256326	1057045	1602	52212	76276	46522	13711	8958
4	1211920	1025221	1805	41666	64626	49612	19601	9389
5	1107486	947690	1359	25307	63507	51141	14454	4028
6	1060314	890310	1271	40127	62170	48389	14616	3431
7	1248317	1057046	1489	45274	73329	51205	16057	3917
8	1208095	1027548	1703	43974	63690	49230	16860	5090
9	1188795	1020811	1753	40146	59005	44497	17729	4854
10	1050301	884082	1449	42553	59520	41689	16144	4864
11	1059263	890955	1264	43038	64242	38355	15678	5731
12	1296210	1109740	1569	48111	66664	43496	19188	7442

