

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CHILETE – SAN
PABLO – EMPALME RUTA 3N DEL KM 53+780 AL KM 54+780**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

José Manuel Rafael Ipanaqué López

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk

Lima, marzo, 2023

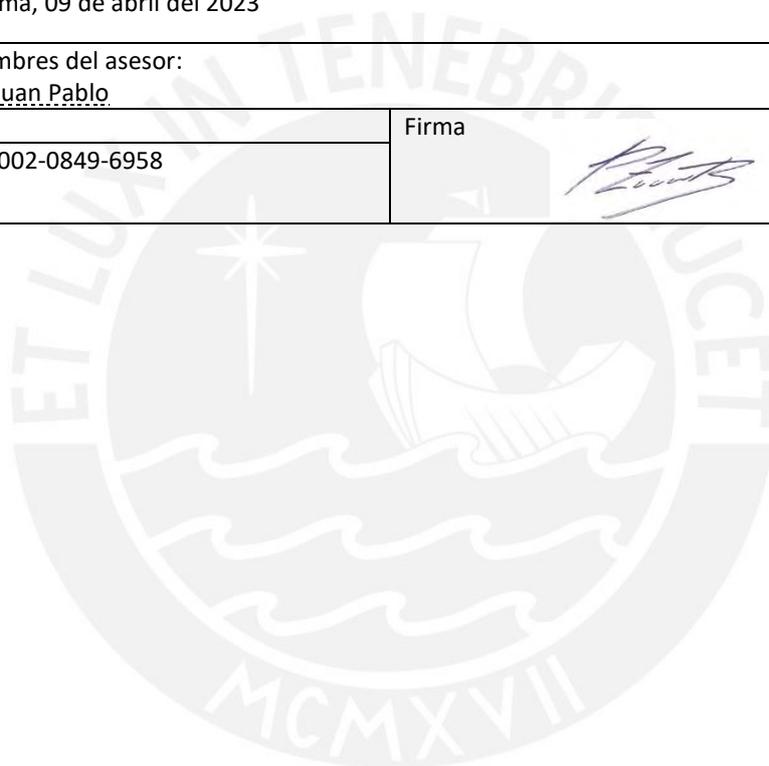
Informe de Similitud

Yo, Juan Pablo Zamora Beyk, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulado DISEÑO DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CHILETE – SAN PABLO – EMPALME RUTA 3N DEL KM 53+780 AL KM 54+780, del autor José Manuel Rafael Ipanaqué López, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 26 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 29/03/2013.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 09 de abril del 2023

Apellidos y nombres del asesor: <u>Zamora Beyk, Juan Pablo</u>	
DNI: 42867511	Firma 
ORCID: 0000-0002-0849-6958	



Resumen

La carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca y cuenta con una extensión de 74 kilómetros. Esta carretera fue construida para descongestionar el tránsito de la ciudad, así como también incrementar el turismo y comercio de la región. En la presente tesis, se diseña el pavimento para un kilómetro de esta vía. Concretamente, el subtramo elegido se encuentra comprendido entre las progresivas km. 53+780 y 54+780, que pertenece al tramo tres de la carretera (Maraypampa – Empalme Ruta 3N).

En el diseño, se consideran dos tipos de pavimento: rígido y flexible. Para pavimento rígido se diseña bajo las metodologías de la Portland Cement Association (PCA) y de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Para pavimento flexible se diseña mediante las metodologías del Instituto del Asfalto (IA) y de la AASHTO. Cabe recalcar que, para el diseño, se emplean datos diferentes para simular un caso distinto al encontrado en la realidad.

Se plantean 4 alternativas por metodología de diseño y se efectúa el análisis económico de los costos de construcción de todas las opciones. El trabajo incluye el mantenimiento a lo largo del tiempo de vida útil de la estructura en el programa HDM-4 para la alternativa más económica de pavimento rígido y pavimento flexible. Finalmente, se elige la opción económicamente más favorable y se diseñan las bermas.

Los resultados obtenidos muestran que, a pesar de que el costo de construcción de un pavimento flexible es menor que un pavimento rígido, al tomar en cuenta el costo de mantenimiento de ambas estructuras, resulta económicamente más ventajoso construir un pavimento rígido.

Agradecimientos

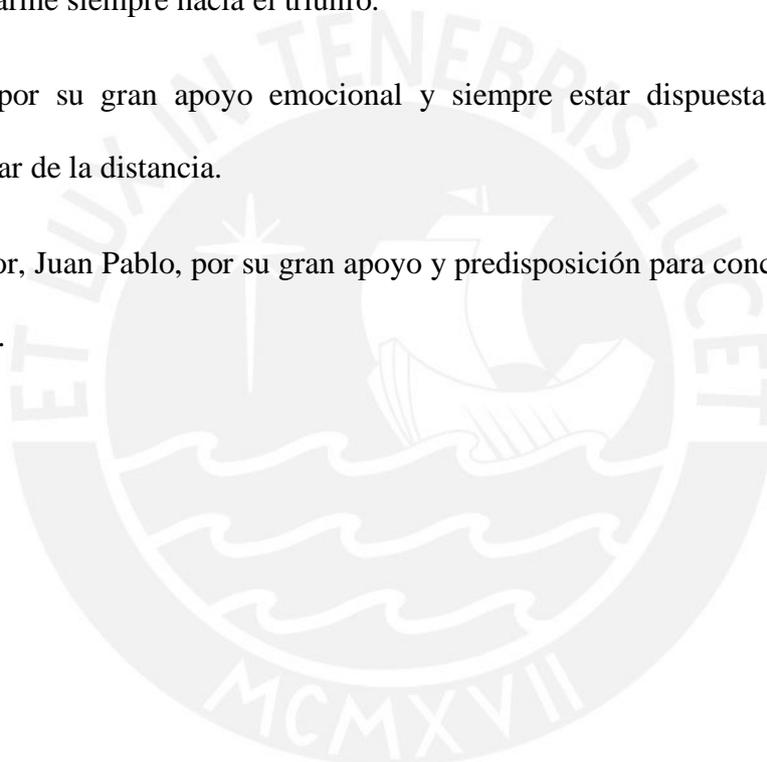
A mi abuelita, Alicia, un beso al cielo para ella, que estuvo a mi lado en todo momento y supo guiarme con sus valores y carácter a ser el hombre que soy hoy en día.

A mi madre, Elsa, por todo el abnegado sacrificio que siempre ha hecho para que yo sea un profesional y estar incondicionalmente a mi lado en mis mejores y peores momentos.

A mis hermanas, Mary y Mayra, por brindarme una palabra de aliento cuando más lo necesitaba y guiarme siempre hacia el triunfo.

A Sofía, por su gran apoyo emocional y siempre estar dispuesta a escucharme y animarme, a pesar de la distancia.

A mi asesor, Juan Pablo, por su gran apoyo y predisposición para concluir este proyecto de fin de carrera.



ÍNDICE

Capítulo 1: Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del proyecto.....	2
1.2.1 Antecedentes	2
1.2.2 Ubicación del proyecto.....	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Metodología.....	5
Capítulo 2: Marco Teórico	8
2.1 Definición de pavimento.....	8
2.2 Clasificación de los pavimentos	8
2.2.1 Pavimentos flexibles.....	9
2.2.2 Pavimentos rígidos	13
2.3 Estudios previos al diseño de pavimentos.....	21
2.3.1 Estudios pluviométricos y meteorológicos.....	21
2.3.2 Estudios de mecánica de suelos de la subrasante y canteras	21
2.3.4 Estudio de tráfico	23
2.4 Diseño de pavimentos.....	24
2.4.1 Pavimento Flexible - Metodología AASHTO	24
2.4.2 Pavimento Flexible - Metodología Instituto del Asfalto (IA).....	25
2.4.3 Pavimento Rígido - Metodología AASHTO	26
2.4.4 Pavimento Rígido - Metodología Portland Cement Association (PCA).....	26
2.5 Mantenimiento de pavimentos	27
2.5.1 Objetivos de mantenimiento vial	28
2.5.2 Políticas del mantenimiento vial	29
2.5.3 Programa de gestión vial HDM-4	30
Capítulo 3: Estudios Pluviométricos y Meteorológicos.....	31

3.1 Condiciones climatológicas.....	31
3.2 Precipitaciones mensuales y anuales	31
3.3 Temperatura mínima de la zona	34
3.4 Temperatura máxima de la zona.....	36
Capítulo 4: Estudio de Mecánica de Suelos y Cantera	38
4.1 Estudios de la subrasante	38
4.2 Requisitos para los materiales granulares	39
4.2.1 Subbase.....	41
4.2.2 Base	41
Capítulo 5: Estudio de Tráfico.....	43
5.1 Índice medio diario anual.....	43
5.2 Estimación de tránsito futuro	44
5.3 Factor de carga equivalente por eje	46
5.4 Factores de equivalencia	47
5.5 Tráfico de diseño	48
Capítulo 6: Diseño de los Pavimentos Flexibles	53
6.1 Método AASHTO.....	53
6.1.1 Parámetros de entrada del diseño.....	53
6.1.2 Diseño de espesores.....	56
6.2 Método del Instituto del Asfalto.....	60
6.2.1 Parámetros de entrada del diseño.....	60
6.2.2 Diseño de espesores.....	61
Capítulo 7: Diseño de los Pavimentos Rígidos.....	64
7.1 Método AASHTO.....	64
7.1.1 Parámetros de entrada del diseño.....	64
7.1.2 Diseño de espesores.....	69
7.2 Método de la Portland Cement Association.....	70

7.2.1 Parámetros de entrada del diseño.....	70
7.2.2 Diseño de espesores.....	71
7.3 Diseño de juntas.....	78
Capítulo 8: Análisis Económico	82
8.1 Consideraciones generales	82
8.2 Análisis económico del pavimento flexible	83
8.3 Análisis económico del pavimento rígido.....	91
Capítulo 9: Mantenimiento del pavimento.....	101
Capítulo 10: Discusión de Resultados.....	107
Capítulo 11: Conclusiones y Recomendaciones.....	111
Referencias Bibliográficas.....	117
Anexo A: Tablas de Referencia.....	121
Anexo B: Diseño de Pavimento Flexible – Método AASHTO.....	129
Anexo C: Diseño de Pavimento Flexible – Método Instituto del Asfalto.....	131
Anexo D: Diseño de Pavimento Rígido – Método AASHTO.....	134
Anexo E: Diseño de Pavimento Rígido – Método PCA	137
Anexo F: Mantenimiento de Pavimento Flexible en HDM-4	140
Anexo G: Mantenimiento de Pavimento Rígido en HDM-4.....	144
Anexo H: Planos de Diseño de Juntas.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i> Trazo de la carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N.	4
<i>Figura 2:</i> Tramo de 1 km. a diseñar.....	4
<i>Figura 3:</i> Distribución de carga en un pavimento flexible.	10
<i>Figura 4:</i> Sección típica de un pavimento flexible.....	11
<i>Figura 5:</i> Distribución de carga en un pavimento rígido.....	13
<i>Figura 6:</i> Sección típica de un pavimento rígido.	14
<i>Figura 7:</i> Vista típica de pavimento articulado de concreto simple (JPCP).	16
<i>Figura 8:</i> Perfil de losa con junta transversal de contracción.	18
<i>Figura 9:</i> Perfil de losa con junta longitudinal de contracción.	19
<i>Figura 10:</i> Cestillo de barras de una junta transversal de construcción.	20
<i>Figura 11:</i> Perfil de losa con junta de expansión.	21
<i>Figura 12:</i> Precipitación promedio mensual en la estación Weberbauer.....	33
<i>Figura 13:</i> Precipitación total anual en la estación Weberbauer.....	33
<i>Figura 14:</i> Temperatura mínima promedio mensual en la estación Weberbauer	35
<i>Figura 15:</i> Temperatura mínima anual en la estación Weberbauer.....	35
<i>Figura 16:</i> Temperatura máxima promedio mensual en la estación Weberbauer.....	37
<i>Figura 17:</i> Temperatura máxima anual en la estación Weberbauer	37
<i>Figura 18:</i> Ubicación de cantera Rejo respecto al tramo a diseñar	40
<i>Figura 19:</i> Calicatas en la cantera Rejo	40
<i>Figura 20:</i> Distribución de volumen de tráfico de la carretera	44
<i>Figura 21:</i> Proyección del IMDA en la carretera en los próximos 20 años.....	45
<i>Figura 22:</i> Variación de ESAL para diversos periodos de diseño	52
<i>Figura 23:</i> Diseño de junta de contracción transversal (Alternativas método AASHTO)	79
<i>Figura 24:</i> Diseño de junta de contracción transversal (Alternativas método PCA)	79

<i>Figura 25:</i> Diseño de junta longitudinal de construcción (Alternativas método AASHTO)..	80
<i>Figura 26:</i> Diseño de junta longitudinal de construcción	80
<i>Figura 27:</i> Diseño de sello de junta.....	81
<i>Figura 28:</i> Costo de construcción de alternativas de pavimento flexible método AASHTO.	88
<i>Figura 29:</i> Sección transversal del pavimento flexible método AASHTO.....	89
<i>Figura 30:</i> Costo de construcción de alternativas de pavimento flexible método IA	90
<i>Figura 31:</i> Sección transversal del pavimento flexible método Instituto del Asfalto	90
<i>Figura 32:</i> Comparativo de costo de construcción de pavimento flexible métodos AASHTO e IA	91
<i>Figura 33:</i> Costo de construcción de alternativas de pavimento rígido método AASHTO....	97
<i>Figura 34:</i> Sección transversal del pavimento rígido método AASHTO (Fuente: propia)	97
<i>Figura 35:</i> Costo de construcción de alternativas de pavimento rígido método PCA.....	98
<i>Figura 36:</i> Sección transversal del pavimento rígido método PCA	98
<i>Figura 37:</i> Comparativo de costo de construcción de pavimento rígido métodos AASHTO y PCA.....	99
<i>Figura 38:</i> Porcentaje de incidencia de las partidas de pavimento flexible.....	107
<i>Figura 39:</i> Porcentaje de incidencia de las partidas de pavimento rígido	107
<i>Figura 40:</i> Costo total del pavimento a lo largo del periodo de servicio.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1:</i> Precipitación acumulada mensual (mm) en la estación Weberbauer entre los años 1970 y 2012	32
<i>Tabla 2:</i> Temperatura mínima mensual (°C) en la estación Weberbauer entre los años 1970 y 2012.....	34
<i>Tabla 3:</i> Temperatura máxima mensual (°C) en la estación Weberbauer entre los años 1970 y 2012.....	36
<i>Tabla 4:</i> Resumen de datos de la subrasante	38
<i>Tabla 5:</i> Resumen de datos de la subbase	41
<i>Tabla 6:</i> Resumen de datos de la base	42
<i>Tabla 7:</i> Conteo vehicular carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N.....	43
<i>Tabla 8:</i> Proyección del IMDA en la carretera en los próximos 20 años	45
<i>Tabla 9:</i> Factor de Carga Equivalente (EALF) para pavimento flexible, SN=5 y Pt=3	46
<i>Tabla 10:</i> Factor de Carga Equivalente (EALF) para pavimento rígido, D=11” y Pt=3	47
<i>Tabla 11:</i> Cálculo de LEF para pavimento flexible según la carga medida.....	47
<i>Tabla 12:</i> Cálculo de LEF para pavimento rígido según la carga medida	48
<i>Tabla 13:</i> Cálculo de ADTo para pavimento flexible.....	49
<i>Tabla 14:</i> Cálculo de ADTo para pavimento rígido	50
<i>Tabla 15:</i> Resumen de datos para el cálculo del ESAL en pavimento flexible.....	51
<i>Tabla 16:</i> Resumen de datos para el cálculo del ESAL en pavimento rígido	51
<i>Tabla 17:</i> Valor de ESAL para pavimento flexible y rígido	52
<i>Tabla 18:</i> Resumen de parámetros de entrada para el diseño de pavimento flexible método AASHTO.....	56
<i>Tabla 19:</i> Coeficientes estructurales de las capas del pavimento flexible	58
<i>Tabla 20:</i> Coeficientes de drenaje de las capas del pavimento flexible.....	59

<i>Tabla 21: Alternativas de espesor de capa de pavimento flexible en base a metodología AASHTO</i>	59
<i>Tabla 22: Alternativas de espesores de capa de pavimentos obtenidos de cartas de diseño del IA</i>	61
<i>Tabla 23: Número estructural de las tres alternativas de diseño</i>	62
<i>Tabla 24: Alternativas de espesor de capa de pavimento flexible en base a método del Instituto del Asfalto</i>	63
<i>Tabla 25: Resumen de parámetros de entrada para el diseño de pavimento rígido método AASHTO</i>	69
<i>Tabla 26: Alternativas de espesor de capa de pavimento rígido en base a metodología AASHTO</i>	70
<i>Tabla 27: Peso máximo reglamentario de los ejes por tipo de vehículo</i>	72
<i>Tabla 28: Repeticiones actuales y esperadas en el periodo de diseño por tipo y peso de cada eje</i>	72
<i>Tabla 29: Análisis de fatiga y erosión para losa de 27 cm y base de 15 cm de espesor</i>	75
<i>Tabla 30: Análisis de fatiga y erosión para losa de 28 cm y base de 15 cm de espesor</i>	75
<i>Tabla 31: Análisis de fatiga y erosión para losa de 28 cm y base de 30 cm de espesor</i>	76
<i>Tabla 32: Análisis de fatiga y erosión para losa de 29 cm y base de 15 cm de espesor</i>	76
<i>Tabla 33: Análisis de fatiga y erosión para losa de 29 cm y base de 30 cm de espesor</i>	77
<i>Tabla 34: Espesor de estructura de pavimento rígido método PCA</i>	77
<i>Tabla 35: Subpartida de conformación de subbase granular</i>	83
<i>Tabla 36: Subpartida de material de subbase</i>	83
<i>Tabla 37: Subpartida de material de base</i>	83
<i>Tabla 38: Subpartida de conformación de base granular</i>	84
<i>Tabla 39: Subpartida de agregado fino zarandeado para imprimación</i>	84

<i>Tabla 40:</i> Partida de perfilado y compactado de subrasante	84
<i>Tabla 41:</i> Partida de subbase granular	85
<i>Tabla 42:</i> Partida de base granular.....	85
<i>Tabla 43:</i> Partida de imprimación asfáltica.....	85
<i>Tabla 44:</i> Partida de transporte de material granular para $d > 1\text{km}$	85
<i>Tabla 45:</i> Partida de riego de liga.....	86
<i>Tabla 46:</i> Partida de carpeta asfáltica	86
<i>Tabla 47:</i> Partida de transporte de material granular para $d < 1\text{km}$	86
<i>Tabla 48:</i> Partida de transporte de mezcla asfáltica para $d < 1\text{km}$	87
<i>Tabla 49:</i> Partida de transporte de mezcla asfáltica para $d > 1\text{km}$	87
<i>Tabla 50:</i> Costo de construcción de las alternativas de pavimento flexible método AASHTO	87
<i>Tabla 51:</i> Costo de construcción de las alternativas de pavimento flexible método Instituto del Asfalto	88
<i>Tabla 52:</i> Partida de perfilado y compactado de subrasante	92
<i>Tabla 53:</i> Partida de base granular.....	92
<i>Tabla 54:</i> Partida de concreto $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$	92
<i>Tabla 55:</i> Partida de barras de unión $\phi = 5/8''$	93
<i>Tabla 56:</i> Partida de dowels $\phi = 1 \ 1/4''$	93
<i>Tabla 57:</i> Partida de dowels $\phi = 1 \ 1/2''$	93
<i>Tabla 58:</i> Partida de corte de juntas.....	94
<i>Tabla 59:</i> Partida de sellado de juntas.....	94
<i>Tabla 60:</i> Partida de transporte de material granular para $d < 1\text{km}$	94
<i>Tabla 61:</i> Partida de transporte de material granular para $d > 1\text{km}$	95
<i>Tabla 62:</i> Partida de transporte de mezcla de concreto para $d < 1\text{km}$	95

<i>Tabla 63:</i> Partida de transporte de mezcla de concreto para $d > 1\text{km}$	95
<i>Tabla 64:</i> Costo de construcción de las alternativas de pavimento rígido método AASHTO	96
<i>Tabla 65:</i> Costo de construcción de las alternativas de pavimento rígido método PCA	96
<i>Tabla 66:</i> Partida de recapeo de carpeta asfáltica en caliente de 1"	102
<i>Tabla 67:</i> Partida de fresado de carpeta asfáltica de 1"	103
<i>Tabla 68:</i> Partida de sello asfáltico	103
<i>Tabla 69:</i> Partida de sellado de fisuras	103
<i>Tabla 70:</i> Partida de resellado de junta	105
<i>Tabla 71:</i> Partida de microfresado de losas	105
<i>Tabla 72:</i> Costo de mantenimiento total de pavimento flexible	106
<i>Tabla 73:</i> Costo de mantenimiento total de pavimento rígido	106
<i>Tabla 74:</i> Presupuesto en costo directo de las alternativas de pavimento flexible y rígido..	108
<i>Tabla 75:</i> Resumen de diseño de bermas	110

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Introducción

La construcción de caminos ha sido fundamental para el progreso de las ciudades desde su existencia. Actualmente, las carreteras son el medio más usado para conectar diversas regiones. Las carreteras influyen directamente en el crecimiento de una nación porque aumentan la competitividad del comercio (menor costo y mayor oferta), así como permiten la llegada de servicios del Estado (Garber y Hoel, 2005). De esta forma, se mejora el nivel social de la comunidad, ya que el gobierno puede establecer servicios fundamentales en la zona (salud, educación), así como se generan nuevos puestos de trabajo en rubros como el turismo.

La construcción de una red de carreteras de alta calidad aumenta directamente la producción económica de una nación al reducir los tiempos y costos de viaje, logrando que una región sea más atractiva económicamente (Rogers y Enright, 2016). La calidad de una carretera está estrechamente ligada a la calidad de su pavimento, por lo que su diseño debe efectuarse correctamente, de tal forma que brinde comodidad y seguridad a los usuarios.

Actualmente, la Red Vial Nacional está compuesta por 27 029 km de carreteras, de las cuales 22 623 km se encuentran pavimentadas, lo que representa el 83.7% de la Red Vial Nacional (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2022). Esto puede resultar alentador, pero si se observa las estadísticas de la Red Vial Departamental y la Red Vial Vecinal, solo el 13.5% y 1.7% de estas vías se encuentran pavimentadas, respectivamente (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2022). Si a lo expuesto se le añade la falta de mantenimiento preventivo y rutinario de las vías, queda demostrado el gran déficit de infraestructura vial que aún existe en nuestro país, lo que influye directamente en la situación económica nacional.

Debido a la problemática expuesta, surge la idea de construir la carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N. De esta forma, se busca lograr el desarrollo económico del departamento de Cajamarca, al proveer una ruta directa al Santuario de Kuntur Wasi y, al mismo tiempo, descongestionar el tráfico de la capital.

La presente tesis plantea el diseño del pavimento de un kilómetro de dicha carretera bajo diversas metodologías para distintos espesores de capa. Luego de ello, se evaluarán las alternativas planteadas a través de un análisis económico durante la construcción y tiempo de vida útil de la estructura. Finalmente, se obtendrá el diseño final del pavimento con la opción económicamente más favorable.

1.2 Descripción del proyecto

La carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N cuenta con una extensión de aproximadamente 74 km. y se encuentra dividida en tres tramos: tramo 1 desde Chilete hasta San Pablo, tramo 2 desde San Pablo hasta Maraypampa y tramo 3 desde Maraypampa hasta el empalme con la Ruta 3N.

Para la presente tesis, se diseñará el pavimento bajo las metodologías de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Asphalt Institute (AI) y Portland Cement Association (PCA) para un subtramo de 1km (perteneciente al tramo 3), que se encuentra comprendido específicamente entre las progresivas 53+780 a 54+780.

1.2.1 Antecedentes

Anteriormente, el departamento de Cajamarca solo podía conectarse con la costa del Perú mediante una única vía pavimentada, la cual era la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca. Es así como el tránsito de dicha ruta era marcadamente intenso, ya que por ella circulaban conjuntamente vehículos livianos particulares, camiones de carga provenientes de las zonas agrícolas y maquinaria pesada perteneciente a las múltiples mineras que se

asientan en la región. Asimismo, el trazo de la carretera discurre paralelo a los ríos de la región y por sectores con riesgos hidrogeológicos relacionados a procesos de geodinámica externa propios de la zona, tales como derrumbes en los taludes superiores del camino (caídas y deslizamiento de roca y suelo), erosión de los estratos inferiores del pavimento e inundaciones en la vía (Barrantes y Zavala, 2007). Estos problemas se agravan en época de lluvias y la ruta puede quedar intransitable durante varios días.

La nueva carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N tiene acceso directo al Santuario de Kuntur Wasi y la Granja Porcón, lo que permite fomentar el turismo de la región (ver Figura 1). Además, la ruta discurre por diversas comunidades y logra desarrollar el comercio de estas zonas, al brindar a la población una vía pavimentada por donde puedan exportar sus productos. Asimismo, este trayecto permite llegar desde Chilete hasta Porcón en un menor tiempo con respecto a la otra carretera, lo que representa un ahorro de costo para los usuarios. También, el trazo de la vía se ha proyectado para que recorra las laderas de las montañas y se aleje, en lo posible, de los cauces de río. De esta forma, se busca mantener el tránsito en circulación durante época de lluvias y evitar la erosión de las capas del pavimento.

Por lo mencionado anteriormente, se debe diseñar correctamente el pavimento para que permita tener vías de acceso cómodas y seguras hacia el nuevo centro turístico. Asimismo, el diseño debe proveer una estructura competente que soporte el tráfico pesado de la zona.

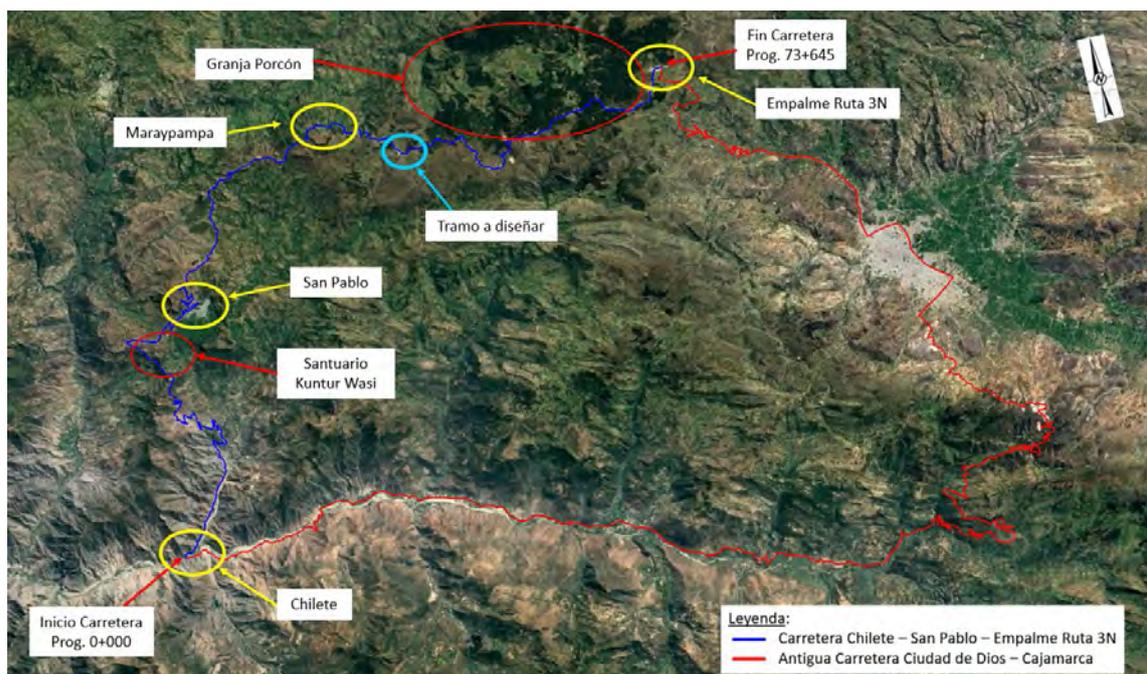


Figura 1: Trazo de la carretera Chilite – San Pablo – Empalme Ruta 3N.

Tomado de Google Earth por Google, 2022

1.2.2 Ubicación del proyecto

El proyecto se encuentra ubicado en el departamento de Cajamarca y recorre los poblados de Chilete, San Pablo y Maraypampa (ver Figura 1). El tramo tres, zona donde se encuentra el subtramo de 1km para el diseño, inicia en la localidad de Maraypampa y finaliza en el empalme con la Ruta 3N. El subtramo a diseñar se ubica entre las progresivas 53+780 a 54+780, a una altitud entre los 3020 y 3070 m.s.n.m., y se muestra en la siguiente Figura 2.



Figura 2: Tramo de 1 km. a diseñar.

Tomado de Google Earth por Google, 2022

1.3 Objetivos

Objetivo general: Diseñar los pavimentos rígido y flexible para un tramo de un kilómetro de la carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N bajo distintas metodologías y elegir la opción óptima mediante un análisis económico que comprende la etapa de construcción y mantenimiento a lo largo del tiempo de vida útil de la estructura.

Objetivos específicos:

- Diseñar el pavimento rígido bajo las metodologías de la Portland Cement Association (PCA) y de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
- Diseñar el pavimento flexible bajo las metodologías del Instituto del Asfalto (IA) y de la AASHTO.
- Comparar los costos de construcción y mantenimiento durante el tiempo de vida útil de las alternativas para elegir la opción económicamente más favorable y diseñar las bermas.

1.4 Metodología

En primer lugar, se recopila información de la carretera. Los datos a conseguir son planos en planta y secciones, estudios de mecánica de suelos, de canteras, de tráfico e hidrológicos. En segundo lugar, se selecciona el tramo de 1 km. para el diseño, donde se tiene en cuenta que el intervalo elegido no presente laderas pronunciadas. En tercer lugar, se modifican los datos de geología y mecánica de suelos de la subrasante y canteras, así como la composición vehicular, para simular un caso diferente al encontrado en la realidad.

Luego, se efectúa el estudio pluviométrico y meteorológico de la zona. Para ello, se emplea la información de los datos pluviométricos y de temperatura de la estación meteorológica del SENAMHI más cercana al tramo de diseño. Seguidamente, se compara los

resultados del estudio de mecánica de suelos de la subrasante y canteras con los requerimientos establecidos por el “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos” y el “Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Ello se realiza con el fin de evaluar si se necesita mejorar las propiedades del suelo.

A continuación, se desarrolla el estudio de tráfico según el conteo vehicular. En base al Reglamento Nacional de Vehículos del MTC y el manual de la AASHTO, se convierten los distintos ejes de los vehículos en un eje equivalente, para posteriormente calcular el ESAL de cada tipo de pavimento, el cual sirve como parámetro de entrada de los diseños.

Después, se diseñan los dos tipos de pavimentos. Para pavimento rígido, se diseña bajo las metodologías de la Portland Cement Association (PCA) y de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Para pavimento flexible, se diseña mediante las metodologías del Instituto del Asfalto (IA) y de la AASHTO. Para cada metodología, primero se calculan los parámetros de entrada que se requieren y luego se proponen alternativas con diversos espesores de capas del pavimento. Así pues, se obtiene un grupo de cuatro opciones de diseño según cada método empleado. Cabe recalcar que, para el pavimento rígido, también se considera el diseño de juntas de las alternativas.

Posteriormente, se realiza el metrado y análisis de precios unitarios para cada tipo de pavimento. Con esta información, se elabora el presupuesto de construcción de todas las alternativas y se selecciona la opción más económica de cada metodología empleada, para acto seguido, elegir una única alternativa de pavimento flexible y otra de pavimento rígido, considerando factores económicos. Luego, a estas dos alternativas se le adiciona el costo por mantenimiento durante el tiempo de vida útil de la estructura con la ayuda del programa de

gestión vial HDM-4. De ello, se obtiene el costo total de cada una. Entonces, se selecciona la opción económicamente más favorable, para después diseñar las bermas.

Finalmente, se desarrollan las conclusiones a las que se llegan después del trabajo elaborado en la presente tesis. Asimismo, se plantean recomendaciones para futuros proyectos de tesis.



Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Definición de pavimento

Un pavimento es una estructura que se encuentra apoyada sobre el suelo a lo largo de toda su longitud y está diseñada para soportar cargas estáticas y dinámicas durante su tiempo de vida útil (Vivar, 1991). Por otro lado, también se puede definir un pavimento como una estructura vial que está conformada por diversas capas de materiales seleccionados que se construye sobre el suelo de fundación y transmite a él esfuerzos y deformaciones generados por el paso de los vehículos (Higuera, 2010).

Según Montejo (2002), un pavimento debe cumplir con los siguientes requisitos para poder desempeñar sus funciones apropiadamente:

- Resistir a la acción de las cargas aplicadas por el tránsito y elementos del intemperismo.
- Proporcionar una textura y uniformidad superficial adecuada a las velocidades de diseño, tanto longitudinal como transversalmente.
- Ser durable y económica.
- Aportar condiciones óptimas de drenaje.
- Disponer de un color adecuado que evite reflejos y deslumbramientos.

Por lo mencionado anteriormente, un pavimento debe ser lo suficientemente resistente para asegurar su adecuado funcionamiento durante el tiempo de vida útil de la estructura, y al mismo tiempo, brindar comodidad y seguridad a los usuarios que transitan por la vía. Asimismo, un factor importante es el costo, por lo que se necesita lograr el mínimo costo de construcción y mantenimiento requerido.

2.2 Clasificación de los pavimentos

Según Vivar (1991), los pavimentos se pueden clasificar según:

- La calidad de los materiales usados en la construcción: empedrados, estabilizados, afirmados y aglomerados asfálticos o de cemento Portland.
- La estructura: reforzados o simples.
- El tipo de tránsito que soportarán durante su vida útil: urbanos, de aeropuertos, de carreteras, deportivos e industriales.
- El tiempo de vida para el cual han sido diseñados: temporales y permanentes.
- La forma en que transmiten las cargas a las capas: flexibles y rígidos.

Por otro lado, Montejo (2002) clasifica a los pavimentos en cuatro tipos: pavimentos rígidos, pavimentos flexibles, pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles y pavimentos articulados. Para la presente tesis, se diseñan pavimentos rígidos y flexibles, por ello, solo se profundiza en los conceptos de ambos tipos.

2.2.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles están compuestos por capas de suelo de buena calidad en la zona superior, donde la intensidad de los esfuerzos a los que está sometido la estructura es mayor, y capas de suelo de menor calidad en la zona inferior, donde los esfuerzos son bajos (Huang, 2004). De esta forma, se pueden lograr pavimentos económicos y que cumplan con los requerimientos de desempeño, incluso en las zonas donde el suelo de la subrasante es de baja calidad.

Según el Asphalt Institute (1988), estructuralmente, un pavimento flexible soporta las cargas aplicadas por los neumáticos en una pequeña área, por lo cual, la capa de rodadura está sometida a los máximos esfuerzos. A medida que desciende la carga por el pavimento, se va distribuyendo en una mayor área, por lo que los esfuerzos generados van disminuyendo progresivamente, tal como se muestra en la Figura 3. Si se cuenta con una selección apropiada de materiales del pavimento y con espesores adecuados, la fuerza

distribuida que llegue al suelo de fundación será pequeña y producirá esfuerzos suficientemente bajos que puedan ser soportados fácilmente por este material.

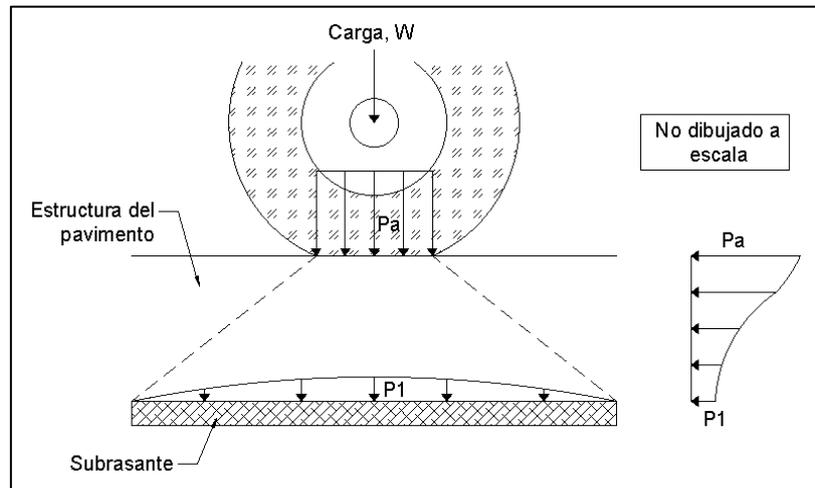


Figura 3: Distribución de carga en un pavimento flexible.

Adaptado de "Asphalt Handbook" por Asphalt Institute (1988)

Asimismo, un pavimento flexible se divide en las siguientes capas (Valle Rodas, 1964):

1) **Subrasante**: es la capa que sirve como fundación del propio pavimento. De la calidad de la subrasante depende, en gran medida, los espesores del resto de capas del pavimento. Si la subrasante está compuesta por suelo fino susceptible a saturarse, es de esperarse que el espesor de la base y subbase sean mayores a que si se tiene una subrasante de material de granulometría gruesa. Esta capa siempre debe ser compactada a su contenido de humedad óptimo.

2) **Subbase**: es la capa que se encuentra inmediatamente arriba de la subrasante. Sus principales funciones son servir como capa drenante, controlar los cambios de volumen en la estructura y controlar la ascensión del agua procedente de los flujos de agua subterráneos. Esta capa está compuesta de material granular seleccionado y debe ser compactada a su contenido de humedad óptimo.

3) **Base:** es la capa que se encuentra inmediatamente por encima de la subbase. Sus principales funciones son absorber los esfuerzos producidos por el tránsito de los automóviles y distribuir uniformemente estos esfuerzos a las capas subyacentes (subbase y subrasante). Esta capa puede estar conformada por material granular o por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas. Esta capa siempre debe ser compactada a su contenido de humedad óptimo.

4) **Capa de rodadura:** es la capa que se encuentra inmediatamente arriba de la base. Su función principal es impermeabilizar la superficie de rodadura para proteger a la base de infiltraciones de agua. También, brinda una superficie plana y segura para el tránsito de vehículos. Asimismo, esta capa contribuye a incrementar la capacidad de soporte del pavimento.

En la Figura 4 se observan las capas de un pavimento flexible típico:

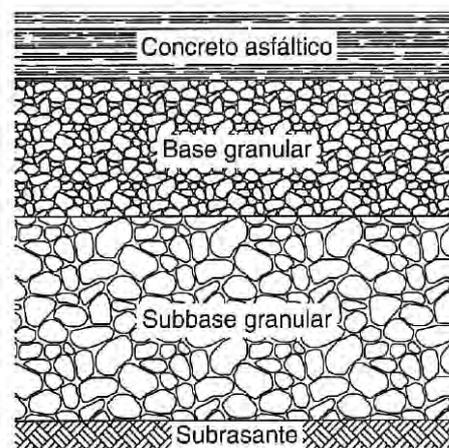


Figura 4: Sección típica de un pavimento flexible.

Tomado de “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera, C. (2010)

Según Rico y Del Castillo (1977), existen seis características fundamentales de los pavimentos flexibles, y son las siguientes:

1) **La resistencia estructural:** la función principal que debe cumplir un pavimento es soportar las cargas que se producen por el tránsito vehicular dentro del nivel de deterioro

planeado para el tiempo de vida útil de la obra. La teoría de falla para el análisis de resistencia de los pavimentos es por fuerza cortante, por ello, la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos es una propiedad esencial en los pavimentos flexibles.

2) **La deformabilidad:** se presenta en mayor medida en las capas inferiores, tales como la subrasante y el suelo de fundación, debido a la naturaleza de los materiales. Por ello, es importante el estudio de deformación de los estratos inferiores, ya que los estratos superiores cuentan con niveles de deformación tolerables aún para los grandes esfuerzos a los cuales están sometidos.

3) **La durabilidad:** tiene una gran incertidumbre y es muy difícil de tratar. Este criterio está directamente ligado a los factores económicos y sociales de la vía. El tránsito y los efectos del clima nunca se pueden predecir al 100%, y si a esto se suma la aparición de eventos extraordinarios (por ejemplo, lluvias ciclónicas, inundaciones o terremotos), entonces, es lógico que no se cuente con ningún método de diseño que considere los requisitos de durabilidad de un modo cuantitativo e independiente del sentimiento particular.

4) **El costo:** un diseño óptimo debe contemplar el requerimiento necesario de servicio a un costo reducido. Así también, la disyuntiva principal en cuanto a que tipo de pavimento elegir es el costo. Por un lado, los pavimentos rígidos requieren un costo inicial de construcción alto y dependen de la disponibilidad de materiales y equipos en la zona, pero a lo largo de su vida útil se deterioran poco. Por el otro lado, los pavimentos flexibles demandan poca inversión inicial, pero sufren mayores deterioros a lo largo de los años.

5) **Los requerimientos de conservación:** los factores que se deben tener en cuenta para la conservación son la intensidad de tránsito, el comportamiento del suelo de fundación, los factores climáticos, las condiciones de drenaje y el deterioro estructural de

los materiales por carga repetida. La conservación es vital para lograr la duración prevista del pavimento, de lo contrario, su vida se acorta imprevisiblemente.

6) **La comodidad:** para vías de primer orden se debe tener exigencia alta en el diseño, porque se requiere que los vehículos transiten a la velocidad de diseño. A pesar de que un pavimento presente deformaciones que no representan daño estructural, estas si pueden afectar la comodidad de los usuarios.

2.2.2 Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos tienen como elemento principal el concreto de cemento Portland. Según Huang (2004), este tipo de pavimento debe ser analizado con la teoría de placas, que es una simplificación de la teoría de capas (usada en pavimentos flexibles); en ella, se asume que la losa de concreto es una placa de espesor medio con suficiente fuerza de flexión como para distribuir la carga aplicada por los neumáticos en un área mucho más amplia, tal como se muestra en la Figura 5.

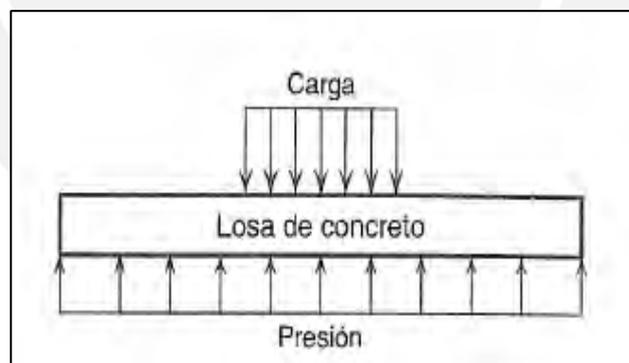


Figura 5: Distribución de carga en un pavimento rígido.

Tomado de “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera, C. (2010)

Adicionalmente, los principales factores que afectan al espesor de la losa son: la carga por eje del número de vehículos que circularán por la vía durante el periodo de diseño, la presión de inflado de los neumáticos de los automóviles, el módulo de reacción del suelo de apoyo y las características mecánicas del concreto que se emplee en la construcción de la losa (Rico y Del Castillo, 1977).

Los pavimentos rígidos están compuestos por las siguientes capas (Montejo, 2002):

1) **Losa de concreto:** esta capa está construida con concreto de cemento Portland. La característica fundamental de esta losa es distribuir las tensiones causadas por la carga vehicular en una mayor área, lo que brinda el beneficio de emplear pequeños espesores de losa. Esto se logra debido a que el concreto tiene las cualidades de elevado coeficiente de elasticidad y alta resistencia. Asimismo, se encarga de resistir el efecto abrasivo del paso de vehículos.

2) **Base o subbase:** es la capa que se encuentra inmediatamente debajo de la losa de concreto y está compuesta de material seleccionado. Las funciones de esta capa son evitar el bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento, además de emplearse como capa de transición y aportar un apoyo fijo y uniforme para que la losa no quede exenta de soporte; facilitar las labores de colocación de concreto; facilitar el drenaje; regular los cambios volumétricos de la subrasante y mejorar la capacidad de soporte de la subrasante.

3) **Subrasante compactada:** es la que capa que se encuentra inmediatamente debajo de la base o subbase y está compuesta por el terreno natural de la zona. Esta capa debe ser escarificada y compactada a la densidad deseada cerca al contenido óptimo de humedad.

En la Figura 6 se observan las capas de un pavimento rígido típico:

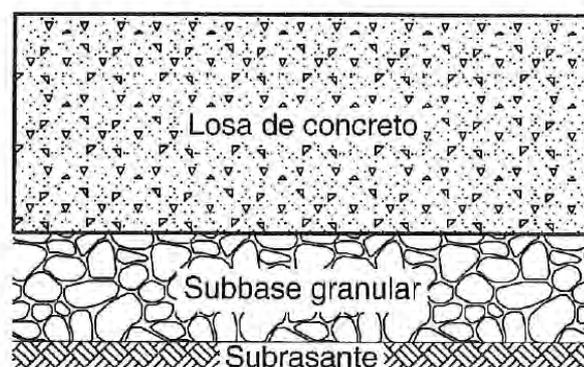


Figura 6: Sección típica de un pavimento rígido.

Tomado de "Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras" por Higuera, C. (2010)

Actualmente, existen varios tipos de pavimento de concreto que han sido construidos. Sin embargo, Delatte (2008) sostiene que todos ellos tienen dos características en común: primero, pueden resistir las cargas producidas por el tránsito vehicular gracias a la propiedad de flexión del concreto, y segundo, los pavimentos de concreto se contraen debido a la contracción por secado y se expanden y contraen debido a los diferenciales de temperatura.

Los pavimentos de concreto convencional se clasifican en tres tipos: pavimento articulado de concreto simple (JPCP), pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP) y pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP). Para estos tipos de pavimentos es necesario el diseño y detalle de juntas. A continuación, se detalla las características de cada uno de estos tipos de pavimento rígido:

1) **Pavimento articulado de concreto simple (JPCP)**: consiste en una losa de concreto no reforzado de aproximadamente 3.6 a 6 m de longitud con juntas de contracción transversales entre losas espaciadas lo suficientemente cerca para que no se formen las grietas hasta que finalice el tiempo de vida útil de la obra (Delatte, 2008). De esta forma, la junta posibilita el desplazamiento del pavimento y se minimiza la aparición de grietas.

Asimismo, la transferencia de carga puede ser ejecutada a través de barras de transferencia o por la trabazón de los agregados; pero si el espaciamiento de junta crece se genera una disminución de la efectividad de la trabazón (Huang, 2004). Esto es muy importante, ya que si la junta falla, el pavimento pierde su función de brindar comodidad a los usuarios.

Para carreteras con alto tráfico de vehículos, se hace uso de pasadores engrasados en las juntas transversales para permitir que estas se abran y cierren, y también se usan barras de unión en las juntas longitudinales para conectar carriles adyacentes (Delatte, 2008).

Como el JPCP no lleva acero de refuerzo, suele ser más económico que los otros tipos de pavimento. Este tipo de pavimento rígido será diseñado para la presente tesis y en la Figura 7 se muestra un ejemplo de JPCP:

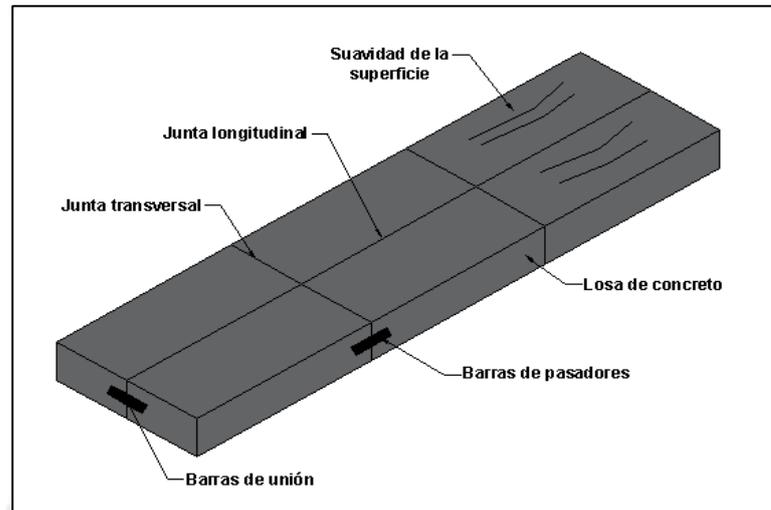


Figura 7: Vista típica de pavimento articulado de concreto simple (JPCP).
Adaptado de "Concrete pavement design, construction, and performance" por Delatte, N. (2008)

2) **Pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP)**: generalmente las losas de concreto tienen una longitud de 7.5 a 9 m y el contenido de acero por losa es frecuentemente entre 0.1% a 0.25% del área de la sección transversal, en la dirección longitudinal, con menor cantidad de acero en la dirección transversal (Delatte, 2008). Asimismo, el uso del acero de refuerzo permite lograr espaciamientos entre juntas de hasta 30 m y generalmente se necesitan juntas con pasadores, puesto que los espaciamientos son largos (FWA, 2006). De esta forma, se tiene una ventaja sobre el espaciamiento de juntas con respecto a un JPCP.

Por otro lado, el emplear una malla de acero de refuerzo no aumenta la capacidad estructural del pavimento, sino que aumenta el espaciamiento de las juntas (Huang, 2004). De ello, se desprende que la elección de este pavimento está ligada en mayor medida a una decisión económica.

3) **Pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP):** no cuenta con juntas y la formación de grietas relativamente cerca es la característica principal de este tipo de pavimento; por ello, se utilizan grandes cantidades de acero de refuerzo para mantener las grietas delgadas (Huang, 2004). De esta manera, el costo de del CRCP es mucho mayor que el del JRCP y JPCP, por lo que no es elegido para la construcción de pavimentos en Perú. Las ventajas de este pavimento es que brinda un paso suave y confortable a los conductores, así como su largo tiempo de vida útil en comparación con los otros dos casos (Delatte, 2008).

Asimismo, se sabe que el desempeño satisfactorio de los pavimentos rígidos está ligado directamente al comportamiento de las juntas. Londoño (1999) plantea que las fallas que se pueden asignar a un mal comportamiento de juntas son el escalonamiento, el bombeo, las fallas de esquina, el descascaramiento y las fisuras en el centro de la losa. Las juntas cumplen las funciones de aminorar los esfuerzos generados por el tránsito y evitar la formación de grietas (Salazar, 1998). Por lo mencionado, se desprende que el diseño de juntas es de vital importancia para poder conseguir un pavimento de buen desempeño a lo largo del tiempo de vida útil de la estructura.

Las juntas en los pavimentos se clasifican en los siguientes en cuatro tipos:

1) **Juntas transversales de contracción:** son aquellas que se construyen perpendicular al eje de la vía. Las barras de las juntas se encargan de prevenir el desplazamiento vertical entre las losas del pavimento, pero si permiten que la junta pueda abrirse y cerrarse cuando se presentan deformaciones en el concreto debido a cambios de humedad y temperatura (Delatte, 2008). De esta forma, la junta permite disminuir los esfuerzos de alabeo generados en la losa y, en consecuencia, que no se produzca un agrietamiento excesivo.

Asimismo, Londoño (1999) sostiene que, si el desempeño de esta junta no es el adecuado, se podrán observar fisuras en el centro de la losa y grietas de esquina, así como fallas típicas de escalonamiento y descascaramiento. Por ello, la correcta colocación de las barras en este tipo de junta es vital en el desempeño del pavimento, de lo contrario, la barra se convertirá en un elemento restrictivo al desplazamiento de la losa y cumplirá una función totalmente distinta para la que fue diseñada.

La junta debe ser sellada para que no se permita la intromisión de partículas que cierren este elemento y el pasajunta debe ser liso y lubricado. La lubricación permite romper la adherencia para evitar esfuerzos adicionales que causen daño en la zona de la junta (Salazar, 1998). A continuación, se muestra en la Figura 8 un perfil de una losa con junta transversal de contracción.

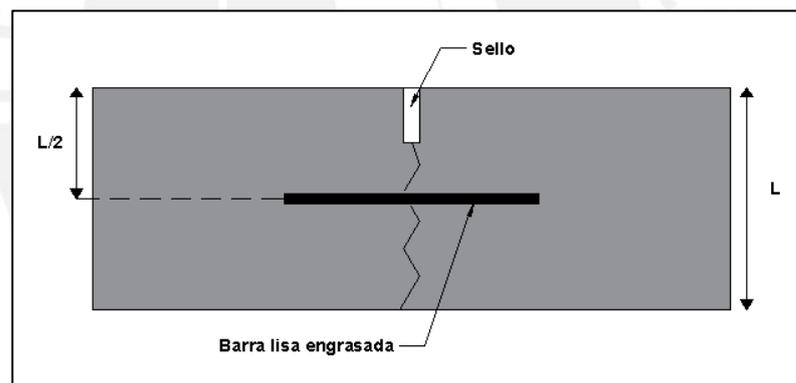


Figura 8: Perfil de losa con junta transversal de contracción.

Adaptado de "Concrete pavement design, construction, and performance" por Delatte, N. (2008)

2) **Juntas longitudinales de contracción:** son aquellas que se construyen paralelas al eje de la vía. Se emplean para disminuir las tensiones de deformación (fisuras) que se pueden presentar en losas con anchos mayores a 4.6 metros; también pueden ser construidas como juntas de construcción y la barra se usaría para conectar al concreto antiguo con el nuevo (Delatte, 2008). Así pues, para anchos menores de losa se puede prescindir de juntas, aunque existe la probabilidad de que se pueda desarrollar algunas grietas.

Además, la transferencia de carga en este tipo de juntas es mediante la trabazón de los agregados y se busca preferentemente que la ubicación de la junta coincida con los carriles de la vía para que se pueda facilitar la circulación de los vehículos (Londoño, 1999). Se plantea esta ubicación para que el pavimento cumpla con su función de brindar comodidad a los usuarios. Al igual que las juntas transversales, este tipo de junta también debe ser provista de un sello, pero la diferencia es que en este caso se emplea barra corrugada. A continuación, se muestra en la Figura 9 un perfil de una losa con junta longitudinal de contracción.

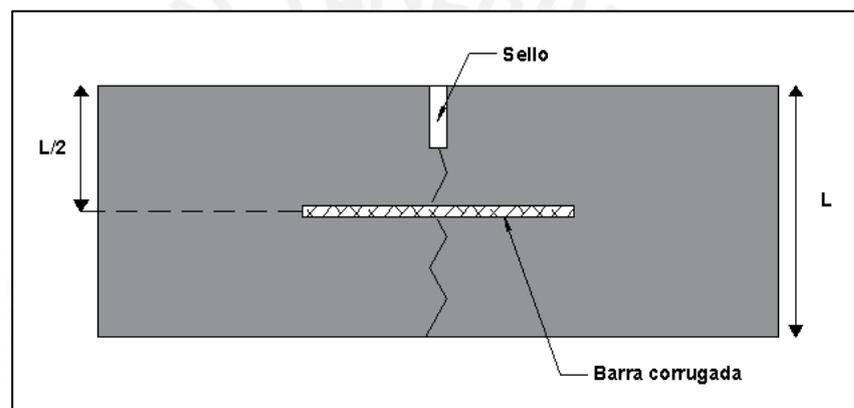


Figura 9: Perfil de losa con junta longitudinal de contracción.

Adaptado de "Concrete pavement design, construction, and performance" por Delatte, N. (2008)

3) **Juntas de construcción:** se emplean para conectar al concreto vaciado en otro tiempo previo con un concreto fresco, por lo que generalmente son ejecutadas al final de la jornada laboral. Se dividen en juntas transversales de construcción y juntas longitudinales de construcción. Para el primer caso, las juntas siempre deben tener barra de transferencia de carga y nunca debe usarse el machihembrado, ya que tiende a romperse (Londoño, 1999). Asimismo, generalmente esta junta coincide con la junta transversal de contracción. Para las juntas longitudinales de construcción, la transferencia de carga puede realizarse con barras de transferencia o con machihembrado, aunque se ha observado en campo que las losas menores a 25 cm con sistema machihembrado presentan fallas en la zona superior debido al esfuerzo cortante concentrado (Londoño, 1999). Por lo mencionado, se desprende

que la transferencia de carga óptima es llevada a cabo por las barras de transferencia. En la siguiente Figura 10 se muestra una junta de construcción en campo.

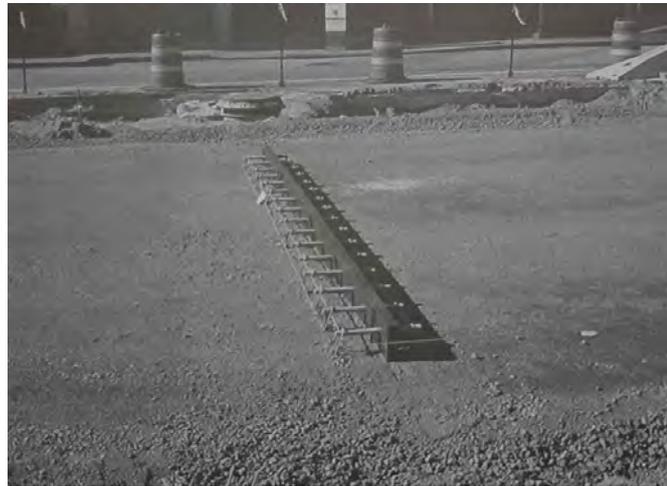


Figura 10: Cestillo de barras de una junta transversal de construcción.
Tomado de “Concrete pavement design, construction, and performance” por Delatte, N. (2008)

4) **Juntas de expansión o aislamiento:** son empleadas en lugares de intersecciones asimétricas y contra construcciones fijas, para permitir que el pavimento se expanda sin dañar la estructura circundante (Delatte, 2008). Por ello, este tipo de juntas son muy importantes en el cruce de puentes, alcantarillas, intersecciones asimétricas, entre otros.

Londoño (1999) sostiene que, generalmente, a los pocos años que una junta de expansión fue construida, esta se cierra por los movimientos continuos de las losas y el efecto que desencadena es que las juntas de contracción contiguas se puedan abrir y se destruya el sello. Por lo mencionado, se desprende que el mantenimiento de este tipo de juntas es esencial para el correcto desempeño no solo del pavimento, sino también de las estructuras circundantes.

Las juntas de expansión cuentan con una cápsula que permite que la barra lisa pueda moverse junto con el pavimento. Además, debajo del sello de la junta se debe colocar material de relleno blando. A continuación, se muestra en la Figura 11 un perfil de una losa con junta de expansión.

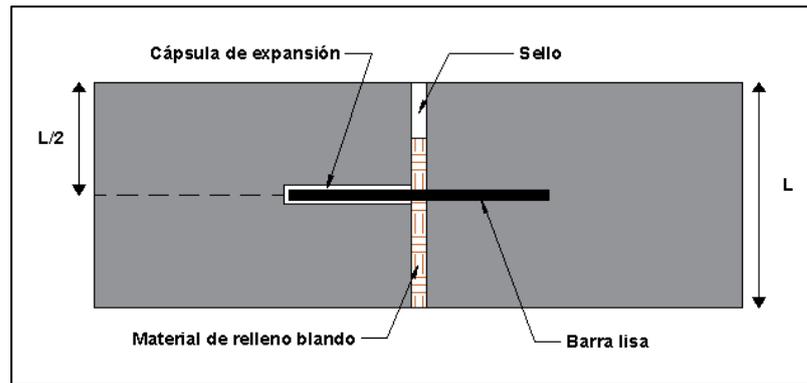


Figura 11: Perfil de losa con junta de expansión.

Adaptado de “Concrete pavement design, construction, and performance” por Delatte, N. (2008)

2.3 Estudios previos al diseño de pavimentos

Para el diseño de cualquier pavimento, es de vital importancia efectuar los siguientes estudios, ya que la data obtenida se emplea como parámetros de entrada para el correcto diseño del pavimento.

2.3.1 Estudios pluviométricos y meteorológicos

Este tipo de estudios permite conocer las características del clima de la zona, así como la precipitación y temperatura. La información puede ser obtenida de estaciones de registro públicas (SENAMHI) o privadas (pertenecientes a una empresa privada).

La información recolectada permite reconocer si se presentan ciertos fenómenos, como, por ejemplo, ciclos de hielo-deshielo. Asimismo, la cantidad de precipitación controlará el diseño de drenaje del pavimento.

2.3.2 Estudios de mecánica de suelos de la subrasante y canteras

El estudio de suelos de la subrasante es la evaluación más importante para el diseño de pavimentos, porque brinda información valiosa para entender cómo es que se comporta el suelo de fundación, conocer sus características físico-mecánicas y determinar si se podrá usar como subrasante. Para ello, se debe efectuar el reconocimiento de terreno y planificar el programa de investigación geotécnica, que comprende la exploración de campo y los

ensayos de laboratorio. El Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014) brinda las siguientes pautas necesarias para una correcta investigación geotécnica:

- Exploración de campo: ejecución de pozos y/o calicatas espaciadas entre 250 m y 2000 m, donde el espaciamiento puede reducirse dependiendo de las características del terreno. La profundidad mínima de exploración respecto al nivel de subrasante es 1.50 m. El número mínimo de calicatas depende del tipo de carretera. Durante la exploración de campo se debe identificar el espesor de los estratos de suelo (con su respectiva descripción visual-manual), así como registrar si existe la presencia de nivel freático o contacto roca/suelo. Se debe tomar muestras representativas de cada tipo de suelo identificado para los ensayos de laboratorio.
- Ensayos de laboratorio: luego de la exploración en campo, se debe efectuar los siguientes ensayos basados en el Manual de Ensayos de Materiales del MTC (2016): ensayos estándar como granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad, clasificación SUCS-AASHTO, contenido de cloruros, sulfatos y sales solubles; ensayos especiales como California Bearing Ratio (CBR), Proctor Modificado, equivalente de arena, ensayo de expansión libre, colapsabilidad potencial y consolidación uniaxial. Cabe recalcar que el número de ensayos CBR está determinado por el tipo de carretera.

Por otro lado, el estudio de canteras sirve para conocer las propiedades físico-mecánicas del material de préstamo que será usado para construir el pavimento (agregado para base y subbase, mezcla asfáltica, concreto hidráulico, etc.) Para conocer la calidad del material de la cantera también se debe efectuar calicatas y/o sondeos en campo, con una profundidad no menor a la profundidad máxima de explotación, y extraer muestras representativas de los estratos hallados. Asimismo, se deben efectuar ensayos de laboratorio estándar y especiales basados en el Manual de Ensayos de Materiales del MTC (2016). Los

tipos de ensayos a los que será sometido el agregado dependerá del uso que se le dará en obra (agregado para base y subbase, mezcla asfáltica, concreto hidráulico, etc.). El Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción del MTC (2013) establece los requisitos que debe satisfacer el agregado para que sea apto para la construcción del pavimento.

Según Vivar (1991), una cantera es mejor por su accesibilidad, potencia y rendimiento, calidad y situación legal. De ello se desprende que no basta que una cantera este dotada de material granular de buena calidad, sino que además el lugar debe tener fácil acceso para que los vehículos pesados puedan extraer este recurso, ya que de lo contrario puede resultar más barato explotar una cantera con aparente material inadecuado, pero que puede ser mejorado, comparado con el costo de transportar un material adecuado de una cantera lejana e inaccesible.

2.3.4 Estudio de tráfico

Una de las evaluaciones más importantes cuando se diseña un pavimento es el estudio de tráfico. Este estudio permite conocer el flujo de vehículos que transitará por el pavimento durante el tiempo de vida útil de la estructura en base a mediciones actuales y, por lo tanto, se estiman las cargas a las que estará expuesta la estructura para efectuar un correcto diseño.

Para determinar lo planteado, los parámetros de entrada son el tipo y cantidad de vehículos que transitan a diario por la carretera. El flujo de vehículos es normalizado a un eje estándar equivalente (EALF), para obtener el número de vehículos equivalente inicialmente (ADTo). Asimismo, se estima la tasa de crecimiento vehicular para finalmente hallar el ESAL (Equivalent Single Axle Load), que es el total de repeticiones por día de todos los automóviles durante todo el periodo de vida útil del pavimento.

El ESAL se convierte en el parámetro de entrada para el diseño de pavimento bajo las metodologías de la AASHTO y el IA. Por otro lado, para la metodología de la PCA, el parámetro de entrada de tráfico es el número de repeticiones total por cada tipo de eje durante el tiempo de vida útil del pavimento.

2.4 Diseño de pavimentos

2.4.1 Pavimento Flexible - Metodología AASHTO

Esta metodología está basada en los resultados de los ensayos que se efectuaron en la carretera de prueba AASHTO (AASHTO Road Test) ubicada en Ottawa, Illinois, a finales de 1950 y comienzos de 1960, para que luego se publicara la primera guía de diseño AASHTO en el año 1961 (Menéndez, 2009). Posteriormente, se publicaron diversas actualizaciones de la guía donde los datos empíricos obtenidos en un inicio fueron extrapolados para ajustarse a diversas condiciones de campo.

El diseño del pavimento flexible de la presente tesis se basa en la edición AASHTO 1993. Para el cálculo de la estructura del pavimento, la guía propone la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}(Mr) - 8.07$$

Ecuación 1

Donde los parámetros son: tráfico (W_{18}), cambio de serviciabilidad (ΔPSI), módulo de resiliencia de la subrasante (Mr), desviación estándar normal (Z_r) y desviación estándar total (S_o). Así pues, lo que se busca es obtener los espesores de las capas del pavimento con la ayuda del número estructural (SN), que es un valor adimensional que representa la resistencia del pavimento frente a las combinaciones de diseño dadas y que, además de la ecuación, puede ser obtenido a través de un nomograma planteado por la propia guía.

2.4.2 Pavimento Flexible - Metodología Instituto del Asfalto (IA)

El Instituto del Asfalto ha publicado nueve ediciones de la Serie de Manuales N°1 (MS-1) para el diseño de pavimentos de concreto asfáltico entre 1954 y 1981, donde hasta la sexta edición los procedimientos estaban basados en relaciones empíricas, en las ediciones siete y ocho los métodos se basaron en datos de ensayos de las carreteras AASHO, WASHO y algunas carreteras británicas, y, por último, la novena edición se basó en la metodología mecanístico – empírica (Menéndez, 2009). El diseño del pavimento flexible en la presente tesis se basa en la novena edición del manual del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute, 1991).

Es así como la metodología pasa a analizar al pavimento como un sistema multicapa y en el que se tiene en cuenta dos criterios de falla para calcular el espesor de las capas del pavimento. El primer criterio es la falla por fatiga, en el que se toma en cuenta las deformaciones por tracción producidas en la fibra inferior de las capas asfálticas y el segundo criterio es la falla por deformación permanente (ahuellamiento), donde se toma en cuenta las deformaciones verticales por compresión en la parte superior de la subrasante (Montejo, 2002). Lo que se busca es que las deformaciones no superen valores admisibles.

En 1991, luego de programar los resultados en el software DAMA, se publican los gráficos que permiten aplicar este método de manera simple. Los diagramas de diseño expuestos comprenden tres regímenes de temperatura media anual del lugar de estudio. Asimismo, las gráficas permiten diseñar tres distintas combinaciones de materiales en la estructura: pavimento con concreto asfáltico como material único, pavimento con capa asfáltica y base estabilizada con emulsión, y, por último, pavimento con capa asfáltica y base granular sin tratar.

2.4.3 Pavimento Rígido - Metodología AASHTO

Al igual que en el caso de diseño de pavimento flexible por método AASHTO, el diseño de pavimento rígido también se basa en la guía AASHTO 1993. Entonces, la guía propone la siguiente ecuación para el cálculo de la estructura:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 7.35 * \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 * pt) * \log_{10}\left(\frac{S'c * C_d * (D^{0.75} - 1.132)}{215.32 * J * (D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k_{efec}}\right)^{0.25}})}\right)$$

Ecuación 2

Donde los parámetros son: tráfico (W_{18}), cambio de serviciabilidad (ΔPSI), espesor de la losa de concreto (D), desviación estándar normal (Z_r) y desviación estándar total (S_o), módulo de rotura del concreto ($S'c$), coeficiente de transferencia de carga (J), coeficiente de drenaje (C_d), módulo de elasticidad del concreto (E_c) y módulo de reacción de la subrasante efectivo (k_{efec}).

El objetivo de esta ecuación es poder determinar el espesor necesario de la losa de concreto que pueda resistir las cargas actuantes en el tiempo de vida útil del pavimento. Además de la ecuación planteada, también se puede obtener la dimensión de la losa a través de un nomograma proporcionado por la propia guía. Según la AASHTO, los principales materiales que debe tener la losa del pavimento son el concreto de cemento Portland, acero de refuerzo, juntas de material sellante y barras de transferencia de carga; así como una capa de material granular o estabilizado debe servir de apoyo a la losa.

2.4.4 Pavimento Rígido - Metodología Portland Cement Association (PCA)

La Portland Cement Association (PCA) publicó su guía de diseño de pavimento de concreto para calles y carreteras en el año 1984. Este método puede emplearse para el diseño de pavimento articulado de concreto simple (JPCP), pavimento articulado de concreto

reforzado (JRCP) y pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP). El diseño del pavimento rígido estará basado en la guía de la PCA 1984.

La metodología de la PCA se basa en dos criterios de diseño: análisis por fatiga y análisis por erosión. En el primero se busca mantener dentro de límites permisibles los esfuerzos del pavimento generados por la acción de cargas repetitivas para evitar el agrietamiento por fatiga; y en el segundo, se pretende restringir los efectos de las deflexiones en el borde de las losas, juntas y esquinas para controlar la erosión de las capas del pavimento y las bermas, bombeo y fallas (Packard, 1984).

Generalmente, el diseño de pavimento para vías de tráfico bajo (con juntas con pasadores o no) está controlado por el análisis de fatiga, en cambio, para vías con tráfico pesado (con juntas con pasadores) el análisis de erosión controla el diseño (Menéndez, 2009). De lo mencionado se desprende que el diseño del pavimento para el caso de estudio estará controlado por el análisis de erosión.

La presente metodología busca hallar el espesor de la losa del pavimento a través de un proceso iterativo en el que se logre que la fatiga y erosión total no superen el 100%. Asimismo, se hace uso de distintas gráficas y tablas para hallar diversos valores como factor de erosión, factor de tensión, repeticiones de carga permisible, entre otros.

Por otro lado, la diferencia de este método con los del Instituto del Asfalto y la AASHTO es la forma en que se analiza el tráfico. Mientras que las metodologías previas consideraban a todos los vehículos como un total en el ESAL, la PCA analiza el efecto de cada tipo de eje por separado (simple, tándem y trídem).

2.5 Mantenimiento de pavimentos

El mantenimiento de un pavimento es una labor tan importante como el propio diseño, ya que permite que la estructura se mantenga en óptimas condiciones durante su tiempo de vida

útil, tal como fue concebida en la etapa en la que se planificó. Un pavimento nuevo sin mantenimiento adecuado se deteriora lenta e imperceptiblemente durante los primeros 8 años, y luego de ese “periodo de gracia”, se deteriora más rápidamente hasta desintegrarse (Vivar, 1991).

Según el Manual de Carreteras – Mantenimiento o Conservación Vial del MTC (2014), el mantenimiento vial se define como el grupo de actividades de trabajo que se efectúan de manera preventiva para evitar el daño anticipado de los componentes que conforman la carretera. Aunque el manual brinda recomendaciones para la conservación de toda la infraestructura vial, el presente caso de estudio solo estará enfocado en el mantenimiento exclusivo del pavimento flexible y rígido. Por lo tanto, el manual mencionado servirá de guía para analizar los siguientes aspectos.

2.5.1 Objetivos de mantenimiento vial

El objetivo principal del mantenimiento vial es preservar la continuidad del flujo de vehículos que transitan sobre el pavimento durante todo el periodo de diseño y bajo cualquier condición climática. De esta forma, para el caso de estudio se debe asegurar la transitabilidad vehicular hasta 20 años después de la construcción de la estructura.

También, el mantenimiento vial busca brindar seguridad a los usuarios de la carretera, ya que fallas en el pavimento pueden generar accidentes y comprometer la vida las personas. Asimismo, se desprende que la conservación vial influye directamente en la reducción del tiempo de viaje y costo de operación vehicular, ya que los automóviles podrán circular a la velocidad de diseño sin necesidad de detenerse debido a grietas en el pavimento y los vehículos no sufrirán un desgaste excesivo.

2.5.2 Políticas del mantenimiento vial

La política en la que se basa el mantenimiento de pavimentos es conservar el patrimonio vial existente en la nación para evitar el deterioro y pérdida de este. La razón de ello es que el costo de reconstrucción es entre 3 a 5 veces mayor que el costo generado por el mantenimiento, por lo que es fundamental evitar que ningún pavimento decline hasta que se encuentre en malas condiciones (Vivar, 1991).

Los trabajos preventivos están relacionados a evitar la infiltración de agua a través de grietas, recuperar la nivelación de la superficie del pavimento y adaptar la vía al incremento de vehículos pesados. Así pues, la clasificación del mantenimiento es la siguiente y se fundamenta en la gravedad del daño en el camino y el tiempo que tome la reparación:

Mantenimiento rutinario: comprende el grupo de actividades correctivas que enmiendan de forma inmediata (plazo hasta de un año) los daños que presenta el pavimento. Algunos trabajos de mantenimiento rutinario son, por ejemplo, la eliminación de baches, el sellado de fisuras, entre otros. Lo que se busca en este tipo de mantenimiento es reparar los daños prematuros que a la larga puedan desencadenar una restauración más costosa y que tome más tiempo.

Mantenimiento periódico: comprende el grupo de actividades que se efectúan según una programación para los diversos tramos de la carretera. La planificación de estos trabajos se produce en base a la demanda de tráfico y a la visibilidad de los daños acumulados que no pueden ser reparados inmediatamente. Básicamente, este tipo de mantenimiento busca recuperar las bermas y las calzadas de la carretera, y el plazo de reparación es mayor a un año. Algunas actividades de mantenimiento periódico son: recapado asfáltico, reemplazo de losas, entre otros.

Mantenimiento de emergencia: las emergencias viales son los acontecimientos de origen natural que ocasionan daños en la carretera e impide el libre tránsito de los vehículos y afecta la seguridad de los usuarios. Algunos ejemplos de emergencias viales son los daños que ocasionan un terremoto o lluvias intensas como las provocadas por el fenómeno del niño. Las emergencias viales no están definidas como actividades de conservación vial, sin embargo, estos trabajos deben ser efectuados a la brevedad posible por el encargado de la gestión del mantenimiento vial.

2.5.3 Programa de gestión vial HDM-4

El programa HDM-4 (Highway Development Management) fue desarrollado bajo la colaboración de distintas instituciones internacionales financieras y de carreteras, como por ejemplo el Banco Mundial, la Administración Nacional de Carreteras de Suecia, entre otros. Asimismo, este sistema es comercializado por la Asociación Mundial de Carreteras.

El programa permite simular el deterioro del pavimento a lo largo del tiempo de vida útil de la carretera, donde se obtiene como datos de salida el porcentaje de fisuración, número de baches, IRI, escalonamiento, deterioro de juntas, entre otros. Para ello, se debe ingresar como parámetros de entrada distintos factores involucrados en la carretera, tales como zona climatológica (temperatura media, precipitación media mensual, índice de humedad, etc.), tráfico (peso, ESAL, etc.), dimensiones del pavimento y de la vía, entre otros.

En base a lo anterior, la gestión vial con HDM-4 sirve para planificar y analizar el mantenimiento que se necesita aplicar a la carretera para poder cumplir los niveles de servicio establecidos. Con ello, se puede prever el costo de conservación durante la existencia prevista de la vía. Con la ayuda de este programa, en la presente tesis se calcula el costo de mantenimiento del pavimento flexible y rígido para el análisis económico.

Capítulo 3: Estudios Pluviométricos y Meteorológicos

3.1 Condiciones climatológicas

El SENAEMI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) cuenta con un mapa climático del Perú en el que caracteriza a diversas zonas del país según sus índices climáticos. Para la zona de estudio, el SENAMHI la clasifica como una región de clima frío o boreal (de los valles mesoandinos), sin presencia de humedad y donde se suelen presentar inviernos secos con fuertes heladas y veranos lluviosos.

Para el análisis pluviométrico y meteorológico, se ha elegido estación Augusto Weberbauer, ya que es la más cercana al tramo de diseño. Esta estación se encuentra ubicada en la latitud $7^{\circ}10'2.98''S$ y longitud $78^{\circ}29'35.14''$, a una altura de 2873 msnm.

3.2 Precipitaciones mensuales y anuales

Al procesar la data de los registros, se pueden obtener los siguientes valores de precipitación mensual, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Precipitación acumulada mensual (mm) en la estación Weberbauer entre los años 1970 y 2012

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	71.0	41.8	79.9	54.5	33.8	19.9	3.2	2.5	18.2	103.0	51.4	54.1
1971	58.4	97.8	275.7	54.7	8.0	12.2	17.6	17.2	28.1	89.8	45.8	66.5
1972	55.5	67.6	113.8	76.2	18.1	4.4	3.4	20.6	0.0	31.4	66.5	50.2
1973	95.4	70.8	92.5	101.6	23.8	28.7	8.5	19.4	91.0	67.0	65.5	75.0
1974	61.6	140.0	89.1	59.0	4.6	17.3	6.5	27.3	38.7	70.7	55.1	76.8
1975	95.6	156.5	202.0	68.8	66.8	10.0	7.2	19.3	45.1	80.2	65.1	0.9
1976	130.4	62.9	81.3	34.5	43.0	23.0	0.1	4.4	12.3	32.2	71.6	44.4
1977	129.9	146.4	141.9	42.6	25.5	8.0	7.5	0.1	16.1	53.4	54.8	68.2
1978	12.7	34.4	48.8	37.0	65.6	3.9	4.4	3.8	25.0	24.4	54.0	44.8
1979	84.1	81.6	159.7	37.1	16.3	1.8	7.5	15.7	33.6	24.4	26.3	46.6
1980	34.9	42.4	65.0	29.3	6.9	15.1	3.2	6.7	2.3	130.4	111.0	106.7
1981	78.2	186.5	105.7	33.7	14.7	6.6	7.2	12.7	22.0	111.9	45.6	111.3
1982	71.7	102.9	75.7	88.7	38.2	7.8	2.1	6.6	43.9	124.8	67.3	87.4
1983	116.6	75.7	152.8	105.7	31.1	10.1	9.6	2.7	19.2	86.9	28.1	118.4
1984	24.7	233.6	123.8	80.0	69.5	25.1	23.4	18.7	36.7	68.6	97.6	104.1
1985	24.6	42.4	37.2	41.9	53.0	0.4	4.8	18.3	37.3	50.0	23.9	40.3
1986	84.4	47.7	96.8	120.2	16.2	0.6	1.2	14.6	1.3	43.6	66.2	51.8
1987	98.2	95.2	39.2	52.2	9.1	4.0	10.8	12.3	39.5	37.2	74.3	61.5
1988	109.7	105.5	44.8	95.6	10.6	5.4	0.0	0.4	32.9	69.4	65.2	63.4
1989	87.0	158.8	113.5	85.4	18.8	16.7	3.2	5.9	53.5	106.6	47.1	2.7
1990	101.8	68.5	58.3	27.4	39.5	24.6	0.8	7.1	20.1	87.6	99.1	72.3
1991	43.8	90.0	133.7	55.2	17.9	0.7	0.4	0.3	10.2	28.2	55.1	71.9
1992	52.6	31.8	66.6	46.5	18.9	21.2	4.6	10.0	40.8	64.0	32.0	34.1
1993	61.0	112.2	245.0	102.9	30.2	1.9	3.3	2.9	51.4	106.3	71.4	84.1
1994	116.9	103.1	170.2	144.9	35.3	3.3	0.0	0.2	11.9	27.2	89.8	122.6
1995	44.7	108.3	79.8	47.5	18.7	1.7	13.2	10.8	11.5	52.1	53.8	72.8
1996	65.2	124.0	120.1	50.4	13.7	0.8	0.5	15.8	13.9	76.2	68.8	34.1
1997	63.8	152.9	26.5	40.4	17.0	15.4	0.2	0.0	27.4	50.8	119.9	129.4
1998	103.0	116.5	257.0	83.9	19.6	4.8	1.3	4.7	17.8	79.6	29.1	47.9
1999	94.8	242.7	69.5	65.0	53.7	22.8	22.1	1.2	81.4	21.7	77.0	68.8
2000	46.0	162.3	126.3	77.3	40.5	15.6	2.1	13.4	56.6	9.9	44.5	122.3
2001	191.2	100.8	230.2	57.2	48.1	2.4	13.9	0.0	34.4	46.2	93.4	90.9
2002	27.0	60.0	133.1	77.2	23.0	8.8	10.7	3.4	14.6	90.3	99.9	86.1
2003	51.1	61.4	103.6	42.1	30.7	22.3	1.8	10.6	14.8	46.0	63.8	80.7
2004	36.1	102.0	56.9	44.5	42.4	2.1	13.8	29.4	19.0	63.4	92.6	123.7
2005	84.9	53.7	136.6	54.0	7.2	4.5	0.6	3.5	31.2	92.3	30.0	87.8
2006	83.2	101.6	199.3	77.6	7.7	23.9	1.8	6.1	33.6	12.7	60.4	81.7
2007	95.4	17.5	182.4	111.5	29.0	1.4	10.7	6.4	11.6	118.9	97.6	68.8
2008	80.2	133.3	118.4	99.1	22.7	15.5	2.3	11.7	34.7	96.5	72.0	0.0
2009	180.7	74.6	110.5	78.8	42.2	17.9	12.3	3.9	11.8	78.5	109.4	74.2
2010	49.5	112.9	154.0	88.4	31.6	8.6	2.6	1.3	29.0	43.4	52.5	70.9
2011	76.6	73.3	125.2	102.0	16.7	0.4	8.3	0.0	47.1	31.5	24.4	109.7
2012	154.2	134.7	126.4	72.8	51.5	0.2	0.0	2.5	19.1	83.2	120.3	58.3

Nota: Fuente propia

Así pues, en base a la Tabla 1, se elaboraron las gráficas de los hidrogramas de precipitaciones mensuales y anuales, presentados en la Figura 12 y Figura 13, respectivamente.

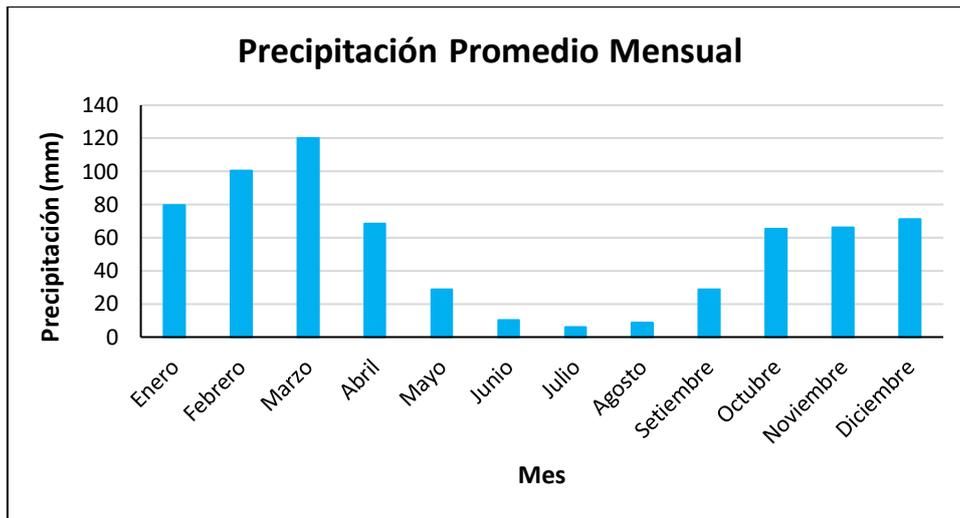


Figura 12: Precipitación promedio mensual en la estación Weberbauer (Fuente: propia)

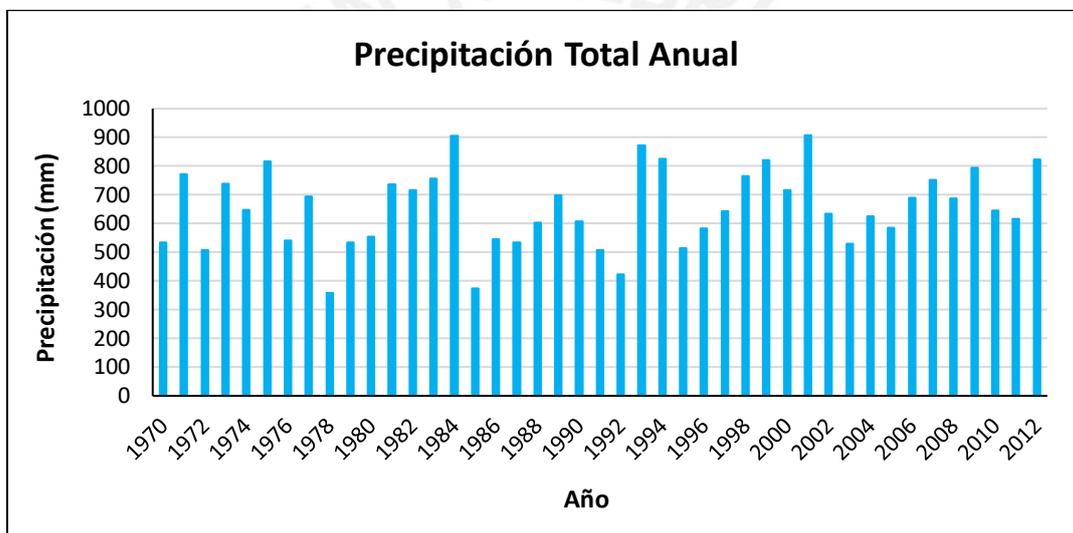


Figura 13: Precipitación total anual en la estación Weberbauer (Fuente: propia)

De la Figura 12 se desprende que entre los meses de junio a agosto la zona presenta poca precipitación. Asimismo, entre los meses de diciembre a marzo es el periodo con mayor cantidad de lluvia (precipitación mayor a 70 mm), siendo el máximo valor 120 mm. Por otro lado, de la Figura 13 se desprende que las precipitaciones anuales oscilan entre 359 y 909 mm, con un promedio de aproximadamente 654 mm. Entonces, de lo mencionado se puede concluir que el tramo de diseño estará expuesto a grandes cantidades de lluvia durante la mayor parte del año. Este dato servirá para poder diseñar el pavimento bajo la metodología AASHTO.

3.3 Temperatura mínima de la zona

Se elaboró la Tabla 2 con los valores de temperatura mínima mensual.

Tabla 2: Temperatura mínima mensual (°C) en la estación Weberbauer entre los años 1970 y 2012

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	9.5	8.8	8.3	-	7.8	5.9	4.5	4.3	6.1	8.6	8.5	8.7
1971	8.1	8.5	10.1	8.4	6.9	6.4	4.4	5.6	6.1	8.3	6.9	8.4
1972	7.3	7.5	9.2	8.9	6.9	5.6	5.0	5.7	-	6.5	6.9	7.8
1973	10.5	8.7	9.5	9.1	6.2	5.1	4.6	4.5	5.9	7.7	8.0	7.0
1974	7.6	8.4	7.6	6.4	5.0	5.4	2.5	5.2	6.3	7.7	6.9	7.0
1975	6.9	7.2	7.9	7.1	5.6	0.0	2.0	2.7	4.8	6.4	6.2	6.1
1976	9.5	8.2	8.6	7.1	7.1	4.8	4.4	5.0	6.4	6.2	7.0	7.5
1977	10.3	9.8	10.0	8.0	5.6	4.8	4.7	5.0	7.0	7.2	7.8	8.5
1978	8.0	8.5	7.0	8.4	6.6	3.4	4.6	3.9	7.0	5.5	8.4	8.3
1979	7.9	10.3	10.3	8.0	6.2	3.8	5.2	6.2	7.6	6.5	7.4	6.1
1980	9.1	7.8	9.5	8.2	6.3	5.7	5.3	5.2	7.3	9.8	9.1	7.8
1981	7.7	10.8	8.5	9.2	7.1	5.5	3.8	5.1	5.7	8.3	8.3	8.8
1982	8.0	7.7	8.1	7.7	6.7	5.3	4.4	4.8	6.8	8.6	7.9	9.8
1983	10.5	8.6	10.0	9.4	8.4	5.6	4.7	4.8	7.3	8.3	7.9	8.9
1984	6.6	10.2	10.0	8.9	7.0	6.1	4.2	5.3	6.3	7.6	5.5	8.4
1985	8.2	8.5	7.9	7.5	6.4	5.7	4.0	5.8	7.3	6.2	5.4	8.5
1986	9.6	8.3	8.1	9.8	6.8	3.9	4.3	7.8	6.6	7.1	7.9	9.0
1987	11.3	10.2	8.1	8.4	6.0	5.5	6.3	5.7	8.0	7.6	9.3	9.6
1988	10.5	10.5	9.1	9.1	6.8	4.3	3.2	4.2	7.0	7.8	8.7	8.0
1989	9.2	9.8	8.7	9.0	4.9	5.5	3.3	5.3	7.6	8.6	6.4	5.3
1990	9.6	8.3	9.2	9.0	6.9	7.4	5.0	5.3	7.2	9.3	9.6	7.3
1991	8.2	9.2	10.2	8.1	6.6	5.0	2.7	5.6	6.2	7.5	6.7	7.6
1992	9.7	9.2	9.4	9.3	6.4	6.2	4.3	5.3	7.4	8.0	8.2	7.5
1993	9.1	9.1	9.9	10.2	7.9	5.2	4.7	5.7	7.3	8.8	7.9	10.9
1994	10.3	10.5	9.5	9.4	7.9	5.8	5.4	5.2	6.9	7.3	8.0	9.1
1995	8.8	9.5	9.9	8.1	6.5	5.4	6.2	5.9	7.0	8.2	8.9	8.5
1996	9.0	9.3	10.3	8.9	6.9	5.5	5.0	5.7	7.4	9.0	5.9	8.5
1997	7.9	10.4	7.1	8.3	7.3	5.0	6.4	7.2	8.2	9.5	10.1	11.7
1998	11.6	11.4	12.2	11.3	7.2	5.7	4.7	5.8	6.9	9.2	6.9	6.8
1999	8.8	10.2	9.1	9.2	7.3	6.6	4.9	4.6	7.7	6.8	7.7	9.4
2000	7.7	9.2	9.4	9.0	7.6	6.3	4.9	5.3	7.8	6.3	4.6	8.7
2001	10.2	10.4	10.5	8.4	7.5	5.3	5.5	5.0	7.0	9.1	9.5	8.9
2002	8.3	10.6	10.6	8.9	7.2	5.4	6.2	5.9	6.8	9.2	10.0	10.8
2003	10.0	9.6	9.1	8.9	7.5	5.8	4.6	5.4	6.7	8.1	9.1	9.3
2004	7.0	10.2	9.6	8.0	7.1	5.7	6.3	5.8	7.0	9.1	9.3	9.7
2005	8.5	10.5	10.7	9.3	5.2	5.2	3.8	5.1	7.1	9.3	6.2	8.8
2006	9.3	11.1	10.8	8.1	5.7	6.8	4.7	6.5	7.2	7.9	8.8	10.4
2007	11.0	8.6	10.5	9.0	7.7	4.8	5.3	5.8	5.8	8.0	9.9	7.6
2008	10.1	9.8	9.4	9.1	7.2	5.3	4.9	6.2	7.7	9.2	8.9	-
2009	10.3	10.1	10.5	10.0	7.6	5.9	6.5	6.6	7.4	9.3	8.9	10.4
2010	10.1	10.5	11.1	9.4	8.0	6.5	5.7	5.3	7.6	7.3	7.5	9.5
2011	9.1	8.5	8.5	9.4	6.6	6.1	5.9	6.0	7.0	7.8	9.2	9.8
2012	10.7	9.3	9.9	9.3	7.2	5.0	4.8	5.4	6.6	9.5	10.2	9.0

Nota: Fuente propia

Así pues, en base a la Tabla 2, se grafica la temperatura mínima mensual y anual, presentados en la Figura 14 y Figura 15, respectivamente.

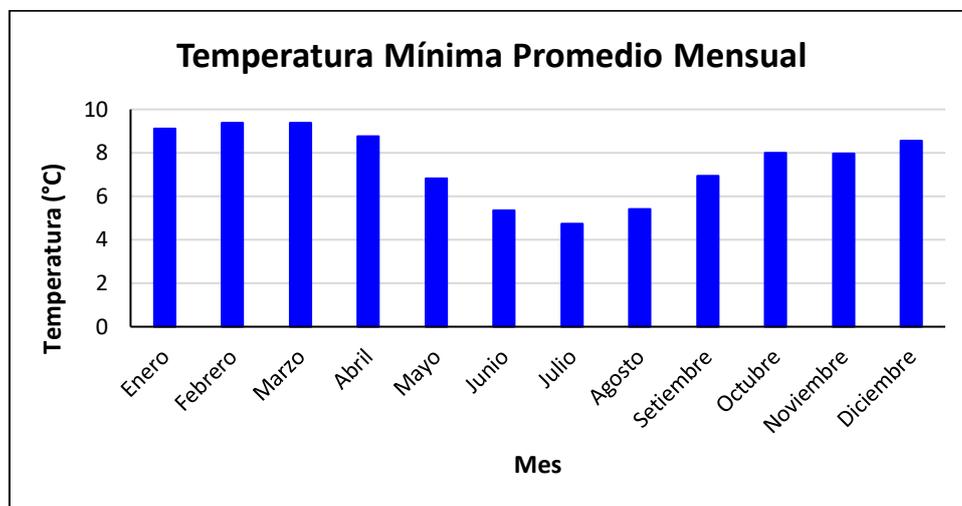


Figura 14: Temperatura mínima promedio mensual en la estación Weberbauer (Fuente: propia)

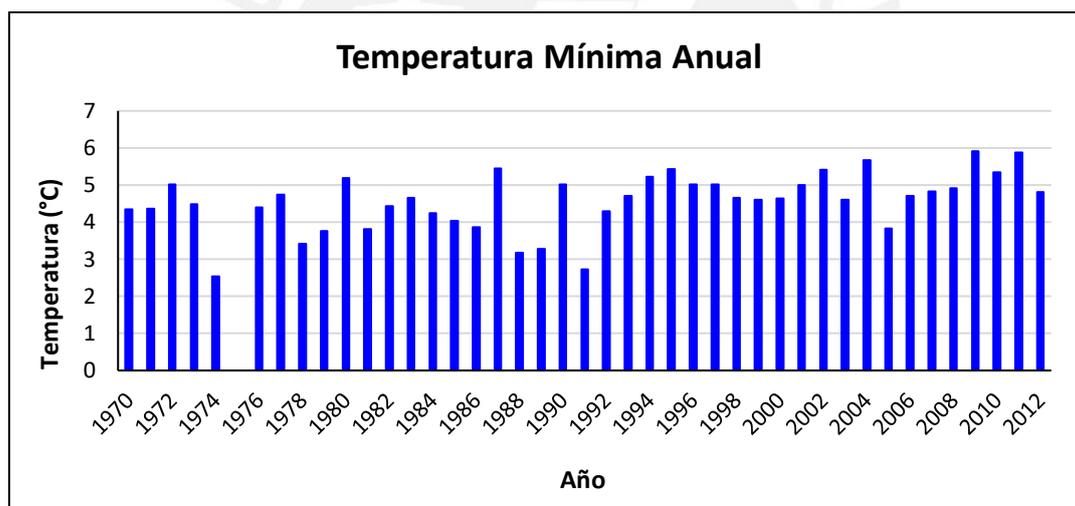


Figura 15: Temperatura mínima anual en la estación Weberbauer (Fuente: propia)

De la Figura 14 se desprende que los meses de junio a agosto son el periodo más frío donde la zona presenta temperatura mínima de casi 5 °C. Asimismo, los meses de diciembre a marzo son el periodo con temperatura mínimas no tan bajas, de aproximadamente 9 °C. Por otro lado, de la Figura 15 se desprende que, salvo eventos extraordinarios como la helada de 1975, la temperatura mínima anual no suele estar por debajo de los 3 °C. Entonces, de lo mencionado se puede concluir que el tramo de diseño no estará expuesto a ciclos de hielo y deshielo. Asimismo, la temperatura mínima promedio es de 7.5 °C.

3.4 Temperatura máxima de la zona

Se elaboró la Tabla 3 con los valores de temperatura máxima mensual.

Tabla 3: Temperatura máxima mensual (°C) en la estación Weberbauer entre los años 1970 y 2012

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	19.9	21.1	19.4	-	20.0	20.1	18.7	20.9	20.8	21.0	19.8	20.6
1971	20.4	19.3	18.8	19.1	19.4	19.6	20.1	19.8	19.7	19.9	20.1	20.0
1972	19.7	20.4	19.4	19.1	19.0	20.6	21.1	21.7	-	21.8	22.2	21.9
1973	21.1	20.9	21.0	20.8	21.3	21.4	20.6	21.0	20.6	20.4	21.1	19.8
1974	19.9	19.6	20.3	21.0	21.4	20.2	20.3	20.9	20.6	20.7	21.4	21.0
1975	20.4	20.3	20.3	20.6	20.0	20.0	20.0	20.2	20.5	20.8	20.6	21.7
1976	19.8	20.1	20.6	20.7	20.6	20.1	20.3	20.7	22.2	22.7	22.4	22.1
1977	21.4	19.7	20.9	21.0	21.1	20.6	21.2	21.8	21.9	22.0	21.3	22.0
1978	22.0	23.0	22.1	21.6	21.3	21.3	21.1	21.1	21.7	22.5	22.3	22.3
1979	22.1	20.6	20.1	21.2	21.9	22.1	21.6	22.6	22.2	23.2	23.2	22.6
1980	22.4	22.5	21.5	22.0	23.0	22.5	22.0	22.2	23.2	20.9	20.8	21.0
1981	21.0	20.4	20.6	21.8	22.3	22.6	21.7	22.2	22.4	21.7	21.9	22.1
1982	21.7	22.2	20.1	21.5	22.2	22.2	22.0	22.0	22.1	21.1	21.5	21.6
1983	22.5	22.4	21.8	21.7	22.4	22.7	22.9	22.7	22.3	21.8	23.1	21.0
1984	20.9	19.8	20.7	21.0	20.6	20.5	20.4	21.6	21.9	21.6	21.3	21.4
1985	20.8	20.9	22.6	21.7	21.8	22.1	21.2	21.8	22.3	22.6	22.9	22.6
1986	22.1	21.6	21.8	21.5	22.1	22.1	21.6	22.0	22.8	22.9	22.6	22.5
1987	21.9	21.9	22.7	22.2	22.7	23.7	23.0	23.0	23.2	23.3	22.4	22.8
1988	21.7	22.1	21.6	21.5	22.1	22.7	22.4	22.9	22.2	22.1	21.8	21.4
1989	21.0	20.2	20.5	21.0	21.7	21.2	21.8	22.1	21.6	21.3	23.1	23.8
1990	21.9	22.0	22.1	22.3	22.4	21.4	22.1	22.8	23.3	21.9	21.8	22.3
1991	21.9	22.0	21.7	22.0	22.5	23.8	23.3	22.6	23.2	22.2	22.9	23.2
1992	22.7	23.0	22.9	22.4	23.4	22.4	21.6	22.6	21.9	21.7	22.9	23.5
1993	22.0	21.1	20.1	20.9	21.9	22.0	22.2	22.0	21.7	21.1	21.3	21.2
1994	20.8	20.8	20.8	20.8	21.2	20.7	21.2	21.3	22.3	22.4	21.7	21.4
1995	22.2	21.1	20.8	21.9	21.9	22.3	21.7	22.8	21.9	22.1	21.9	21.8
1996	20.4	20.5	20.6	20.7	21.5	22.1	21.8	21.3	22.1	21.8	22.5	22.2
1997	21.6	20.3	22.2	21.9	22.4	22.7	22.3	22.0	23.0	23.2	21.7	21.7
1998	22.0	22.3	21.7	22.6	22.9	21.8	21.9	22.0	22.8	22.0	22.3	22.6
1999	21.2	19.6	20.7	20.6	20.5	20.8	20.3	21.8	21.3	21.4	21.9	20.8
2000	21.2	19.7	20.2	20.6	21.0	21.2	21.1	21.5	21.7	22.4	22.7	20.8
2001	19.7	20.4	20.1	20.9	21.5	21.2	21.5	22.2	22.1	22.7	21.4	22.1
2002	21.9	21.1	21.3	21.0	21.5	21.4	21.2	22.2	22.9	21.3	21.2	21.9
2003	21.6	21.7	20.9	21.9	21.8	21.9	21.5	22.4	22.9	23.1	22.6	21.4
2004	22.5	21.1	21.7	22.1	22.8	21.3	20.9	21.8	21.6	21.9	21.8	21.3
2005	21.7	22.1	21.3	21.8	22.1	22.5	22.3	22.3	22.4	21.1	22.2	21.3
2006	21.4	21.1	20.8	21.2	21.9	20.8	21.7	21.8	21.7	22.1	21.9	21.7
2007	22.1	21.1	20.8	21.0	21.6	21.3	21.6	21.4	20.9	21.2	20.7	20.9
2008	20.4	20.3	19.9	20.6	21.2	21.3	20.9	21.6	21.7	21.0	21.7	-
2009	20.6	20.7	20.7	21.0	21.6	21.7	20.9	22.1	22.3	22.2	21.8	21.8
2010	21.9	22.4	22.4	22.8	22.1	21.5	22.8	22.7	22.3	22.0	21.9	20.7
2011	21.0	20.8	20.2	20.9	21.7	21.7	21.2	22.2	21.2	21.4	22.4	21.0
2012	20.9	20.6	21.3	21.3	21.3	21.6	22.0	22.1	21.9	21.2	21.6	22.1

Nota: Fuente propia

Así pues, en base a la Tabla 3, se grafica la temperatura máxima mensual y anual, presentados en la Figura 16 y Figura 17, respectivamente.

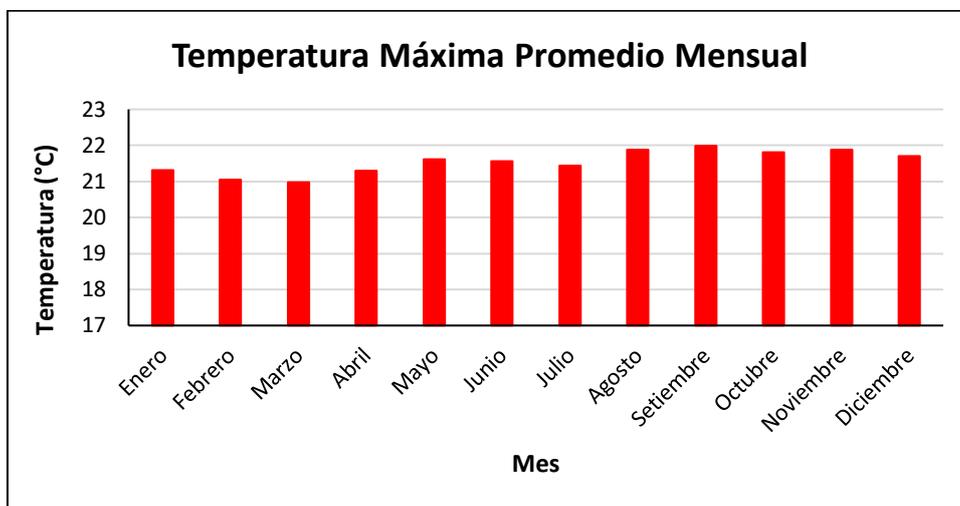


Figura 16: Temperatura máxima promedio mensual en la estación Weberbauer (Fuente: propia)

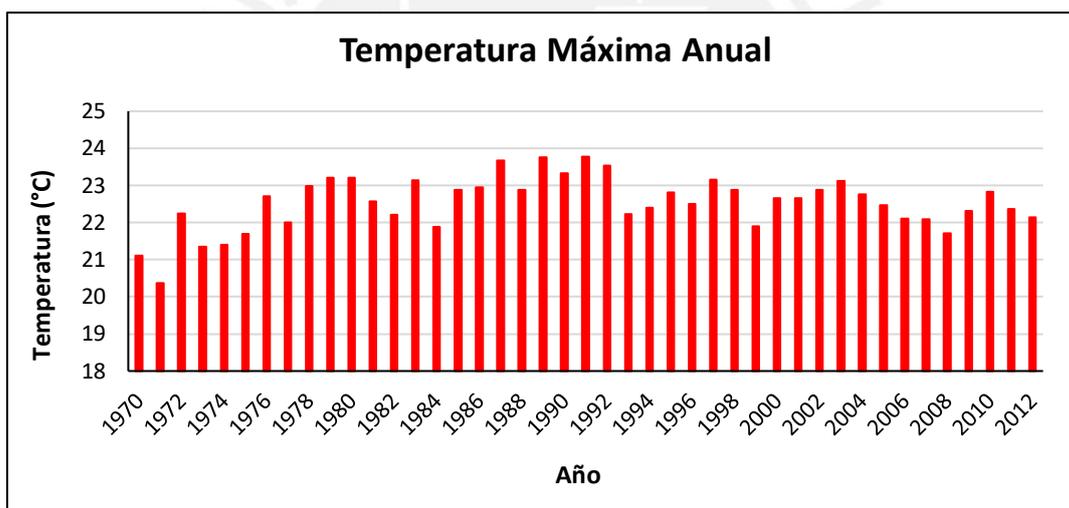


Figura 17: Temperatura máxima anual en la estación Weberbauer (Fuente: propia)

De la Figura 16 se desprende que la zona presenta una temperatura máxima constante durante todos los meses del año, que varía entre 21 °C y 22 °C. Por otro lado, de la Figura 17 se desprende que la temperatura máxima anual nunca ha llegado a superar los 24 °C. Entonces, de lo mencionado se puede concluir que el tramo de diseño presenta una temperatura máxima promedio de 21.5 °C. Asimismo, de lo estudiado en este capítulo se concluye que la temperatura promedio de la zona es de 14.5 °C. Este dato servirá para poder diseñar el pavimento bajo la metodología del Instituto del Asfalto.

Capítulo 4: Estudio de Mecánica de Suelos y Cantera

4.1 Estudios de la subrasante

La subrasante es el terreno de fundación en el cual se apoya el pavimento, por lo tanto, es importante efectuar el estudio de mecánica de suelos para conocer sus características físico-mecánicas. De esta forma, se puede determinar si el suelo es competente para emplearlo en la construcción, o si se necesita realizar algún mejoramiento o reemplazo de este. Asimismo, cabe recalcar que de la calidad de la subrasante depende mayormente cual será el espesor del pavimento. En la Tabla 4 se presenta la información geotécnica de la subrasante del tramo de diseño.

Tabla 4: Resumen de datos de la subrasante

Característica	Valor
SUCS	CL
AASHTO	A-7-5 (12)
Humedad óptima (Proctor Modificado)	16.40%
Densidad máxima seca (Proctor Modificado)	1.86 gr/cm ³
CBR (a una compactación del 95% de la máxima densidad del ensayo Proctor Modificado)	7%

Nota: Fuente propia

A continuación, se analizan las características geotécnicas del suelo de subrasante en base a los resultados de los ensayos laboratorio presentados en la Tabla 4:

1) Ensayo granulométrico y clasificación del suelo: para el caso en estudio, la subrasante ha sido clasificada según el sistema AASHTO como un suelo clase A-7-5 (12) y según el sistema SUCS como una arcilla de baja plasticidad (CL). De ello, se infiere que podrían presentarse problemas por deformaciones (hundimientos) cuando el suelo se sature.

2) Ensayo de compactación Proctor modificado: para el caso en estudio, se encontró que la máxima densidad seca de la subrasante es 1.86 gr/cm³ y el contenido de humedad para el cual se logra esta densidad (contenido óptimo de humedad) es 16.4%. Por ello, la arcilla de la

subrasante debe ser densificada a esta humedad para disminuir la compresibilidad y contracción del suelo.

3) Ensayo de California Bearing Ratio (CBR): para el caso de estudio, el CBR de la subrasante es igual a 7%, a una compactación del 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado. Para evaluar este valor del suelo, se hace uso de la clasificación de subrasante proporcionada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), la cual se muestra en la Tabla A1 del Anexo A. Como el CBR es mayor a 6%, se desprende que para el diseño se cuenta con una subrasante regular, por lo cual puede ser usada para la construcción y no necesita ser reemplazada o mejorada.

4.2 Requisitos para los materiales granulares

Como ya se mencionó previamente, además de la subrasante, un pavimento está conformado por capas de base y subbase que están compuestas por materiales granulares para que puedan cumplir satisfactoriamente las funciones para las cuales fueron diseñadas. Las propiedades mecánicas que estos suelos deben cumplir están normadas por el Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción del MTC (2013).

Estos materiales granulares son provenientes de las canteras más cercanas al lugar de la obra. Para el tramo de diseño, se considera a la cantera Rejo como lugar de procedencia del material de base, subbase y los materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica y el concreto hidráulico. Esta cantera se encuentra aproximadamente a 10 km de distancia del tramo de diseño, tal como se muestra en la Figura 18. La cantera está ubicada a lo largo del lecho del río Rejo, conformada por depósitos fluviales que se componen de bolones y cantos de forma redondeada mayor a 2" y por grava bien gradada con arena de forma redondeada con finos no plásticos (Cesel, 2006), tal como se muestra en la Figura 19.

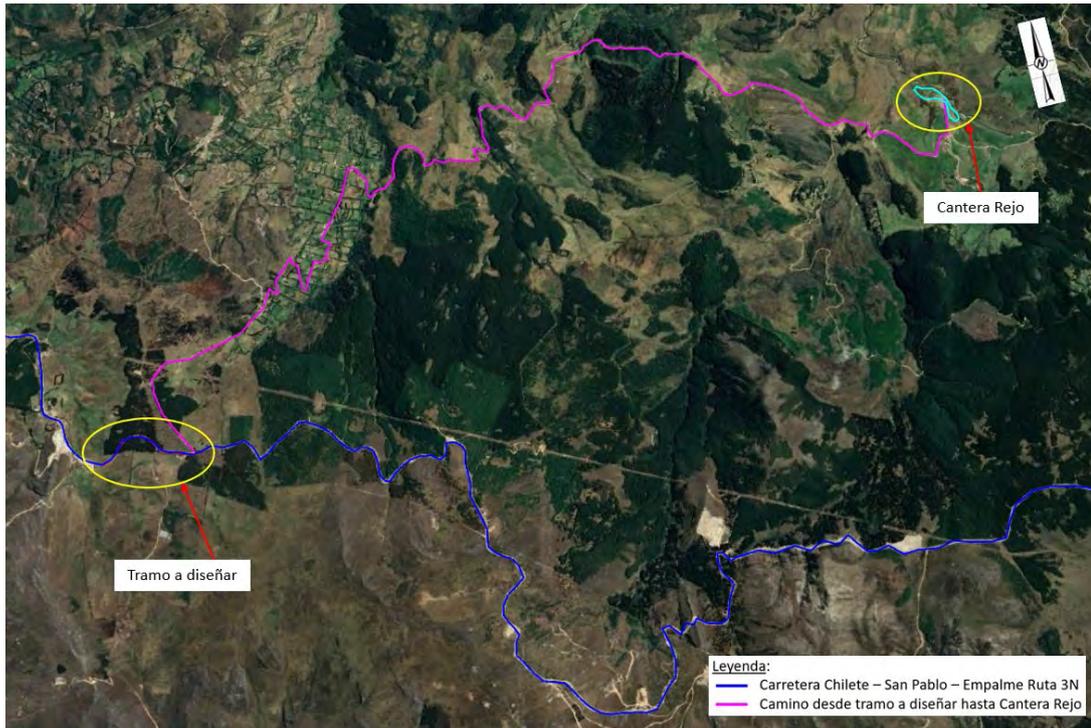


Figura 18: Ubicación de cantera Rejo respecto al tramo a diseñar
Tomado de Google Earth por Google, 2022



Figura 19: Calicatas en la cantera Rejo
Tomado de Informe Final Ingeniería Definitiva para la Carretera: Chilete - San Pablo - Empalme Ruta 3N (Km. 25 Carretera Cajamarca - Bambamarca) por Cesel, 2006

4.2.1 Subbase

Existen cuatro tipos de gradaciones a las que puede ajustarse el suelo de la subbase según la geografía del lugar y/o la disponibilidad de material. Para los pavimentos que se construyan en altitudes mayores o iguales a 3000 msnm, la norma establece que solo se debe emplear material que se ajuste a la gradación “A” de la Tabla A2 del Anexo A.

Asimismo, el suelo de la subbase deberá cumplir con todos los requisitos de calidad que se muestran en la Tabla A3 del Anexo A para que el pavimento pueda desempeñarse satisfactoriamente durante todo su tiempo de vida útil. En la Tabla 5 se presenta la información geotécnica del material de subbase a emplear en el presente caso de estudio.

Tabla 5: Resumen de datos de la subbase

Característica	Valor
SUCS	SM
AASHTO	A-2-5
Humedad óptima (Proctor Modificado)	13.34%
Densidad máxima seca (Proctor Modificado)	1.90 gr/cm ³
CBR (a una compactación del 100% de la máxima densidad del ensayo Proctor Modificado)	23%

Nota: Fuente propia

De la Tabla 5 se desprende que el material de cantera utilizado para la subbase será arena limosa con un CBR de 23% a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado, a pesar de que el MTC recomienda que para altitudes mayores a 3000 msnm el CBR debería ser de 40% como mínimo. Debido a que la subbase no tiene un CBR adecuado, los espesores de capas del pavimento serán mayores a que si se tuviera una subbase competente.

4.2.2 Base

Al igual que en la subbase, para el material de base también existen cuatro tipos de gradaciones a las cuales puede ajustarse este suelo según la geografía del lugar y/o la disponibilidad de material. Para los pavimentos que se construyan en altitudes mayores o

iguales a 3000 msnm, la norma establece que solo se debe emplear material que se ajuste a la curva “A” de la Tabla A4 del Anexo A. Asimismo, la norma brinda la Tabla A5 del Anexo A en la que establece los valores mínimos de CBR que se deben cumplir en base al tráfico que existe en la carretera. Por otra parte, el MTC establece que la fracción gruesa del suelo de base (material retenido en la malla #4) debe cumplir con los requisitos de la Tabla A6 del Anexo A. También, la fracción fina del suelo de base (material pasante a la malla #4) debe cumplir con los requisitos de la Tabla A7 del Anexo A. En la Tabla 6 se presenta la información geotécnica del material de base a emplear en el presente caso de estudio.

Tabla 6: Resumen de datos de la base

Característica	Valor
Granulometría	Piedra Chancada – Tipo B
Humedad óptima (Proctor Modificado)	8.12%
Densidad máxima seca (Proctor Modificado)	2.08 gr/cm ³
CBR (a una compactación del 100% de la máxima densidad del ensayo Proctor Modificado)	106%

Nota: Fuente propia

De la Tabla 6 se desprende que el material de cantera utilizado para la base será piedra chancada con gradación B, a pesar de que el MTC recomienda que para altitudes mayores a 3000 m.s.n.m. solo se debe emplear material de gradación “A”. Por otro lado, se sabe que el material granular tiene un CBR de 106% a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado, lo cual cumple satisfactoriamente los valores mínimos CBR de 80% y 100% para tránsito ligero y pesado, respectivamente.

Capítulo 5: Estudio de Tráfico

5.1 Índice medio diario anual

El índice medio diario anual (IMDA) es el valor cuantitativo estimado del tráfico vehicular de un segmento del sistema vial a lo largo de un año que se obtiene de los conteos volumétricos y clasificación vehicular en campo durante una semana, y un factor de corrección que extrapola el conteo a un volumen anual (Índice Medio Diario Anual - MTC).

Para el estudio de tráfico se toma como dato el conteo de vehículos en las estaciones de aforo más cercanas a la carretera. Para el caso de estudio, se tiene de dato de entrada el índice medio diario anual según la clasificación estipulada en el Reglamento Nacional de Vehículos.

En la Tabla 7 se muestra el conteo vehicular proporcionado. Asimismo, en la Figura 20 se muestra gráficamente la distribución de volumen de vehículos. De la Tabla 7 se desprende que el conteo total es 7999 vehículos, por lo tanto, según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico del MTC (2018), esta vía es clasificada como una autopista de primera clase.

Tabla 7: Conteo vehicular carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N

Configuración Vehicular	N° de Vehículos
Automóviles	6934
C2	182
C3	143
C4	92
8X4	64
T2S1	38
T2S2	18
T2S3	30
T2Se2	81
T3S1	32
T3S2	27
T3Se2	36
C2R3	52
T3S3	40
8X4R3	39
8X4R4	26
B3-1	92
B4-1	73

Nota: Fuente propia

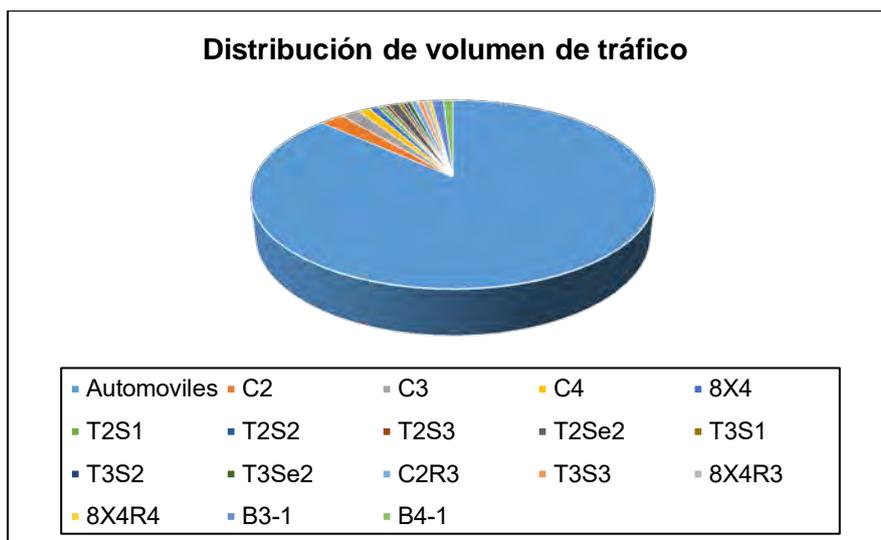


Figura 20: Distribución de volumen de tráfico de la carretera (Fuente: propia)

Por otra parte, en la Figura 20 se aprecia que existe una cantidad predominante de automóviles, que representa el 86.7% del total de vehículos que transitan la vía. Asimismo, los tipos de vehículos que le siguen en cantidad son el C2 y C3 con 2.3% y 1.8%, respectivamente. Por otro lado, el tipo vehículo que transita por la vía en menor medida es el T2S2, con un porcentaje de 0.2% con respecto al total.

5.2 Estimación de tránsito futuro

El tránsito futuro es estimado en base al crecimiento económico y poblacional que tendrá la zona. Esto es lógico, ya que una mejora en el pavimento atrae a nuevos conductores a transitar por la carretera y el volumen de tránsito aumenta.

El crecimiento poblacional puede ser estimado en base a la información brindada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Asimismo, el crecimiento económico puede ser estimado en base al Producto Bruto Interno (PBI). Con estos datos se puede efectuar una ponderación para obtener la tasa de crecimiento anual. Para la presente tesis, la tasa de crecimiento anual tendrá un valor de 4.63%.

Luego de obtener la tasa de crecimiento anual, se puede calcular la proyección del IMDA en base a la ecuación planteada por el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC (2014), la cual se muestra a continuación:

$$T_n = T_o * (1 + r)^{n-1}$$

Ecuación 3

Donde: “Tn” es tránsito proyectado al año “n”, “To” es el tránsito en el año base, “r” es la tasa anual de crecimiento de tránsito y “n” es el número de años del periodo de diseño. Entonces, con un tránsito de año base de 7999 vehículos y una tasa de crecimiento anual de 4.63% se obtiene la siguiente proyección de IMDA que se muestra en la Figura 21 y en la Tabla 8:

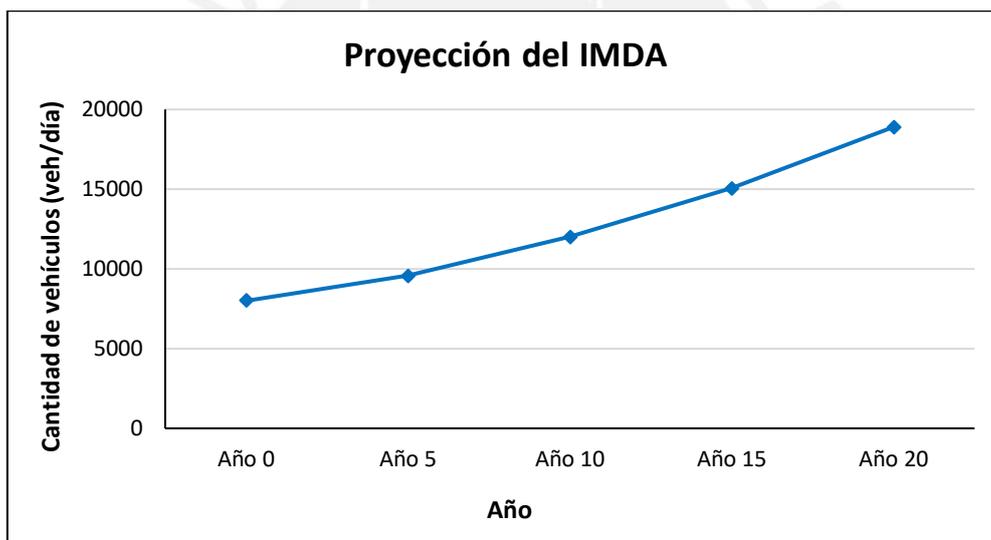


Figura 21: Proyección del IMDA en la carretera en los próximos 20 años (Fuente: propia)

Tabla 8: Proyección del IMDA en la carretera en los próximos 20 años

Tiempo de diseño (años)	Cantidad de vehículos por día
0	7 999
5	9 587
10	12 021
15	15 074
20	18 902

Nota: Fuente propia

De la Tabla 8 se desprende que, para el año 10 de diseño, el tránsito vehicular aumentará en un 50%, para el año 15 llegará a casi el doble y para el año 20, el tránsito aumentará en un 136%, todos los valores con respecto al número de vehículos del año inicial.

5.3 Factor de carga equivalente por eje

Tal como establece la AASHTO (1993), el daño que generan las diversas cargas a las que está sometido un pavimento por efecto del paso de distintos vehículos debe ser estandarizado a un eje equivalente de 18 kips. A este factor de carga por eje equivalente se le denomina EALF por sus siglas en inglés.

Para el cálculo del EALF, con ayuda de las tablas de la AASHTO, es necesario definir el nivel de serviciabilidad final, el número estructural del pavimento y el espesor de la losa de concreto. Debido a que la carretera es una vía expresa, el nivel de serviciabilidad final debe ser igual a 3. Asimismo, Huang (2004) plantea que un número estructural igual a 5 puede ser usado en la mayoría de los casos. Por otro lado, debido al volumen vehicular elevado, se considera un predimensionamiento de espesor de losa de concreto de 11 pulgadas. Entonces, el EALF es calculado para pavimento flexible y rígido, tal como se muestra en la Tabla 9 y Tabla 10, respectivamente.

Tabla 9: Factor de Carga Equivalente (EALF) para pavimento flexible, SN=5 y Pt=3

Tipo de eje	Carga por eje (ton)	Carga por eje (kips)	EALF
Simple	1	2.2	0.0004
Simple	7	15.4	0.573
Simple	7+7	2(15.4)	1.146
Dual	11	24.3	2.710
Tándem	16	35.3	1.289
Tándem	18	39.7	1.932
Trídem	23	50.7	1.327
Trídem	25	55.1	1.781

Nota: Fuente propia

Tabla 10: Factor de Carga Equivalente (EALF) para pavimento rígido, D=11" y Pt=3

Tipo de Eje	Carga por Eje (ton)	Carga por Eje (kips)	EALF
Simple	1	2.2	0.0004
Simple	7	15.4	0.521
Simple	7+7	2(15.4)	1.042
Dual	11	24.3	3.680
Tándem	16	35.3	2.301
Tándem	18	39.7	3.776
Trídem	23	50.7	3.223
Trídem	25	55.1	4.554

Nota: Fuente propia

5.4 Factores de equivalencia

Posterior a haber hallado el EALF de cada tipo de eje, se estandarizan los ejes de cada tipo de vehículo del IMDA para obtener el factor de equivalencia (LEF) de cada uno de ellos. Los pesos de cada eje de cada tipo de vehículo son establecidos por el Reglamento Nacional de Vehículos (2003). Al igual que en EALF, el cálculo se efectúa tanto para pavimento flexible como para rígido, como se muestra en la Tabla 11 y Tabla 12, respectivamente.

Tabla 11: Cálculo de LEF para pavimento flexible según la carga medida

Tipo de Vehículo	Cargas (ton)				EALF				Factor de Equivalencia (LEF)
	Eje Delantero	1 eje	2 eje	3 eje	Eje Delantero	1 eje	2 eje	3 eje	
Automóviles	1	1			0.0004	0.0004			0.001
C2	7	11			0.573	2.710			3.283
C3	7	18			0.573	1.932			2.505
C4	7	23			0.573	1.327			1.900
8X4	7+7	18			1.146	1.932			3.078
T2S1	7	11	11		0.573	2.710	2.710		5.993
T2S2	7	11	18		0.573	2.710	1.932		5.215
T2S3	7	11	25		0.573	2.710	1.781		5.064
T2Se2	7	11	11	11	0.573	2.710	2.710	2.710	8.703
T3S1	7	18	11		0.573	1.932	2.710		5.215
T3S2	7	18	18		0.573	1.932	1.932		4.437
T3Se2	7	18	11	11	0.573	1.932	2.710	2.710	7.925
C2R3	7	11	11	18	0.573	2.710	2.710	1.932	7.925
T3S3	7	18	25		0.573	1.932	1.781		4.286
8X4R3	7+7	18	11	18	1.146	1.932	2.710	1.932	7.720
8X4R4	7+7	18	18	18	1.146	1.932	1.932	1.932	6.942
B3-1	7	16			0.573	1.289			1.862
B4-1	7+7	16			1.146	1.289			2.435

Nota: Fuente propia

Tabla 12: Cálculo de LEF para pavimento rígido según la carga medida

Tipo de Vehículo	Cargas (ton)				EALF				Factor de Equivalencia (LEF)
	Eje Delantero	1 eje	2 eje	3 eje	Eje Delantero	1 eje	2 eje	3 eje	
Automóviles	1	1			0.0004	0.0004			0.001
C2	7	11			0.521	3.680			4.201
C3	7	18			0.521	3.776			4.297
C4	7	23			0.521	3.223			3.744
8X4	7+7	18			1.042	3.776			4.818
T2S1	7	11	11		0.521	3.680	3.680		7.881
T2S2	7	11	18		0.521	3.680	3.776		7.977
T2S3	7	11	25		0.521	3.680	4.554		8.755
T2Se2	7	11	11	11	0.521	3.680	3.680	3.680	11.561
T3S1	7	18	11		0.521	3.776	3.680		7.977
T3S2	7	18	18		0.521	3.776	3.776		8.073
T3Se2	7	18	11	11	0.521	3.776	3.680	3.680	11.657
C2R3	7	11	11	18	0.521	3.680	3.680	3.776	11.657
T3S3	7	18	25		0.521	3.776	4.554		8.851
8X4R3	7+7	18	11	18	1.042	3.776	3.680	3.776	12.274
8X4R4	7+7	18	18	18	1.042	3.776	3.776	3.776	12.370
B3-1	7	16			0.521	2.301			2.822
B4-1	7+7	16			1.042	2.301			3.343

Nota: Fuente propia

5.5 Tráfico de diseño

Para obtener el número de ejes equivalentes durante el tiempo de vida útil de la estructura (ESAL), la AASHTO plantea la siguiente ecuación:

$$ESAL = (ADT_o)(T)(Tf)(GY)(D)(L)(365)$$

Ecuación 4

Donde:

- ❖ ADT_o = Transito medio diario inicial
- ❖ T = Porcentaje de camiones en el ADT
- ❖ Tf = Numero de aplicaciones de carga de ejes de 18 kips por camión
- ❖ G = Factor de crecimiento
- ❖ Y = Periodo de diseño
- ❖ D = Factor de distribución direccional
- ❖ L = Factor de distribución de carril

El ADTo se calcula como la sumatoria de la multiplicación del factor de equivalencia (LEF) por el número de ejes equivalentes de cada tipo del conteo. El tránsito medio diario inicial es calculado para pavimento flexible y rígido por separado (distinto LEF cada uno), como se visualiza en la Tabla 13 y Tabla 14, respectivamente.

Tabla 13: Cálculo de ADTo para pavimento flexible

Configuración Vehicular	N° de Vehículos	Factor de Equivalencia LEF	Número de Ejes Equivalentes
Automóviles	6 934	0.001	6
C2	182	3.283	598
C3	143	2.505	359
C4	92	1.900	175
8X4	64	3.078	197
T2S1	38	5.993	228
T2S2	18	5.215	94
T2S3	30	5.064	152
T2Se2	81	8.703	705
T3S1	32	5.215	167
T3S2	27	4.437	120
T3Se2	36	7.925	286
C2R3	52	7.925	413
T3S3	40	4.286	172
8X4R3	39	7.720	302
8X4R4	26	6.942	181
B3-1	92	1.862	172
B4-1	73	2.435	178
Total ADTo			4 505

Nota: Fuente propia

Tabla 14: Cálculo de ADTo para pavimento rígido

Configuración Vehicular	N° de Vehículos	Factor de Equivalencia LEF	Número de Ejes Equivalentes
Automóviles	6 934	0.001	6
C2	182	4.201	765
C3	143	4.297	615
C4	92	3.744	345
8X4	64	4.818	309
T2S1	38	7.881	300
T2S2	18	7.977	144
T2S3	30	8.755	263
T2Se2	81	11.561	937
T3S1	32	7.977	256
T3S2	27	8.073	218
T3Se2	36	11.657	420
C2R3	52	11.657	607
T3S3	40	8.851	355
8X4R3	39	12.274	479
8X4R4	26	12.370	322
B3-1	92	2.822	260
B4-1	73	3.343	245
Total ADTo			6 846

Nota: Fuente propia

Debido a que se cuenta con el conteo vehicular, no es necesario estimar el porcentaje de camiones. Por lo tanto, T y Tf son iguales a 1. Por otro lado, la AASHTO plantea calcular el factor de crecimiento acumulado (GY) con la siguiente ecuación:

$$GY = \frac{(1 + r)^Y - 1}{r}$$

Ecuación 5

Donde “r” es el crecimiento anual, que como ya se menciono tiene un valor de 4.63% y el periodo de diseño (Y) es 20 años. Por lo tanto, la ecuación 5 queda de la siguiente manera:

$$GY = \frac{(1 + 0.0463)^{20} - 1}{0.0463} = 31.80$$

Entonces el crecimiento acumulado es igual a 31.80. De ello se desprende que el factor de crecimiento tiene un valor de 1.59. Por otra parte, en base a la AASHTO, el factor de distribución direccional será igual a 0.5, ya que la carretera de estudio es de doble sentido. Asimismo, para hallar el factor de distribución de carril (L), la AASHTO proporciona la Tabla

A8 del Anexo A. Como la carretera de estudio tiene un carril en cada dirección, entonces el factor de distribución de carril será igual al 100%.

Cabe recalcar que, para la metodología del Instituto del Asfalto, el factor de distribución direccional y el factor de distribución por carril están unificados en un solo factor (LxD), tal como se muestra en la Tabla A9 del Anexo A. Al comparar los resultados de LxD en ambas metodologías (AASHTO e IA), se obtienen el mismo resultado. A continuación, se presenta en la Tabla 15 y Tabla 16 un resumen con todos los datos para calcular el ESAL, tanto para pavimento flexible como rígido, respectivamente.

Tabla 15: Resumen de datos para el cálculo del ESAL en pavimento flexible

Pavimento flexible	
ADTo	4 505
T	1
T _f	1
D	0.5
L	1
Y	20
r	0.0463
GY	31.80
G	1.59

Nota: Fuente propia

Tabla 16: Resumen de datos para el cálculo del ESAL en pavimento rígido

Pavimento rígido	
ADTo	6 846
T	1
T _f	1
D	0.5
L	1
Y	20
r	0.0463
GY	31.80
G	1.59

Nota: Fuente propia

Finalmente, con el uso de la ecuación 3, expuesta al inicio de este subcapítulo, se obtiene el valor del ESAL tanto para pavimento flexible como rígido, tal como se muestra en la Tabla

17. Así pues, ambos valores serán usados como dato de entrada para su respectivo diseño bajo las metodologías de la AASHTO y el Instituto del Asfalto. Por otro lado, en la Figura 22 se muestra el ESAL para diversos periodos de diseño, tanto para pavimentos flexible como rígido.

Tabla 17: Valor de ESAL para pavimento flexible y rígido

Tipo de Pavimento	ESAL
Flexible	2.61×10^7
Rígido	3.97×10^7

Nota: Fuente propia

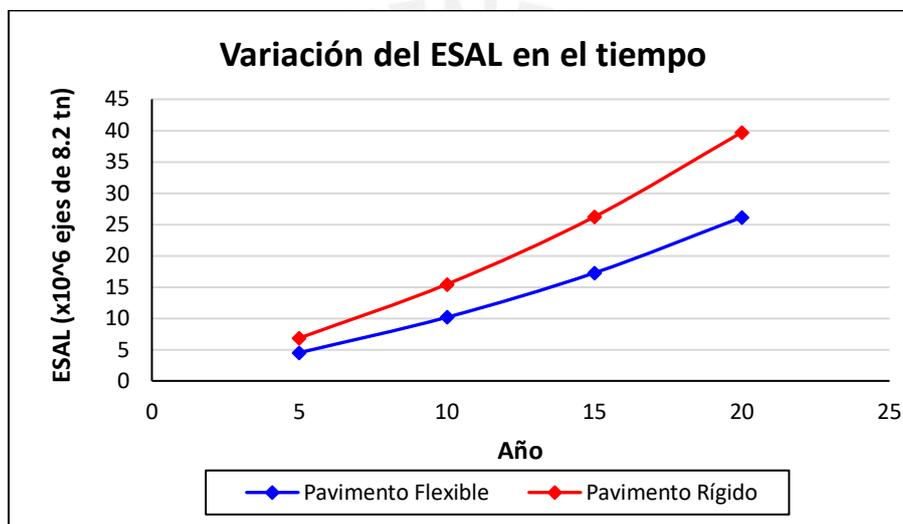


Figura 22: Variación de ESAL para diversos periodos de diseño (Fuente: propia)

Capítulo 6: Diseño de los Pavimentos Flexibles

Hoy en día, para el diseño de pavimento flexible existen diversas metodologías a emplear que toman en cuenta distintos factores del lugar de estudio para el cálculo de la estructura del pavimento. Algunos métodos están creados para usarse en zonas similares en donde se efectuaron los ensayos de diseño y otros métodos han sido extrapolados para ejecutarse en el lugar que se requiera.

Para el presente caso de estudio, se diseñarán los pavimentos flexibles bajo las metodologías de dos organizaciones estadounidenses muy reconocidas a nivel mundial, las cuales son: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Instituto del Asfalto (IA). Estos métodos gozan de gran prestigio porque los pavimentos que han sido diseñados bajo su criterio han presentado un óptimo desempeño en su tiempo de vida útil.

6.1 Método AASHTO

6.1.1 Parámetros de entrada del diseño

Para emplear el nomograma de la guía AASHTO, se necesitan como parámetros de entrada los siguientes factores:

- ❖ **Número de ejes equivalentes (ESAL):** el tránsito de diseño fue calculado en el capítulo 5 y para el pavimento flexible se obtuvo un valor de 2.61×10^7 ejes equivalentes de 18 kips de carga.
- ❖ **Periodo de diseño:** el valor es de 20 años. Este periodo resulta razonable ya que la carretera de diseño es una vía de gran importancia a nivel local (Cajamarca) y nacional.
- ❖ **Confiabilidad:** este parámetro permite garantizar que las alternativas de diseño estarán funcionales durante el tiempo de análisis. Así pues, para una carretera de gran importancia se debe tener un mayor grado de confiabilidad, de tal manera que la vía tenga

un desempeño óptimo durante todo su tiempo de vida útil. Asimismo, se desprende que una confiabilidad mayor deberá tener espesores mayores de pavimento con respecto a una confiabilidad baja.

La guía AASHTO permite obtener este parámetro según ciertas clasificaciones de la carretera (ver Tabla A10 del Anexo A). Primero se debe clasificar a la vía según su funcionalidad, en la que se definen cuatro tipos: interestatales, arteriales, colectoras y locales. En el caso de estudio, la vía es clasificada como interestatal, ya que conecta a dos regiones de Cajamarca. Por otro lado, se debe efectuar una segunda clasificación de la vía, para determinar si es urbana o rural. Para la vía de diseño se tiene una carretera rural, ya que el trazo discurre fuera de las vías urbanas de la localidad.

Como se observa en la Tabla A10 del Anexo A, para la carretera de estudio se tiene una confiabilidad (R) entre 80% y 99.9%. Para el diseño se elegirá el valor promedio del rango, por lo tanto, la confiabilidad será igual al 90%.

- ❖ **Desviación estándar normal:** la confiabilidad del diseño debe evaluarse en términos de desviación estándar de la distribución normal de la estadística que se plantea. Así pues, la guía AASHTO permite obtener este parámetro en base a la confiabilidad (ver Tabla A11 del Anexo A). Para la carretera de estudio con nivel de confiabilidad de 90% le corresponde una desviación estándar normal (Z_r) igual a -1.282.
- ❖ **Desviación estándar combinada o total:** este parámetro involucra la variabilidad de cada uno de los factores asociados al modelo de predicción de desempeño del pavimento. La variabilidad predominante es el pronóstico de tráfico futuro, así pues, para una carretera donde el tráfico no ha sido medido se debe tener una mayor desviación estándar total. Asimismo, se desprende que una desviación estándar total mayor deberá tener espesores mayores de pavimento con respecto a una baja desviación estándar total.

La guía AASHTO permite obtener la desviación estándar total (S_o) para pavimento flexible en base al tipo de conteo vehicular (ver Tabla A12 del Anexo A). Debido a que el conteo vehicular que se tiene en el caso de estudio ha sido medido, entonces la desviación estándar total (S_o) será igual a 0.44.

- ❖ **Módulo de resiliencia de la subrasante:** los pavimentos están sometidos a cargas cíclicas provenientes del tránsito vehicular, por lo que la deformación permanente del suelo se va acumulando, hasta tal punto que el suelo llega a un estado en el que las deformaciones son recuperables, es en ese instante en el que el suelo presenta un comportamiento resiliente (Instituto Mexicano del Transporte, 2001). Entonces, el módulo de resiliencia es un módulo de elasticidad que relaciona los esfuerzos cíclicos con las deformaciones resilientes.

El módulo de resiliencia (M_r) puede ser determinado directamente a través del ensayo AASHTO T294-92, o puede ser determinado a partir de una correlación con el CBR del suelo. La Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG, 2001) de la AASHTO proporciona la siguiente ecuación :

$$M_r = 2555 * CBR^{0.64}$$

Ecuación 6

El valor del CBR de la subrasante fue mostrado en el capítulo 4 y es igual a 7%. Por lo tanto, aplicando la ecuación mostrada anteriormente, se obtiene un módulo de resiliencia de la subrasante (M_r) de 8877 psi.

- ❖ **Pérdida de serviciabilidad:** la serviciabilidad puede definirse como la facilidad que tiene un pavimento para brindar confort a los conductores. El índice de serviciabilidad comprende un rango de 0 a 5, donde cero significa que la vía es intransitable y 5 que el pavimento se encuentra en condiciones ideales.

La guía AASHTO establece que el índice de serviciabilidad inicial (p_o) de un pavimento flexible es igual a 4.2. Por otro lado, la guía define el concepto de índice de serviciabilidad final como el momento en el que un pavimento necesita ser repavimentado o reconstruido. Así pues, la serviciabilidad final (p_f) fue definida en el capítulo 5 y tiene un valor de 3. Por lo tanto, la pérdida de serviciabilidad (Δp) queda definida con la siguiente ecuación:

$$\Delta p = p_o - p_f$$

Ecuación 7

Entonces, se desprende que la pérdida de serviciabilidad es igual a 1.2. El cuadro resumen de los parámetros de entrada de diseño se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18: Resumen de parámetros de entrada para el diseño de pavimento flexible método AASHTO

Parámetro	Valor	Unidad
Numero de ejes equivalentes (W18)	2.61×10^7	ESAL
Periodo de diseño	20	años
Confiabilidad (Rd)	90	%
Desviación estándar normal (Zr)	-1.282	
Desviación estándar total (So)	0.44	
Índice de serviciabilidad inicial (p_o)	4.2	
Índice de serviciabilidad final (p_f)	3	
ΔPSI	1.2	
CBR de la subrasante	7	%
Módulo de resiliencia de la subrasante (Mr)	8877	psi

Nota: Fuente propia

6.1.2 Diseño de espesores

Como ya se mencionó previamente, para obtener los espesores de las diferentes capas del pavimento flexible, es necesario resolver la ecuación del número estructural (SN) planteada por la AASHTO, la cual está en función de coeficientes estructurales y de drenaje de las distintas capas, y se muestra a continuación:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Ecuación 8

Donde los parámetros son: coeficiente estructural de capa (a_i), espesor de capa (D_i), coeficiente de drenaje de capa (m_i) y los números 1,2 y 3 representan a la carpeta asfáltica, base y subbase, respectivamente.

- ❖ **Número estructural (SN):** Al emplear los parámetros de entrada en el nomograma propuesto por la guía AASHTO para calcular el número estructural, se obtiene un valor de 5.95. En la Figura B1 del Anexo B se presenta las líneas de trazo en el nomograma. Cabe recalcar que este valor ha sido comprobado al resolver la ecuación 1, para obtener el valor exacto del número estructural.
- ❖ **Coefficientes estructurales:** estos parámetros están basados en el módulo elástico M_R y se encargan de convertir cada capa del pavimento en un número estructural; por ello, es una medida de la capacidad relativa que tiene un material para trabajar como un elemento estructural en un pavimento (AASHTO 1993). La guía AASHTO proporciona gráficas para poder calcular los coeficientes estructurales de la capa asfáltica (a_1), capa base (a_2) y capa subbase (a_3) del pavimento en base a cuatro ensayos de laboratorio: CBR, valor R, Triaxial Texas y Modulo de resiliencia.

Para el valor a_1 , si se utiliza mezcla asfáltica en caliente, la AASHTO establece que el rango del coeficiente estructural a_1 está entre 0.40 y 0.44, siendo el menor valor el asfalto proveniente de una planta de baja calidad y el mayor valor una planta de buena calidad. Para el presente caso de estudio, se trabajará en forma conservadora con el valor más bajo, ya que no se sabe que estándar de calidad tendrá la planta, por lo tanto, el valor de a_1 es igual a 0.40.

Para el valor de a_2 , como se tiene de dato el valor del CBR de la base, se empleará la gráfica de la guía AASHTO. Así pues, para un CBR igual a 106% el valor del coeficiente estructural de la base es igual a 0.14. En la Figura B2 del Anexo B se muestra el trazo para el cálculo de a_2 .

Para el valor de a_3 , como se tiene de dato el valor del CBR de la subbase, se empleará la gráfica de la guía AASHTO. Así pues, para un CBR igual a 23% el valor del coeficiente estructural de la subbase es igual a 0.10. En la Figura B3 del Anexo B se muestra el trazo para el cálculo de a_3 . En la Tabla 19 se muestra un resumen de los coeficientes estructurales de las capas del pavimento.

Tabla 19: Coeficientes estructurales de las capas del pavimento flexible

Tipo de Capa	CBR (%)	Coficiente Estructural (a_i)
Carpeta Asfáltica	-	0.40
Base	106	0.14
Subbase	23	0.10

Nota: Fuente propia

- ❖ **Coeficientes de drenaje:** el drenaje en un pavimento es muy importante porque permite que las capas de suelo no se saturen. De lo contrario, se pueden generar esfuerzos adicionales en el suelo que causen la pérdida de resistencia y deformaciones. La guía AASHTO proporciona los valores de coeficiente de drenaje de la base y subbase según la calidad de drenaje de las capas y el tiempo en el que el pavimento se encuentra saturado (ver Tabla A13 del anexo A).

Según los diversos ensayos efectuados por Sobolewski, como la capa base está compuesta por la gradación tipo B de la norma (material gravoso), tiene un coeficiente de permeabilidad de 10^{-1} cm/s, y como la subbase está compuesta por arena limosa, su coeficiente de permeabilidad esta entre 10^{-2} y 10^{-4} cm/s aproximadamente (Sobolewski, 2005). Entonces, se deduce que la base tiene una calidad de drenaje buena y la subbase una calidad de drenaje regular.

Por otro lado, según lo que se desarrolló en el capítulo 3, la zona presenta precipitaciones durante todo el año y la precipitación anual es de aproximadamente 654 mm. Además, teniendo en cuenta el “Fenómeno del Niño” que se suele presentar en el lugar de estudio, se desprende que el tiempo que la estructura del pavimento estará expuesta a niveles de

humedad cercanos a la saturación será mayor a 25%. Por lo tanto, según la Tabla A13 del Anexo A, el coeficiente de drenaje para la base (m1) será igual a 1 y para la subbase (m2) será igual a 0.80. En la Tabla 20 se muestra un resumen de los coeficientes de drenaje de las capas del pavimento.

Tabla 20: Coeficientes de drenaje de las capas del pavimento flexible

Tipo de Capa	CBR (%)	Coefficiente de Drenaje (m_i)
Base	106	1.00
Subbase	23	0.80

Nota: Fuente propia

La ecuación del número estructural (ecuación 8) tiene muchas combinaciones de soluciones, de esta forma, los espesores de capa pueden ajustarse al costo efectivo y disponibilidad de material. Por ello, la guía AASHTO recomienda unos valores mínimos de carpeta asfáltica y base con relación al ESAL para asegurar que sea práctica la colocación de los espesores de capa del pavimento y se pueda tener un punto de partida en el proceso iterativo. Para el caso de estudio, debido a que el ESAL es mayor a 7×10^6 , la guía AASHTO recomienda un espesor mínimo de carpeta asfáltica de 4 pulgadas (10cm) y de base de 6 pulgadas (15 cm).

A continuación, en la Tabla 21 se presentan las distintas alternativas planteadas para el espesor del pavimento flexible.

Tabla 21: Alternativas de espesor de capa de pavimento flexible en base a metodología AASHTO

Alternativa	Espesor de capa		
	Carpeta Asfáltica (pulg)	Base (cm)	Subbase (cm)
1	4	20	105
2	4	25	95
3	4	30	90
4	4	35	80

Nota: Fuente propia

6.2 Método del Instituto del Asfalto

6.2.1 Parámetros de entrada del diseño

Para emplear los diagramas de diseño brindados por el Instituto del Asfalto, se necesitan como parámetros de entrada los siguientes factores:

❖ **Número de ejes equivalentes (ESAL):** el tránsito de diseño fue calculado en el capítulo 5 y para el pavimento flexible se obtuvo un valor de 2.61×10^7 ejes equivalentes de 18 kips de carga.

❖ **Módulo de resiliencia de la subrasante:** como se explicó en el apartado anterior, es el módulo que relaciona los esfuerzos cíclicos con las deformaciones resilientes.

El Instituto del Asfalto determina que para hallar el módulo resiliente se debe tomar el valor del módulo menor al 60%, 75% o 87.5% de los demás ensayos, según el número de ejes de 8.2 ton en el carril de diseño, tal como se muestra en la Tabla A14 del Anexo A. Esta recomendación se establece para disminuir la variabilidad que se tiene en la resistencia del suelo de la subrasante.

En base a la Tabla A14 del Anexo A, como el ESAL para el pavimento flexible es igual a 2.61×10^7 , entonces le corresponde un valor de diseño de módulo de la subrasante menor al 87.5% de los otros ensayos. Sin embargo, debido a que para el caso de estudio solo se cuenta con un único valor de ensayo de CBR de la subrasante, entonces tomará este valor para el diseño. Se aplica la ecuación 5 que brinda la AASHTO para hallar el valor del módulo de resiliencia. Entonces, como el valor del CBR es igual a 7%, se desprende que el valor del módulo de resiliencia de la subrasante es igual a 8877 psi, lo que equivale a 61.20 MPa.

❖ **Temperatura Promedio Anual del Aire (MAAT):** los diagramas de diseño del Instituto del Asfalto fueron elaborados para tres regímenes de temperatura media anual del aire, los cuales son 7 °C, 15.5 °C y 24 °C. En el capítulo 3 se explicó que, según SENAMHI, la zona de estudio tiene un clima frío o boreal con una temperatura media

anual de 14.5 °C. Por lo tanto, para el cálculo de espesores del pavimento se emplearán los diagramas de diseño que establezcan una temperatura próxima a los 14.5 °C. En este caso, se utilizarán las cartas MAAT 15.5 °C.

6.2.2 Diseño de espesores

Como se mencionó previamente, además de la división de tres regímenes de MAAT, el Instituto del Asfalto establece una subdivisión de cartas de diseño según los materiales a emplearse en la construcción del pavimento. Así pues, para el caso de estudio se utilizarán tres cartas de diseño del MAAT 15.5 °C: primero, espesor completo de concreto asfáltico, segundo, espesor compuesto de carpeta asfáltica y base no tratada de 15 cm, y, por último, espesor compuesto de carpeta asfáltica y base no tratada de 30 cm.

Para emplear la carta de diseño, se debe ingresar con el valor del ESAL en el eje X y el módulo resiliente de la subrasante en el eje Y, para así hallar el punto de unión en la gráfica. Si el punto no se intersecta con ninguna curva, se debe interpolar con las curvas próximas para obtener el espesor total del pavimento. El trazo en las gráficas se encuentra en las Figuras C1, C2 y C3 del Anexo C. Los resultados de espesores de la estructura del pavimento se muestran en la Tabla 22:

Tabla 22: Alternativas de espesores de capa de pavimentos obtenidos de cartas de diseño del IA

Alternativa	Carpeta Asfáltica (cm)	Base (cm)
1	42	-
2	37	15
3	36	30

Nota: Fuente propia

De lo expuesto, se desprende que el Instituto del Asfalto no considera a la subbase como capa de la estructura del pavimento. Por ello, los espesores de carpeta asfáltica son mayores con respecto al método AASHTO. Sin embargo, desde el punto de vista económico, no resulta práctico no contar con una subbase. Es así como se puede transformar el

pavimento compuesto por carpeta asfáltica y base en uno que también cuente con capa de subbase a través de la equivalencia del número estructural de ambos.

Se procede a calcular el número estructural de las tres alternativas planteadas en la Tabla 22 con la ayuda de los coeficientes estructurales ($a_1=0.40$, $a_2=0.14$, $a_3=0.10$) y coeficientes de drenaje ($m_2=1$ y $m_3=0.8$) hallados en el método AASHTO. De esta forma, se pueden comparar las tres opciones en la Tabla 23:

Tabla 23: Número estructural de las tres alternativas de diseño

Alternativa	Carpeta Asfáltica (cm)	Base (cm)	Número Estructural
1	42	-	6.61
2	37	15	6.65
3	36	30	7.32

Nota: Fuente propia

De la Tabla 23 se observa que las tres alternativas tienen en promedio un número estructural similar. Entonces, se escoge la opción que presenta un menor número estructural, ya que será el sistema estructural que presentará un desempeño adecuado frente a las cargas actuantes y además tendrá el menor espesor de pavimento.

Para el caso de estudio, la alternativa 1 (pavimento con espesor completo de concreto asfáltico) es la que tiene menor número estructural ($SN=6.61$). Sin embargo, no es recomendable tener un pavimento sin capas granulares, ya que se tendrán problemas con el drenaje del agua. Por lo tanto, se dimensionará la estructura del pavimento considerando capas de base y subbase, no solo por factores de drenaje, sino también por factores económicos, ya que estas capas son más económicas que la carpeta asfáltica.

Para ello se sigue los lineamientos del método AASHTO, al iterar el espesor de capas que satisfagan el número estructural. Cabe recalcar que el número estructural obtenido por la metodología del Instituto del Asfalto (6.61) es mayor que el hallado por la metodología AASHTO (5.95).

Entonces, para que sean comparables ambas metodologías, se emplearán los espesores mínimos recomendados por la AASHTO. Así pues, se tendrá espesor mínimo de carpeta asfáltica de 4 pulgadas (10 cm) y espesor mínimo de base de 6 pulgadas (15 cm).

Luego, se procede a dimensionar las capas del pavimento, de tal manera que satisfagan el número estructural mínimo y tomando en cuenta el espesor mínimo de capa asfáltica. Entonces, se obtiene la Tabla 24 con las distintas opciones de dimensionamiento:

Tabla 24: Alternativas de espesor de capa de pavimento flexible en base a método del Instituto del Asfalto

Alternativa	Espesor			
	Carpeta Asfáltica (pulg)	Base (cm)	Subbase (cm)	SN
1	4	20	125	6.64
2	4	25	120	6.76
3	4	30	110	6.72
4	4	35	100	6.68

Nota: Fuente propia

Capítulo 7: Diseño de los Pavimentos Rígidos

Para el diseño de pavimento rígido existen diversas metodologías a emplear que toman en cuenta distintos factores del lugar de estudio, así como las fallas que se pueden presentar en el pavimento para el cálculo de la estructura. Asimismo, además de hallar los espesores de cada capa del pavimento, también se deben diseñar las juntas (longitudinales y transversales) en el concreto. Todas las metodologías señalan que el diseño correcto de juntas es crucial para el adecuado desempeño de la estructura.

Para el presente caso de estudio, se diseñarán los pavimentos rígidos bajo las metodologías de dos organizaciones estadounidenses muy reconocidas a nivel mundial, las cuales son: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la Portland Cement Association (PCA). Estos métodos son usados ampliamente en muchos países porque los pavimentos que han sido diseñados bajo su criterio han presentado un óptimo desempeño en su tiempo de vida útil.

7.1 Método AASHTO

7.1.1 Parámetros de entrada del diseño

Para emplear el nomograma de la guía AASHTO, se necesitan como parámetros de entrada los siguientes factores:

- ❖ **Número de ejes equivalentes (ESAL):** el tránsito de diseño fue calculado en el capítulo 5 y para el pavimento rígido se obtuvo un valor de 3.97×10^7 ejes equivalentes de 18 kips de carga.
- ❖ **Periodo de diseño:** el valor es de 20 años. Este periodo resulta prudente ya que la carretera de diseño es una autopista de gran interés a nivel regional (Cajamarca) y nacional.
- ❖ **Confiabilidad:** este parámetro permite incorporar cierto grado de seguridad en el diseño para brindar la certeza que las alternativas de diseño durarán en el tiempo de análisis.

Así pues, para una carretera de gran envergadura se debe tener un mayor grado de confiabilidad en el diseño, de tal forma que el pavimento tenga un desempeño adecuado durante su tiempo de vida útil. Además, se desprende que una confiabilidad mayor influirá en tener un espesor de losa de concreto de mayor dimensión.

La guía AASHTO permite obtener este parámetro según ciertas clasificaciones de la carretera. Como ya se estableció en el diseño de pavimento flexible método AASHTO, la autopista se clasifica como interestatal y pertenece a la zona rural. Entonces, según la Tabla A10 del Anexo A, para la vía de estudio se tiene una confiabilidad (R) entre 80% y 99.9%. Para el diseño se elegirá el valor promedio del rango, por lo tanto, la confiabilidad será igual al 90%.

❖ **Desviación estándar normal:** la confiabilidad del diseño debe evaluarse en términos de desviación estándar de la función de distribución normal de la estadística que se plantea. Así pues, la guía AASHTO, permite obtener este parámetro en base a la confiabilidad. Según la Tabla A11 del Anexo A, para la vía de estudio con un nivel de confiabilidad de 90% le corresponde una desviación estándar normal (Z_r) igual a -1.282.

❖ **Desviación estándar combinada o total:** este parámetro abarca la variabilidad de cada uno de los parámetros asociados al modelo de predicción de desempeño del pavimento. La variabilidad predominante es el pronóstico de tránsito futuro, por ello, para una autopista donde el tráfico no ha sido medido se debe tener un valor alto de desviación estándar total. Asimismo, se infiere que una desviación estándar total mayor conllevará a tener espesor de losa mayor con respecto a una baja desviación estándar total.

La guía AASHTO permite obtener la desviación estándar total (S_o) para pavimento rígido en base al tipo de conteo vehicular, tal como se muestra en la Tabla A16 del Anexo A. Entonces, como el conteo vehicular que se tiene en el caso de estudio ha sido medido, la desviación estándar total (S_o) será 0.34.

- ❖ **Pérdida de serviciabilidad:** la serviciabilidad puede definirse como la competencia que tiene un pavimento para brindar confort a los conductores. El índice de serviciabilidad comprende una categoría de 0 a 5, donde cinco significa que el pavimento se encuentra en condiciones ideales y cero que la autopista es intransitable.

La guía AASHTO establece que el índice de serviciabilidad inicial (p_o) de un pavimento rígido es igual a 4.5. Por otro lado, la guía define el concepto de índice de serviciabilidad final (p_f) como el momento en el que un pavimento necesita ser repavimentado o reconstruido. Así pues, la serviciabilidad final fue definida en el capítulo 5 y tiene un valor de 3. Por lo tanto, la pérdida de serviciabilidad (Δp) queda definida por la ecuación 6 y se obtiene un valor de 1.5.

- ❖ **Módulo elástico del concreto:** es importante conocer esta característica del material, ya que representa la rigidez que tiene el concreto frente a una carga actuante. Por ello, la Norma Técnica Peruana E.060 Concreto Armado establece la siguiente ecuación para hallar el módulo de elasticidad del concreto (E_c) en función de la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2009):

$$E_c = 15000 * \sqrt{f'_c}$$

Ecuación 9

Asimismo, el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC proporciona recomendaciones acerca de la resistencia mínima que debe tener el concreto a utilizarse (ver Tabla A17 del Anexo A).

Entonces, como el ESAL para el pavimento rígido es 3.97×10^7 , le corresponde una resistencia a la compresión del concreto de 350 kg/cm^2 . Así pues, empleando la ecuación 9, se obtiene un valor del módulo de elasticidad del concreto de $280\,624 \text{ kg/cm}^2$, lo que equivale a $3.99 \times 10^6 \text{ psi}$.

- ❖ **Módulo de rotura del concreto:** también se le llama resistencia media del concreto a la flexión y es un indicador de la resistencia a la tracción, la cual está relacionada con el agrietamiento potencial por fatiga de la losa de concreto del pavimento (Higuera, 2010). Según el ACI 363, el módulo de rotura ($S'c$) se relaciona con la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días con la siguiente ecuación (ACI Committee 363R-92, 1997):

$$S'c = \alpha * \sqrt{f'c}$$

Ecuación 10

Donde el valor de α está en el rango entre 1.99 y 3.18, por lo que se usará el valor promedio (2.585). Entonces, se obtiene un módulo de rotura igual a 48.4 kg/cm², lo que equivale a 688 psi.

- ❖ **Coefficiente de transferencia de carga:** este parámetro toma en consideración la capacidad de la estructura para distribuir las cargas por medio de las discontinuidades tales como juntas, dispositivos de transferencia, trabazón de agregados y bermas. Así pues, la guía AASHTO proporciona la siguiente Tabla A18 del Anexo A para hallar el coeficiente de transferencia de carga (J), el cual depende del tipo de berma, de la presencia o no de pasadores (dowels) y del tipo de pavimento de concreto.

Para el caso de estudio se tendrá berma de asfalto (por ser más económico) y se diseñará un pavimento no reforzado con dowels como dispositivo de transferencia de carga. Entonces, el valor del coeficiente de transferencia de carga es 3.2.

- ❖ **Coefficiente de drenaje:** el drenaje en un pavimento es muy importante porque permite que las capas de suelo no se saturen. De lo contrario, se pueden generar esfuerzos adicionales en el suelo que causen la pérdida de resistencia y deformaciones. La guía

AASHTO proporciona los valores de coeficiente de drenaje según la calidad de drenaje y el tiempo en el que el pavimento se encuentra saturado (ver Tabla A19 del Anexo A). Según los diversos ensayos efectuados por Sobolewski (2005), como la capa base está compuesta por la gradación tipo B de la norma (material gravoso), tiene un coeficiente de permeabilidad de 10^{-1} m/s. Entonces, se deduce que la base tiene una calidad de drenaje buena.

Por otro lado, según lo que se desarrolló en el capítulo 3, la zona presenta precipitaciones durante todo el año y la precipitación anual es de aproximadamente 654 mm. Además, teniendo en cuenta el “Fenómeno del Niño” que se suele presentar en el lugar de estudio, se desprende que el tiempo que la estructura del pavimento estará expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación será mayor a 25%. Por lo tanto, según la Tabla A19 del Anexo A, el coeficiente de drenaje para la base (C_d) será igual a 1.

- ❖ **Módulo de reacción de la subrasante:** representa la capacidad de soporte de la subrasante y se puede obtener directamente de campo con el ensayo de la prueba de placa, sin embargo, resulta muy costoso y generalmente se calcula este parámetro utilizando correlaciones con el CBR de la subrasante (Higuera, 2010).

La guía de la PCA brinda un ábaco para poder hallar el módulo de reacción de la subrasante (k) en base al CBR, con lo que se obtiene un valor de 4.7 kg/cm^3 , que equivale a 170 pci. En la Figura D1 del Anexo D se presenta las líneas de trazo en el ábaco.

- ❖ **Módulo de reacción efectivo:** se utiliza este módulo debido a que la colocación de la base aumenta la capacidad de soporte de la estructura. La guía PCA también brinda la Tabla A20 del Anexo A para hallar el módulo de reacción efectivo (k_{efec}) en base al módulo de reacción de la subrasante y el espesor de la base.

Si los datos de entrada no coinciden con los números de la Tabla A20 del Anexo A, se realiza una interpolación. Para el caso de estudio, se considerará inicialmente una base

con espesor de 15 cm (6"). Entonces, luego de efectuar el proceso de iteración, se obtiene un módulo de reacción efectivo de 203 pci.

El cuadro resumen de los parámetros de entrada de diseño se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25: Resumen de parámetros de entrada para el diseño de pavimento rígido método AASHTO

Parámetro	Valor	Unidad
Número de ejes equivalentes (W18)	3.91×10^7	ESAL
Periodo de diseño	20	años
Confiabilidad (R)	90	%
Desviación estándar normal (Z_R)	-1.282	
Desviación estándar total (S_0)	0.34	
Índice de serviciabilidad inicial (p_0)	4.5	
Índice de serviciabilidad final (p_f)	3	
ΔPSI	1.5	
Resistencia a la compresión del concreto en 28 días (f'_c)	350	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del concreto (E_c)	3.99×10^6	psi
Módulo de rotura del concreto (S'_c)	688	psi
Coefficiente de transferencia de carga (J)	3.2	
Coefficiente de drenaje (Cd)	1	
CBR de la subrasante	7	%
Módulo de reacción de la subrasante (k)	170	pci
Módulo de reacción efectivo (k')	203	pci

Nota: Fuente propia

7.1.2 Diseño de espesores

Como ya se mencionó previamente, para obtener el espesor de la losa de concreto del pavimento es necesario resolver la ecuación 2 planteada por la AASHTO. Sin embargo, la misma guía propone hallar esta variable con ayuda de un nomograma y empleando los parámetros de entrada establecidos previamente. En las Figuras D2 y D3 del Anexo D se presenta las líneas de trazo en el nomograma.

Así pues, del nomograma se obtiene un espesor de losa de concreto de 12.4 pulgadas, que equivale a 31.5 cm. Este espesor fue hallado en base a un espesor de base de 15 cm, pero se puede aumentar esta dimensión, con lo que aumentaría el módulo de reacción efectivo y se esperaría que el espesor de la losa se reduzca. Por lo tanto, en la Tabla 26 se presentan las siguientes alternativas de espesores de capa del pavimento:

Tabla 26: Alternativas de espesor de capa de pavimento rígido en base a metodología AASHTO

Alternativa	Espesor de base (cm)	k_{efec} (pci)	Espesor de losa (cm)
1	15	203	32
2	20	226	32
3	25	252	32
4	30	281	31

Nota: Fuente propia

Como se observa, a pesar de que el espesor de la capa base aumenta significativamente, el espesor de la losa de concreto no sufre gran variación, por lo que se deduce que el parámetro módulo de reacción efectiva no influye significativamente en diseño de la losa de concreto.

7.2 Método de la Portland Cement Association

7.2.1 Parámetros de entrada del diseño

Para emplear los diagramas de diseño brindados por el Instituto del Asfalto, se necesitan como parámetros de entrada los siguientes factores:

- ❖ **Tipo de junta y berma:** para el presente caso de estudio se va a diseñar un pavimento articulado de concreto simple (JPCP), en el que las juntas serán dotadas con pasadores. Asimismo, se ha seleccionado al asfalto como tipo de material para la construcción de bermas. Esto se debe al menor costo generado con respecto a las bermas de concreto.
- ❖ **Módulo de rotura del concreto:** En base a las recomendaciones del MTC en la Tabla A17 del Anexo A, se selecciona un concreto con resistencia a la compresión de 350 kg/cm². Análogamente a lo ejecutado en el método AASHTO, se emplea la ecuación 10 para hallar el módulo de rotura ($S'c$). Por lo tanto, con un valor de α de 2.585, se obtiene un módulo de rotura igual a 48.4 kg/cm², lo que equivale a 4.8 Mpa.
- ❖ **Módulo de reacción de la subrasante:** la guía de la PCA brinda un gráfico para poder hallar el módulo de reacción de la subrasante (k) en base al CBR. Para el caso de estudio,

a un CBR de 7% le corresponde un módulo de reacción de 170 pci, que equivale a 4.7 kg/cm³, tal como se muestra en la Figura E1 del Anexo E.

- ❖ **Módulo de reacción efectivo:** cuando se añade una capa de material granular como base entre la losa de concreto y la subrasante, se logra mejorar la capacidad de soporte de la estructura, lo que conlleva a obtener un espesor de losa de menor dimensión. Por ello, se necesita calcular el módulo de reacción efectivo (k_{efec}) de la subrasante.

La guía de la PCA brinda la Tabla A20 del Anexo A para hallar el módulo de reacción efectivo (k_{efec}) en base al módulo de reacción de la subrasante y el espesor de la base. Para el caso de estudio, se considerará inicialmente una base con espesor de 15 cm (6"). Entonces, luego de efectuar el proceso de interpolación, se obtiene un módulo de reacción efectivo de 203 pci, que equivale a 55 Mpa/m

- ❖ **Factor de seguridad de carga:** este parámetro proporciona un grado de conservadorismo a la metodología, ya que brinda tolerancia a la posibilidad que se presenten camiones pesados con cargas mayores a la prevista en el diseño durante el tiempo de vida útil de la obra.

La guía de la PCA recomienda que para carreteras interestatales donde se tendrán altos volúmenes de tráfico de camiones, el valor del factor de seguridad de carga (LSF) deberá ser igual a 1.2. Asimismo, este valor será multiplicado por cada carga de cada eje para obtener la carga de diseño respectiva según cada eje.

7.2.2 Diseño de espesores

Lo primero que se debe efectuar es determinar la carga máxima reglamentaria según la distribución de ejes de cada tipo de vehículo que se prevé circulará por la carretera, tal como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Peso máximo reglamentario de los ejes por tipo de vehículo

Tipo de Vehículo	Cargas (ton)				Cargas (kips)			
	Eje Delantero	1 eje	2 eje	3 eje	Eje Delantero	1 eje	2 eje	3 eje
Automóviles	1	1			2.2	2.2		
C2	7	11			15.4	24.3		
C3	7	18			15.4	39.7		
C4	7	23			15.4	50.7		
8X4	7+7	18			31	39.7		
T2S1	7	11	11		15.4	24.3	24.3	
T2S2	7	11	18		15.4	24.3	39.7	
T2S3	7	11	25		15.4	24.3	55.1	
T2Se2	7	11	11	11	15.4	24.3	24.3	24.3
T3S1	7	18	11		15.4	39.7	24.3	
T3S2	7	18	18		15.4	39.7	39.7	
T3Se2	7	18	11	11	15.4	39.7	24.3	24.3
C2R3	7	11	11	18	15.4	24.3	24.3	39.7
T3S3	7	18	25		15.4	39.7	55.1	
8X4R3	7+7	18	11	18	31	39.7	24.3	39.7
8X4R4	7+7	18	18	18	31	39.7	39.7	39.7
B3-1	7	16			15.4	35.3		
B4-1	7+7	16			31	35.3		

Nota: Fuente propia

Luego, se debe efectuar el conteo de las repeticiones actuales según el tipo y peso de cada eje. Después, para hallar el número de repeticiones en el periodo de diseño, se emplea la ecuación planteada en el estudio de tráfico en el capítulo 5. Entonces, se puede estimar la cantidad de repeticiones por carga por eje durante el tiempo de vida útil del pavimento, tal como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28: Repeticiones actuales y esperadas en el periodo de diseño por tipo y peso de cada eje

Tipo de eje	Carga (ton)	Repeticiones actuales	Repeticiones en el periodo de diseño
Simple	1	13 868	80 482 938
	7	1 267	7 353 035
	11	796	4 619 586
Tandem	16	165	957 578
	18	595	3 453 083
Trídem	23	92	533 922
	25	70	406 245

Nota: Fuente propia

En esta etapa del diseño se procede a efectuar el análisis por fatiga y erosión. Para empezar el proceso iterativo se debe asumir un espesor inicial de losa de concreto y de base. Para la primera iteración se considerará una losa de concreto con 27 cm de espesor y una base con 15 cm de espesor.

En el análisis de fatiga se debe calcular los esfuerzos equivalentes en el pavimento y los factores de relación de esfuerzo para cada tipo de eje (simple, tándem y trídem). Para hallar los valores de los esfuerzos equivalentes para el eje simple y tándem se hace uso de la Tabla A21 del Anexo A proporcionado por el manual de la PCA.

Así pues, al realizar la interpolación en la tabla mencionada se obtiene un esfuerzo equivalente de 1.118 MPa para el eje simple y de 1.032 MPa para el eje tándem. En el caso del eje trídem, se emplea la Tabla A22 del Anexo A proporcionado por el manual de la PCA, con lo cual se obtiene un esfuerzo equivalente de 0.787 MPa.

Asimismo, para calcular el factor de relación de esfuerzo se tiene que dividir el esfuerzo equivalente entre el módulo de rotura del concreto. Entonces, se obtiene un factor de relación de esfuerzo para el eje simple de 0.233, para el eje tándem de 0.215 y para el eje trídem de 0.164.

Por otro lado, en el análisis de erosión se debe calcular el factor de erosión para cada tipo de eje (simple, tándem y trídem). Para hallar los valores de los factores de erosión para los ejes simple y tándem se hace uso de la Tabla A23 del Anexo A proporcionado por el manual de la PCA.

Así pues, al realizar la interpolación en la tabla mencionada se obtiene un factor de erosión de 2.433 para el eje simple y de 2.620 para el eje tándem. En el caso del eje trídem, se emplea la Tabla A24 del Anexo A proporcionado por el manual de la PCA, con lo cual se obtiene un factor de erosión de 2.775.

Luego, se debe calcular el número de repeticiones admisibles según el tipo y peso de cada eje tanto para el análisis de fatiga como para el análisis de erosión. Para el primero, se emplea la Figura E2 del Anexo E, en la cual se necesita como datos de entrada la carga de diseño por tipo de eje y el factor de relación de esfuerzo. Para el segundo, se emplea la Figura E3 del Anexo E, en la cual se necesita como datos de entrada la carga de diseño por tipo de eje y el factor de erosión. Cabe recalcar que estas gráficas solo permiten hallar el número de repeticiones admisibles para ejes simple y tándem.

Para calcular el número de repeticiones admisibles del eje trídém también se hace uso de las dos gráficas mencionadas anteriormente, pero la diferencia es que la carga de diseño por tipo de eje debe ser dividida entre tres y el resultado no necesita extrapolarse. Asimismo, al emplear las gráficas se tendrá en cuenta que el número de repeticiones admisibles será considerado ilimitado cuando la intersección de las líneas se produzca fuera de la parte superior de las gráficas.

En la Tabla 29 se presenta el análisis de fatiga y erosión para el diseño del pavimento con las variables definidas previamente. Se observa que el espesor de losa de concreto de 27 cm y espesor de base de 15 cm presenta un porcentaje de daño por erosión de aproximadamente 50%. Al ser la carretera una vía de gran importancia se busca que el porcentaje de daño por erosión sea menor a 35%. Por lo tanto, se tendrá que iterar con el espesor de losa y base hasta encontrar una estructura eficiente, tal como se muestra en las Tablas 30, 31, 32 y 33.

Tabla 29: Análisis de fatiga y erosión para losa de 27 cm y base de 15 cm de espesor

Espesor de losa (cm)		27	Junta con dowels		SI	
k _{efec} (MPa/m)		55	Bermas de concreto		NO	
Módulo de rotura (MPa)		4.8	Periodo de diseño (años)		20	
Factor de seguridad, LSF		1.2	Espesor de base (cm)		15	
Carga por eje (tn)	Carga x LSF (KN)	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones Admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de erosión
Eje Simple	Esfuerzo equivalente (MPa)		1.120	Factor de erosión		2.433
	Factor de esfuerzo		0.233			
1	11.76	80 482 938	ilimitado	-	ilimitado	-
7	82.32	7 353 035	ilimitado	-	ilimitado	-
11	129.36	4 619 586	ilimitado	-	21 609 231	21.38
Eje Tándem	Esfuerzo equivalente (MPa)		1.030	Factor de erosión		2.620
	Factor de esfuerzo		0.215			
16	188.16	957 578	ilimitado	-	57 976 175	1.65
18	211.68	3 453 083	ilimitado	-	19 406 884	17.79
Eje Trídem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.785	Factor de erosión		2.775
	Factor de esfuerzo		0.164			
23	270.48	533 922	ilimitado	-	18 866 878	2.83
25	294.00	406 245	ilimitado	-	9 938 047	4.09
TOTAL			-	TOTAL	TOTAL	47.74

Nota: Fuente propia

Tabla 30: Análisis de fatiga y erosión para losa de 28 cm y base de 15 cm de espesor

Espesor de losa (cm)		28	Junta con dowels		SI	
k _{efec} (MPa/m)		55	Bermas de concreto		NO	
Módulo de rotura (MPa)		4.8	Periodo de diseño (años)		20	
Factor de seguridad, LSF		1.2	Espesor de base (cm)		15	
Carga por eje (tn)	Carga x LSF (KN)	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones Admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de erosión
Eje Simple	Esfuerzo equivalente (MPa)		1.061	Factor de erosión		2.385
	Factor de esfuerzo		0.221			
1	11.76	80 482 938	ilimitado	-	ilimitado	-
7	82.32	7 353 035	ilimitado	-	ilimitado	-
11	129.36	4 619 586	ilimitado	-	34 748 498	13.29
Eje Tándem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.989	Factor de erosión		2.583
	Factor de esfuerzo		0.206			
16	188.16	957 578	ilimitado	-	96 521 192	0.99
18	211.68	3 453 083	ilimitado	-	28 267 479	12.22
Eje Trídem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.754	Factor de erosión		2.738
	Factor de esfuerzo		0.157			
23	270.48	533 922	ilimitado	-	25 780 940	2.07
25	294.00	406 245	ilimitado	-	13 091 189	3.10
TOTAL			-	TOTAL	TOTAL	31.68

Nota: Fuente propia

Tabla 31: Análisis de fatiga y erosión para losa de 28 cm y base de 30 cm de espesor

Espesor de losa (cm)		28	Junta con dowels		SI	
k _{efec} (MPa/m)		75	Bermas de concreto		NO	
Módulo de rotura (MPa)		4.8	Periodo de diseño (años)		20	
Factor de seguridad, LSF		1.2	Espesor de base (cm)		30	
Carga por eje (tn)	Carga x LSF (KN)	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones Admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de erosión
Eje Simple	Esfuerzo equivalente (MPa)		1.003	Factor de erosión		2.373
	Factor de esfuerzo		0.209			
1	11.76	80 482 938	ilimitado	-	ilimitado	-
7	82.32	7 353 035	ilimitado	-	ilimitado	-
11	129.36	4 619 586	ilimitado	-	39 169 467	11.79
Eje Tándem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.907	Factor de erosión		2.548
	Factor de esfuerzo		0.189			
16	188.16	957 578	ilimitado	-	165 834 337	0.58
18	211.68	3 453 083	ilimitado	-	40 769 393	8.47
Eje Trídem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.686	Factor de erosión		2.690
	Factor de esfuerzo		0.143			
23	270.48	533 922	ilimitado	-	44 686 606	1.19
25	294.00	406 245	ilimitado	-	20 950 921	1.94
TOTAL			-	TOTAL	TOTAL	23.97

Nota: Fuente propia

Tabla 32: Análisis de fatiga y erosión para losa de 29 cm y base de 15 cm de espesor

Espesor de losa (cm)		29	Junta con dowels		SI	
k _{efec} (MPa/m)		55	Bermas de concreto		NO	
Módulo de rotura (MPa)		4.8	Periodo de diseño (años)		20	
Factor de seguridad, LSF		1.2	Espesor de base (cm)		15	
Carga por eje (tn)	Carga x LSF (KN)	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones Admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de erosión
Eje Simple	Esfuerzo equivalente (MPa)		1.008	Factor de erosión		2.343
	Factor de esfuerzo		0.210			
1	11.76	80 482 938	ilimitado	-	ilimitado	-
7	82.32	7 353 035	ilimitado	-	ilimitado	-
11	129.36	4 619 586	ilimitado	-	58 322 511	7.92
Eje Tándem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.946	Factor de erosión		2.543
	Factor de esfuerzo		0.197			
16	188.16	957 578	ilimitado	-	173 120 511	0.55
18	211.68	3 453 083	ilimitado	-	41 906 283	8.24
Eje Trídem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.730	Factor de erosión		2.708
	Factor de esfuerzo		0.152			
23	270.48	533 922	ilimitado	-	35 503 983	1.50
25	294.00	406 245	ilimitado	-	17 254 796	2.35
TOTAL			-	TOTAL	TOTAL	20.57

Nota: Fuente propia

Tabla 33: Análisis de fatiga y erosión para losa de 29 cm y base de 30 cm de espesor

Espesor de losa (cm)		29	Junta con dowels		SI	
k _{efec} (MPa/m)		75	Bermas de concreto		NO	
Módulo de rotura (MPa)		4.8	Periodo de diseño (años)		20	
Factor de seguridad, LSF		1.2	Espesor de base (cm)		30	
Carga por eje (tn)	Carga x LSF (KN)	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones Admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones Admisibles	Porcentaje de erosión
Eje Simple	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.950	Factor de erosión		2.333
	Factor de esfuerzo		0.198			
1	11.76	80 482 938	ilimitado	-	ilimitado	-
7	82.32	7 353 035	ilimitado	-	ilimitado	-
11	129.36	4 619 586	ilimitado	-	67 078 083	6.89
Eje Tándem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.869	Factor de erosión		2.508
	Factor de esfuerzo		0.181			
16	188.16	957 578	ilimitado	-	352 515 323	0.27
18	211.68	3 453 083	ilimitado	-	63 665 139	5.42
Eje Trídem	Esfuerzo equivalente (MPa)		0.667	Factor de erosión		2.660
	Factor de esfuerzo		0.139			
23	270.48	533 922	ilimitado	-	65 560 688	0.81
25	294.00	406 245	ilimitado	-	28 684 748	1.42
TOTAL			-	TOTAL	TOTAL	14.81

Nota: Fuente propia

Posterior al análisis efectuado, la Tabla 34 presenta un resumen de las alternativas de estructura de pavimento con porcentaje de daño por erosión menor al 35%. Cabe recalcar que no se iteró hasta alcanzar porcentajes de daño igual a 0% ya que resultaría en un diseño muy conservador y costoso.

Tabla 34: Espesor de estructura de pavimento rígido método PCA

Alternativa	Espesor de losa (cm)	Espesor de base (cm)	Porcentaje de daño	
			Fatiga (%)	Erosión (%)
1	28	15	-	31.68
2	28	30	-	23.97
3	29	15	-	20.57
4	29	30	-	14.81

Nota: Fuente propia

De la Tabla 34 se desprende que la fatiga no es un condicionante para el diseño del pavimento, ya que las repeticiones admisibles son ilimitadas y por lo tanto el porcentaje de

fatiga es nulo. Esto valida la teoría que el análisis de fatiga no controla el diseño de vías de tráfico pesado, tal como se presenta en el caso de estudio (un volumen vehicular elevado).

Asimismo, se observa que al aumentar 1 centímetro el espesor de la losa de concreto y mantener un mismo espesor de base, el porcentaje de daño por erosión disminuye aproximadamente 11%. También, se desprende que al aumentar 15 cm el espesor de la base y mantener el mismo espesor de losa, el porcentaje de daño por erosión disminuye entre 5.7% y 7.7%, el cual depende del espesor de concreto, ya que a menor espesor de losa existe mayor influencia del cambio en el espesor de la base. Así pues, se puede concluir que el espesor de la base no influye drásticamente en el diseño por el método de la PCA, a diferencia del espesor de losa de concreto. Sin embargo, en el capítulo de análisis económico se estudiarán todas las alternativas planteadas, de tal forma que se pueda analizar como influye el cambio de espesor de base y losa de concreto en el costo de construcción del pavimento rígido.

7.3 Diseño de juntas

Las alternativas de pavimento rígido que se diseñaron en el presente capítulo serán dotadas de juntas con pasadores y barras de unión. Los pasadores serán colocados en las juntas transversales y las barras de unión en las juntas longitudinales. Para el dimensionamiento de estos elementos se seguirán las recomendaciones del Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC (2014).

Para el dimensionamiento de la losa, se recomienda que para carreteras que se encuentran a una altitud mayor a los 3000 msnm los paños sean cuadrados. Así pues, como el ancho de vía es 7.20 m, entonces las losas de concreto tendrán dimensiones de 3.60 x 3.60 m.

Para las juntas de contracción transversal, se establece dimensiones de los pasadores según el espesor de la losa. Así pues, para las alternativas obtenidas del método AASHTO se

tendrán pasadores con diámetro de $1\frac{1}{2}$ " , 51 cm de longitud y espaciamiento de 38 cm, tal como se muestra en la Figura 23. Para las alternativas obtenidas por el método PCA se tendrán pasadores de $1\frac{1}{4}$ " de diámetro, 46 cm de longitud y con espaciamiento de 30 cm, tal como se muestra en la Figura 24.

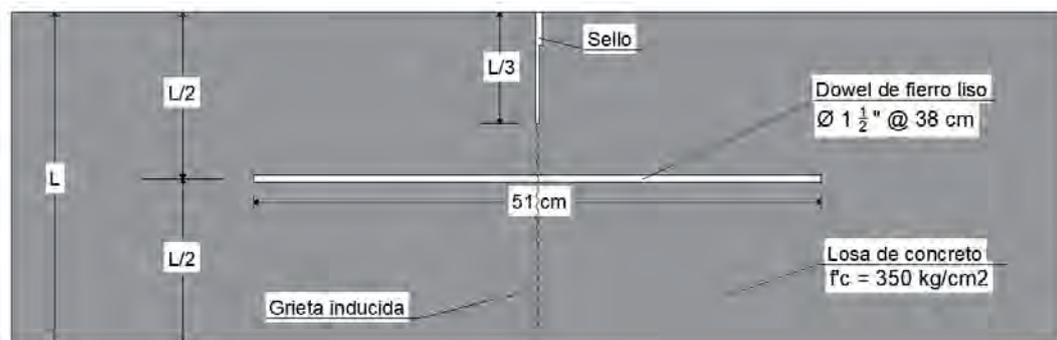


Figura 23: Diseño de junta de contracción transversal (Alternativas método AASHTO) (Fuente:propia)

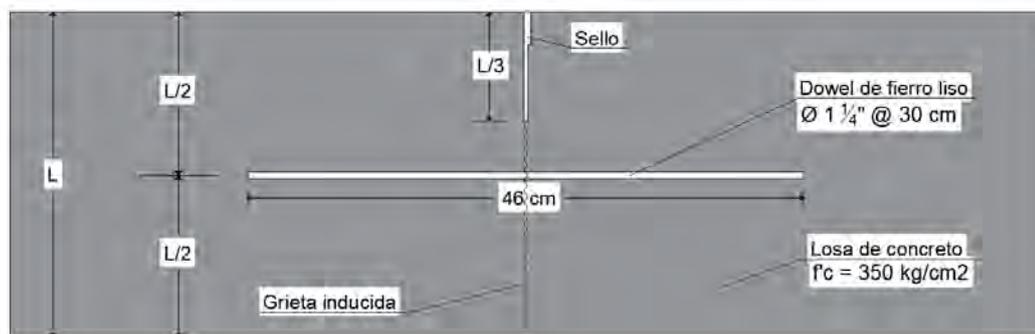


Figura 24: Diseño de junta de contracción transversal (Alternativas método PCA) (Fuente:propia)

Para las juntas longitudinales de contracción, también se establece dimensiones de las barras de unión en base al espesor de la losa. Así pues, para las alternativas obtenidas por el método AASHTO se tendrán barras de unión con diámetro de $5/8$ " , 91 cm de longitud y con espaciamiento de 91 cm, tal como se muestra en la Figura 25. Para las alternativas obtenidas por el método PCA se tendrán barras de unión de $5/8$ " de diámetro, 89 cm de longitud y con espaciamiento de 91 cm, tal como se muestra en la Figura 26.



Figura 25: Diseño de junta longitudinal de construcción (Alternativas método AASHTO) (Fuente:propia)

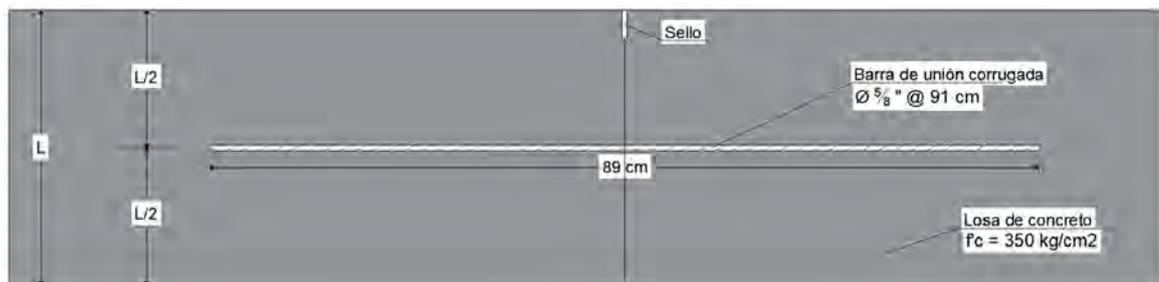


Figura 26: Diseño de junta longitudinal de construcción (Alternativas método PCA) (Fuente:propia)

Por otro lado, se debe diseñar la caja de sello para los selladores líquidos. Para elegir el tipo de sellador, se debe conocer el porcentaje de elongación y que este no supere el 50%. Para ello, el manual de Carreteras del MTC brinda la siguiente ecuación:

$$\% \text{ elongacion} = \frac{C * L * (\alpha * \Delta T + \epsilon)}{\text{ancho caja de sello}}$$

Ecuación 11

Donde “C” es el factor de ajuste por fricción de la losa con la base, “L” es la longitud de la losa, “α” es el coeficiente de expansión térmica, “ΔT” es el gradiente térmico y “ε” es el coeficiente de contracción del concreto. Así, se sabe que la longitud de la losa es de 3600 mm y se tiene un factor de ajuste por fricción de 0.8 para bases granulares. Además, el coeficiente de expansión térmica de la grava del concreto es $3.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ y el coeficiente de contracción del concreto de resistencia de 350 kg/cm^2 es 0.00045. También, el gradiente entre la temperatura máxima mensual de la zona ($22 \text{ } ^\circ\text{C}$) y la mínima mensual ($4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$) es $17.3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Asimismo, se tendrá un ancho de caja de sello de 6 mm.

Al emplear la ecuación 11, resulta que se necesita un sello con un 24% de elongación. Como este valor es menor al 50% planteado por la norma, cumple con el requisito. En la Figura 27 se muestra el diseño de sello de junta para el presente caso de estudio.

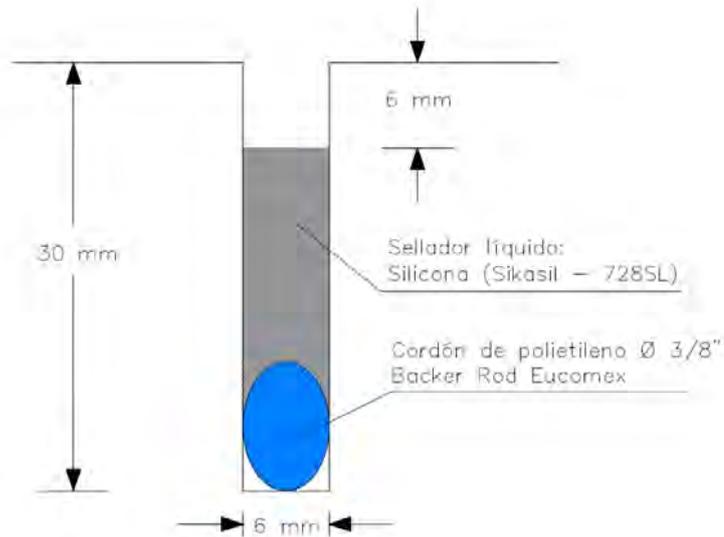


Figura 27: Diseño de sello de junta (Fuente: propia)

Capítulo 8: Análisis Económico

Luego de haber efectuado el diseño, tanto de pavimento flexible como rígido, bajo las metodologías de la AASHTO, PCA e Instituto del Asfalto, se obtuvieron distintas alternativas de dimensionamiento de las capas según cada método. Por ello, en el presente capítulo se realizará una evaluación económica de las diversas opciones durante la etapa de construcción.

8.1 Consideraciones generales

Para el metrado del kilómetro de diseño, se tendrá en cuenta que la carretera Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N está dotada con un ancho de vía de 9.60 metros, donde se cuenta con 2 carriles de 3.60 m de ancho y bermas a ambos lados de la vía con 1.20 m de ancho. Entonces, para una longitud de diseño de 1 000 metros, se tendrá un área de calzada de 7200 m² y un área de berma de 2400 m². Asimismo, se compactará 30 cm de subrasante para todas las alternativas. Cabe recalcar que, el diseño de la berma se efectuará al finalizar este capítulo, cuando se tenga seleccionada la opción más económica.

Por otro lado, como se explicó en el capítulo 4, la cantera de procedencia de los suelos de base y subbase, así como los agregados para la elaboración de la mezcla asfáltica y el concreto hidráulico, se encuentra a 10 km de distancia del tramo de la carretera. Por otro lado, para la distancia a la planta de asfalto, planta mezcladora de concreto, chancadora y depósito de material excedente, se considerará hipotéticamente que se encuentran también a 10 km del tramo seleccionado de la carretera.

Asimismo, es necesario precisar que el costo de mano de obra tomado en cuenta es el vigente en la tabla salarial de construcción civil 2022-2023 que rige a nivel nacional. Asimismo, los costos de materiales y equipos han sido extraídos de la “Revista Costos – Grupo S10” vigente al mes noviembre del 2022. También, los rendimientos de mano de obra y equipos, así como las cantidades de los recursos, han sido extraídos de publicaciones

especializadas como el libro “Costos y Presupuestos en Carreteras” (Cruz, 2009) y otros precios unitarios de diversos proyectos de carreteras elaborados por PROVIAS.

8.2 Análisis económico del pavimento flexible

A continuación, se presenta en las siguientes tablas las subpartidas necesarias para armar las partidas finales del pavimento flexible:

Tabla 35: Subpartida de conformación de subbase granular

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		13.38
	400	400			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					2.53
Capataz	HH	1	0.0200	31.43	0.63
Oficial	HH	1	0.0200	20.60	0.41
Peón	HH	4	0.0800	18.63	1.49
Equipos					10.85
Herramientas manuales	%MO		0.0300	2.53	0.08
Rodillo liso vibrador autopropulsado 101-135 HP 10-12 ton	HM	1	0.0200	167.31	3.35
Motoniveladora de 145-150 HP	HM	1	0.0200	203.23	4.06
Camión cisterna 4x2 (Agua) 145-165 HP 2000 gl	HM	1	0.0200	168.08	3.36

Nota: Fuente propia

Tabla 36: Subpartida de material de subbase

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		23.40
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Subpartidas					23.403
Zarandeo mecánico	m ³		1.00	6.81	6.81
Transporte interno (planta)	m ³		1.00	7.65	7.65
Extracción de material (cantera)	m ³		1.10	8.13	8.94

Nota: Fuente propia

Tabla 37: Subpartida de material de base

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		39.09
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Subpartidas					39.09
Zarandeo mecánico	m ³		1.00	6.81	6.81
Transporte interno (planta)	m ³		1.00	7.65	7.65
Extracción de material (cantera)	m ³		1.10	8.13	8.94
Chancado de agregados	m ³		1.00	15.69	15.69

Nota: Fuente propia

Tabla 38: Subpartida de conformación de base granular

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S./.)		15.29
	350	350			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Mano de obra					2.89
Capataz	HH	1	0.0229	31.43	0.72
Oficial	HH	1	0.0229	20.60	0.47
Peón	HH	4	0.0914	18.63	1.70
Equipos					12.40
Herramientas manuales	%MO		0.03	2.89	0.09
Rodillo liso vibrador autopropulsado 101-135 HP 10-12 ton	HM	1	0.0229	167.31	3.82
Motoniveladora de 145-150 HP	HM	1	0.0229	203.23	4.65
Camión cisterna 4x2 (Agua) 145-165 HP 2000 gl	HM	1	0.0229	168.08	3.84

Nota: Fuente propia

Tabla 39: Subpartida de agregado fino zarandeado para imprimación

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S./.)		22.50
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Subpartidas					22.503
Extracción y apilamiento material para agregado fino	m ³		1.10	6.13	6.74
Transporte interno (planta)	m ³		1.00	7.65	7.65
Zarandeo mecánico (agregado fino / filtro)	m ³		1.00	8.11	8.11

Nota: Fuente propia

Con las subpartidas planteadas, se obtienen las siguientes tablas de las partidas del pavimento flexible:

Tabla 40: Partida de perfilado y compactado de subrasante

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S./.)		1.74
	3080	3080			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Mano de obra					0.33
Capataz	HH	1	0.0026	31.43	0.08
Oficial	HH	1	0.0026	20.60	0.05
Peón	HH	4	0.0104	18.63	0.19
Equipos					1.41
Herramientas manuales	%MO		0.03	0.33	0.01
Rodillo pata de cabra vibrador autopropulsado 100-135 HP 11-13 ton	HM	1	0.0026	166.49	0.43
Motoniveladora de 145-150 HP	HM	1	0.0026	203.23	0.53
Camión cisterna 4x2 (Agua) 145-165 HP 2000 gl	HM	1	0.0026	168.08	0.44

Nota: Fuente propia

Tabla 41: Partida de subbase granular

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S./.)		41.46
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Subpartidas					41.46
Conformación de subbase granular	m ³		1.00	13.38	13.38
Material de subbase	m ³		1.20	23.40	28.08

Nota: Fuente propia

Tabla 42: Partida de base granular

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S./.)		62.20
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Subpartidas					62.20
Conformación de base granular	m ³		1.00	15.29	15.29
Material de base	m ³		1.20	39.09	46.91

Nota: Fuente propia

Tabla 43: Partida de imprimación asfáltica

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S./.)		5.40
	4500	4500			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Mano de obra					0.29
Capataz	HH	1	0.0018	31.43	0.06
Oficial	HH	1	0.0018	20.60	0.04
Peón	HH	6	0.0107	18.63	0.20
Materiales					4.32
Asfalto líquido MC-30	gl		0.264	16.37	4.32
Equipos					0.66
Herramientas manuales	%MO		0.03	0.29	0.01
Camión imprimador 210 HP 2000 gl	HM	1	0.0018	197.97	0.35
Compresora neumática 87 HP 250-330 PCM	HM	1	0.0018	103.64	0.18
Barredora mecánica	HM	1	0.0018	61.95	0.11
Subpartidas					0.13
Agregado fino zarandeado para imprimación	m ³		0.0057	22.50	0.13

Nota: Fuente propia

Tabla 44: Partida de transporte de material granular para d>1km

Rendimiento: m ³ k/día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ k (S./.)		1.69
	1450	1450			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Equipos					1.69
Volquete 6x4 330 HP 15 m ³	HM	1	0.0055	306.25	1.69

Nota: Fuente propia

Tabla 45: Partida de riego de liga

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S./.)		1.39
	3500	3500			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Mano de obra					0.22
Capataz	HH	1	0.0018	31.43	0.06
Oficial	HH	1	0.0018	20.60	0.04
Peón	HH	4	0.0071	18.63	0.13
Materiales					0.44
Cemento asfáltico	lt		0.255	1.73	0.44
Equipos					0.72
Herramientas manuales	%MO		0.03	0.22	0.01
Camión imprimador 210 HP 2000 gl	HM	1	0.0018	197.97	0.35
Compresora neumática 87 HP 250 PCM	HM	1	0.0018	103.64	0.18
Minicargador 70 HP 0.5 yd ³	HM	1	0.0018	100.98	0.18

Nota: Fuente propia

Tabla 46: Partida de carpeta asfáltica

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S./.)		537.47
	250	250			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Mano de obra					6.08
Capataz	HH	1	0.0320	31.43	1.01
Operario	HH	1	0.0320	26.19	0.84
Oficial	HH	1	0.0320	20.60	0.66
Peón	HH	6	0.1920	18.63	3.58
Materiales					531.39
Mezcla asfáltica en caliente	m3		1.3000	393.65	511.75
Equipos					15.42
Herramientas manuales	%MO		0.0300	6.08	0.18
Rodillo neumático autopropulsado 135 HP 9.26 ton	HM	1	0.0320	126.26	4.04
Rodillo tándem vibratorio autopropulsado 111-130 HP 9-11 ton	HM	1	0.0320	206.80	6.62
Pavimentadora sobre orugas 105 HP	HM	1	0.0320	143.10	4.58

Nota: Fuente propia

Tabla 47: Partida de transporte de material granular para d<1km

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S./.)		8.30
	420	420			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S./.)	Parcial (S./.)
Mano de obra					0.20
Oficial	HH	0.5	0.0095	20.60	0.20
Equipos					8.11
Volquete 6x4 330 HP 15 m ³	HM	1	0.0190	306.25	5.83
Cargador sobre llantas 200-250 HP 4-4.1 yd ³	HM	0.5	0.0095	238.54	2.27

Nota: Fuente propia

Tabla 48: Partida de transporte de mezcla asfáltica para d<1km

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		9.96
	350	350			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.24
Oficial	HH	0.5	0.0114	20.60	0.24
Equipos					9.73
Volquete 6x4 330 HP 15 m ³	HM	1	0.0229	306.25	7.00
Cargador sobre llantas 200-250 HP 4-4.1 yd ³	HM	0.5	0.0114	238.54	2.73

Nota: Fuente propia

Tabla 49: Partida de transporte de mezcla asfáltica para d>1km

Rendimiento: m ³ k/día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ k (S/.)		1.83
	1340	1340			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Equipos					1.83
Volquete 6x4 330 HP 15 m ³	HM	1	0.0060	306.25	1.83

Nota: Fuente propia

Asimismo, en la Tabla 50 y 51 se muestra un resumen con las partidas económicas en la etapa de construcción del pavimento flexible por el método AASHTO e IA, respectivamente.

Tabla 50: Costo de construcción de las alternativas de pavimento flexible método AASHTO

Partida	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Costo (S/.)			
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Conformación de subrasante	m ²	1.74	12 495	12 495	12 495	12 495
Subbase granular	m ³	41.46	313 460	283 606	268 680	238 826
Base granular	m ³	62.20	89 571	111 964	134 357	156 750
Imprimación asfáltica	m ²	5.40	38 853	38 853	38 853	38 853
Riego de liga	m ²	1.39	9 998	9 998	9 998	9 998
Carpeta asfáltica	m ³	537.47	386 976	386 976	386 976	386 976
Transporte de material granular para d<1km	m ³ k	8.30	74 712	71 724	71 724	68 735
Transporte de material granular para d>1km	m ³ k	1.69	136 862	131 388	131 388	125 913
Transporte de mezcla asfáltica para d<1km	m ³ k	9.96	7 172	7 172	7 172	7 172
Transporte de mezcla asfáltica para d>1km	m ³ k	1.83	11 848	11 848	11 848	11 848
Costo Total Construcción (S/.)			1 081 948	1 066 024	1 073 490	1 057 567

Nota: Fuente propia

Tabla 51: Costo de construcción de las alternativas de pavimento flexible método Instituto del Asfalto

Partida	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Costo (S/.)			
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Conformación de subrasante	m ²	1.74	12 495	12 495	12 495	12 495
Subbase granular	m ³	41.46	373 166	358 240	328 386	298 533
Base granular	m ³	62.20	89 571	111 964	134 357	156 750
Imprimación asfáltica	m ²	5.40	38 853	38 853	38 853	38 853
Riego de liga	m ²	1.39	9 998	9 998	9 998	9 998
Carpeta asfáltica	m ³	537.47	386 976	386 976	386 976	386 976
Transporte de material granular para d<1km	m ³ k	8.30	86 666	86 666	83 677	80 689
Transporte de material granular para d>1km	m ³ k	1.69	158 760	158 760	153 286	147 811
Transporte de mezcla asfáltica para d<1km	m ³ k	9.96	7 172	7 172	7 172	7 172
Transporte de mezcla asfáltica para d>1km	m ³ k	1.83	11 848	11 848	11 848	11 848
Costo Total Construcción (S/.)			1 175 506	1 182 972	1 167 049	1 151 125

Nota: Fuente propia

De la Tabla 50 se elabora la gráfica comparativa entre las distintas alternativas obtenidas por medio del método AASHTO, tal como se muestra en la Figura 28:

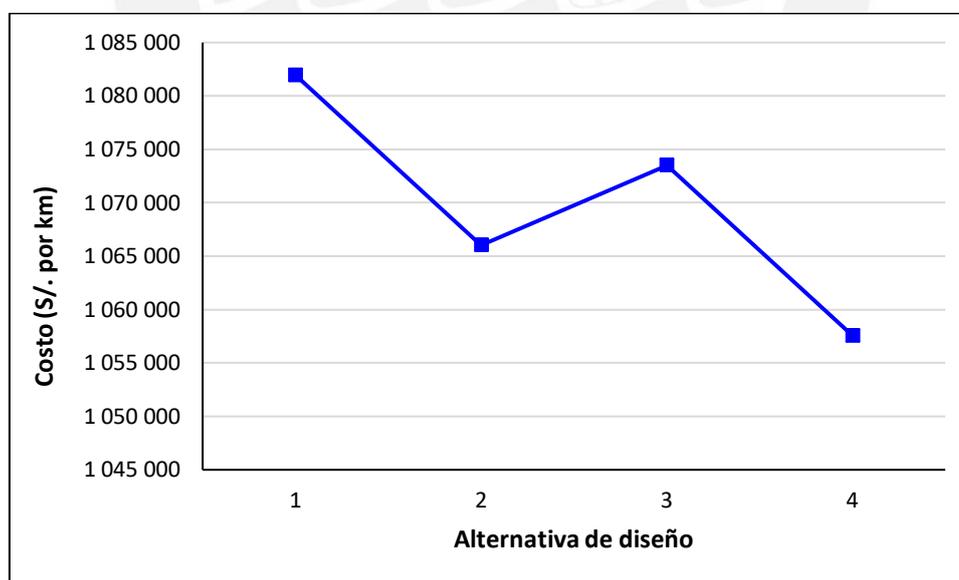


Figura 28: Costo de construcción de alternativas de pavimento flexible método AASHTO (Fuente: propia)

En la Figura 28 se observa que la alternativa más económica de pavimento flexible método AASHTO es la opción 4, la cual tiene un costo de S/.1 057 567. Esta estructura está

conformada por una carpeta asfáltica de 4 pulgadas de espesor, base de 35 cm y subbase de 80 cm de espesor, tal como se muestra en la Figura 29.

Carpeta asfáltica	Espesor = 4". Pavimento de concreto asfáltico en caliente
Base Granular	Espesor = 35 cm. CBR = 106%. Compactación al 100% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado Método C
Subbase Granular	Espesor = 80 cm. CBR = 23%. Compactación al 100% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado Método C
Subrasante	Espesor = 30 cm. CBR = 7%. Compactación al 95% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado.

Figura 29: Sección transversal del pavimento flexible método AASHTO (Fuente: propia)

Por otro lado, de la Figura 28 se observa que, existe una disminución de costo de construcción de las alternativas 2, 3 y 4 con respecto a la alternativa 1, lo cual corresponde a mantener el mismo espesor de carpeta asfáltica y variar los espesores de las capas base y subbase. Asimismo, de la Figura 28 se desprende que existe una disminución de aproximadamente 1.5% de costo de construcción entre las alternativas 1 y 2, así como las alternativas 3 y 4; lo cual corresponde a aumentar el espesor de base 5 cm y disminuir el espesor de subbase 10 cm. Por lo planteado anteriormente, se puede concluir que resulta factible mantener el espesor de carpeta asfáltica mínimo, aumentar el espesor de capa base y disminuir el espesor de capa subbase para lograr una estructura de pavimento económica.

De la Tabla 51 se elabora la gráfica comparativa entre las distintas alternativas obtenidas por medio del método del Instituto del Asfalto (IA), tal como se muestra en la Figura 30.

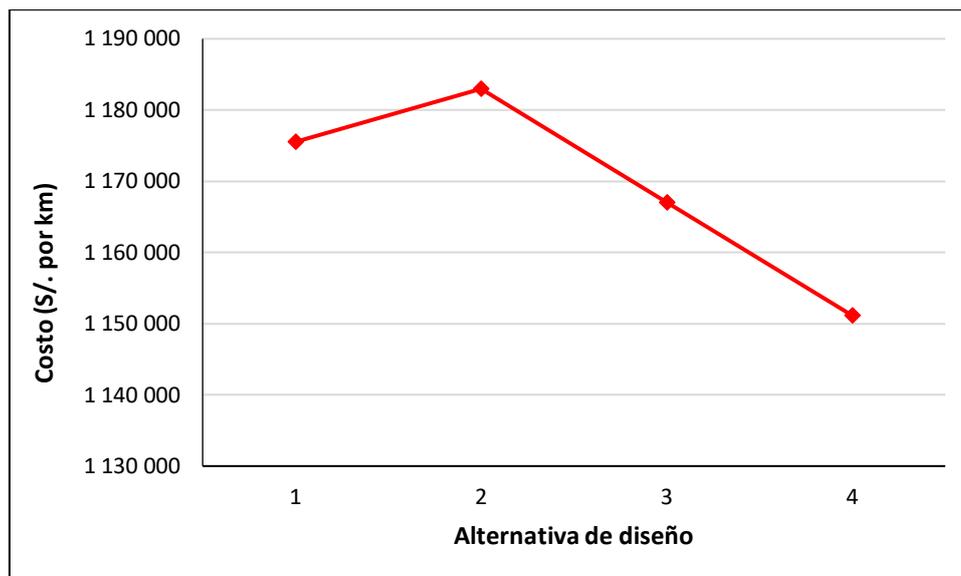


Figura 30: Costo de construcción de alternativas de pavimento flexible método IA (Fuente: propia)

En la Figura 30 se observa que la alternativa más económica de pavimento flexible método Instituto del Asfalto es la opción 4, la cual tiene un costo de S/.1 151 125. Esta estructura está comprendida por una carpeta asfáltica de 4 pulgadas de espesor, base de 35 cm y subbase de 100 cm de espesor, tal como se muestra en la Figura 31.

Carpeta asfáltica	Espesor = 4". Pavimento de concreto asfáltico en caliente
Base Granular	Espesor = 35 cm. CBR = 106%. Compactación al 100% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado Método C
Subbase Granular	Espesor = 100 cm. CBR = 23%. Compactación al 100% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado Método C
Subrasante	Espesor = 30 cm. CBR = 7%. Compactación al 95% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado.

Figura 31: Sección transversal del pavimento flexible método Instituto del Asfalto (Fuente: propia)

Por otro lado, al igual que en el método AASHTO, de la Figura 30 se desprende que existe una tendencia de disminución de costo de construcción al mantener el mismo espesor de carpeta asfáltica y variar los espesores de las capas base y subbase, con diferencia de 2% de costo de construcción entre la alternativa 1 y 4. Por ello, para obtener una estructura económica resulta conveniente aumentar el espesor de la capa base y disminuir el espesor de la subbase.

De acuerdo con lo expuesto en el presente subcapítulo, en la Figura 32 se muestra el comparativo de costos de construcción de todas las alternativas de diseño de pavimento flexible bajo las metodologías AASHTO e Instituto del Asfalto.

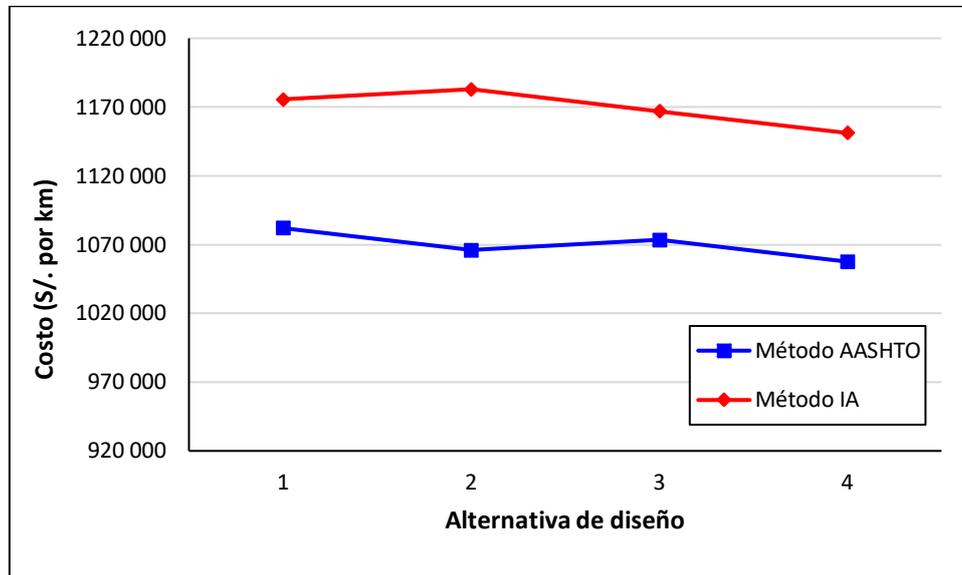


Figura 32: Comparativo de costo de construcción de pavimento flexible métodos AASHTO e IA (Fuente: propia)

De la Figura 32 se observa que, para todas las alternativas, la metodología AASHTO brinda un diseño de pavimento flexible mucho más económico que la metodología IA. La diferencia de costo constructivo entre una misma alternativa de ambos métodos es de aproximadamente S/. 95 000. El método IA proporciona un resultado conservador debido a que se obtiene un número estructural requerido mayor que el método AASHTO para los mismos valores de parámetros de entrada. Por lo tanto, se concluye que la opción más económica para el diseño del pavimento flexible es la alternativa 4 de la metodología AASHTO, la cual tiene un costo de construcción de S/.1 057 567. Posteriormente, con este diseño se analizará el costo de mantenimiento del pavimento flexible con el programa HDM-4 para tener un panorama general del costo total que involucra este tipo de pavimento,

8.3 Análisis económico del pavimento rígido

A continuación, se presenta en las siguientes tablas las partidas del pavimento rígido:

Tabla 52: Partida de perfilado y compactado de subrasante

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S/.)		1.74
	3080	3080			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.33
Capataz	HH	1	0.0026	31.43	0.08
Oficial	HH	1	0.0026	20.60	0.05
Peón	HH	4	0.0104	18.63	0.19
Equipos					1.41
Herramientas manuales	%MO		0.03	0.33	0.01
Rodillo pata de cabra vibrador autopropulsado 100-135 HP 11-13 ton	HM	1	0.0026	166.49	0.43
Motoniveladora de 145-150 HP	HM	1	0.0026	203.23	0.53
Camión cisterna 4x2 (Agua) 145-165 HP 2000 gl	HM	1	0.0026	168.08	0.44

Nota: Fuente propia

Tabla 53: Partida de base granular

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		62.20
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Subpartidas					62.20
Conformación de base granular	m ³		1.00	15.29	15.29
Material de base	m ³		1.20	39.09	46.91

Nota: Fuente propia

Tabla 54: Partida de concreto f'c = 350 kg/cm²

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		461.01
	20	20			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					107.15
Capataz	HH	0.5	0.2000	31.43	6.29
Operario	HH	3	1.2000	26.19	31.43
Oficial	HH	3	1.2000	20.6	24.72
Peón	HH	6	2.4000	18.63	44.71
Materiales					338.53
Piedra chancada	m ³		0.7500	38.52	28.89
Arena chancada	m ³		0.5000	63.47	31.74
Cemento Portland Tipo I f'C=350 kg/cm ²	bol		11.0000	24.82	273.02
Aditivo curador	gal		0.1500	32.57	4.89
Equipos					15.33
Herramientas manuales	%MO		0.0300	107.15	3.21
Mezcladora de concreto 18HP 11-12 p3	HM	1	0.4000	5.59	2.24
Vibrador de concreto 4HP	HM	1	0.4000	7.9	3.16
Camión cisterna 4x2 (Agua) 145-165 HP 2000 gl	HM	0.1	0.0400	168.08	6.72

Nota: Fuente propia

Tabla 55: Partida de barras de unión $\phi = 5/8''$

Rendimiento: kg/día	MO	EQ	Costo Unitario x kg (S/.)		3.82
	300	300			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.56
Capataz	HH	0.01	0.0003	31.43	0.01
Oficial	HH	1	0.0267	20.6	0.55
Materiales					3.19
Barra corrugado $\phi=5/8''$	kg		1.0000	3.19	3.19
Equipos					0.07
Herramientas manuales	%MO		0.0300	0.56	0.02
Cizalla	HM	1	0.0267	2.05	0.05

Nota: Fuente propia

Tabla 56: Partida de dowels $\phi = 1 1/4''$

Rendimiento: kg/día	MO	EQ	Costo Unitario x kg (S/.)		4.45
	300	300			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.56
Capataz	HH	0.01	0.0003	31.43	0.01
Oficial	HH	1	0.0267	20.6	0.55
Materiales					3.82
Fierro liso $\phi=1-1/4''$	kg		1.0000	3.82	3.82
Equipos					0.07
Herramientas manuales	%MO		0.0300	0.56	0.02
Cizalla	HM	1	0.0267	2.05	0.05

Nota: Fuente propia

Tabla 57: Partida de dowels $\phi = 1 1/2''$

Rendimiento: kg/día	MO	EQ	Costo Unitario x kg (S/.)		4.66
	300	300			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.56
Capataz	HH	0.01	0.0003	31.43	0.01
Oficial	HH	1	0.0267	20.6	0.55
Materiales					4.03
Fierro liso $\phi=1-1/4''$	kg		1.0000	4.03	4.03
Equipos					0.07
Herramientas manuales	%MO		0.0300	0.56	0.02
Cizalla	HM	1	0.0267	2.05	0.05

Nota: Fuente propia

Tabla 58: Partida de corte de juntas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo Unitario x m (S/.)		4.17
	200	200			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					2.42
Capataz	HH	0.5	0.0200	31.43	0.63
Operario	HH	1	0.0400	26.19	1.05
Peón	HH	1	0.0400	18.63	0.75
Equipos					1.75
Herramientas manuales	%MO		0.0300	2.42	0.07
Cortadora de pavimento con disco	HM	1	0.0400	8.25	0.33
Camión cisterna 4x2 (Agua) 1500 gl	HM	0.2	0.0080	168.08	1.34

Nota: Fuente propia

Tabla 59: Partida de sellado de juntas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo Unitario x m (S/.)		9.91
	750	750			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					2.15
Capataz	HH	0.1	0.0011	31.43	0.03
Operario	HH	6	0.0640	26.19	1.68
Oficial	HH	2	0.0213	20.6	0.44
Materiales					5.40
Cordón de respaldo de poliuretano	m		1.0000	0.75	0.75
Sello líquido de silicona	und		0.2000	22.50	4.50
Imprimante para sellante de juntas	m		0.0104	14.20	0.15
Equipos					2.36
Herramientas manuales	%MO		0.0300	2.15	0.06
Camión cisterna 4x2 (Agua) 1500 gl	HM	1	0.0107	142.74	1.52
Equipo aplicación sello	HM	1	0.0107	9.75	0.10
Compresora sopladora	HM	1	0.0107	63.10	0.67

Nota: Fuente propia

Tabla 60: Partida de transporte de material granular para d<1km

Rendimiento: m ³ /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ³ (S/.)		8.30
	420	420			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.20
Oficial	HH	0.5	0.0095	20.60	0.20
Equipos					8.11
Volquete 6x4 330 HP 15 m ³	HM	1	0.0190	306.25	5.83
Cargador sobre llantas 200-250 HP 4-4.1 yd ³	HM	0.5	0.0095	238.54	2.27

Nota: Fuente propia

Tabla 61: Partida de transporte de material granular para $d > 1\text{km}$

Rendimiento: $\text{m}^3/\text{día}$	MO	EQ	Costo Unitario x m^3/k (S/.)		1.69
	1450	1450			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Equipos					1.69
Volquete 6x4 330 HP 15 m^3	HM	1	0.0055	306.25	1.69

Nota: Fuente propia

Tabla 62: Partida de transporte de mezcla de concreto para $d < 1\text{km}$

Rendimiento: $\text{m}^3/\text{día}$	MO	EQ	Costo Unitario x m^3 (S/.)		9.96
	350	350			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.24
Oficial	HH	0.5	0.0114	20.60	0.24
Equipos					9.73
Volquete 6x4 330 HP 15 m^3	HM	1	0.0229	306.25	7.00
Cargador sobre llantas 200-250 HP 4-4.1 yd^3	HM	0.5	0.0114	238.54	2.73

Nota: Fuente propia

Tabla 63: Partida de transporte de mezcla de concreto para $d > 1\text{km}$

Rendimiento: $\text{m}^3/\text{día}$	MO	EQ	Costo Unitario x m^3/k (S/.)		1.83
	1340	1340			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Equipos					1.83
Volquete 6x4 330 HP 15 m^3	HM	1	0.0060	306.25	1.83

Nota: Fuente propia

Asimismo, en la Tabla 64 y Tabla 65 se muestra un resumen con las partidas económicas en la etapa de construcción del pavimento rígido por el método AASHTO y PCA, respectivamente.

Tabla 64: Costo de construcción de las alternativas de pavimento rígido método AASHTO

Partida	Unidad	Precio Unitario (S./.)	Costo (S./.)			
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Conformación de subrasante	m ²	1.74	12 495	12 495	12 495	12 495
Base granular	m ³	62.20	67 178	89 571	111 964	134 357
Concreto premezclado f'c = 350kg/cm ²	m ³	461.01	1 062 167	1 062 167	1 062 167	1 028 974
Barras de unión $\phi=5/8"$	kg	3.82	11 873	11 873	11 873	11 873
Dowels $\phi=1-1/2"$	kg	4.66	55 889	55 889	55 889	55 889
Corte de juntas	m	4.17	12 476	12 476	12 476	12 476
Sellado de juntas	m	9.91	29 661	29 661	29 661	29 661
Transporte de material granular para d<1km	m ³ k	8.30	8 965	11 954	14 942	17 931
Transporte de material granular para d>1km	m ³ k	1.69	16 423	21 898	27 372	32 847
Transporte de mezcla concreto para d<1km	m ³ k	9.96	22 952	22 952	22 952	22 234
Transporte de mezcla concreto para d>1km	m ³ k	1.83	37 913	37 913	37 913	36 728
Costo Total Construcción (S./.)			1 337 994	1 368 850	1 399 705	1 395 466

Nota: Fuente propia

Tabla 65: Costo de construcción de las alternativas de pavimento rígido método PCA

Partida	Unidad	Precio Unitario (S./.)	Costo (S./.)			
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Conformación de subrasante	m ²	1.74	12 495	12 495	12 495	12 495
Base granular	m ³	62.20	67 178	134 357	67 178	134 357
Concreto premezclado f'c = 350kg/cm ²	m ³	461.01	929 396	929 396	962 589	962 589
Barras de unión $\phi=5/8"$	kg	3.82	12 140	12 140	12 140	12 140
Dowels $\phi=1-1/4"$	kg	4.66	42 467	42 467	42 467	42 467
Corte de juntas	m	4.17	12 476	12 476	12 476	12 476
Sellado de juntas	m	9.91	29 661	29 661	29 661	29 661
Transporte de material granular para d<1km	m ³ k	8.30	8 965	17 931	8 965	17 931
Transporte de material granular para d>1km	m ³ k	1.69	16 423	32 847	16 423	32 847
Transporte de mezcla concreto para d<1km	m ³ k	9.96	20 083	20 083	20 800	20 800
Transporte de mezcla concreto para d>1km	m ³ k	1.83	33 174	33 174	34 359	34 359
Costo Total Construcción (S./.)			1 184 459	1 277 026	1 219 554	1 312 121

Nota: Fuente propia

De la Tabla 64 se elabora la gráfica comparativa entre las distintas alternativas obtenidas por medio del método AASHTO, tal como se muestra en la Figura 33:

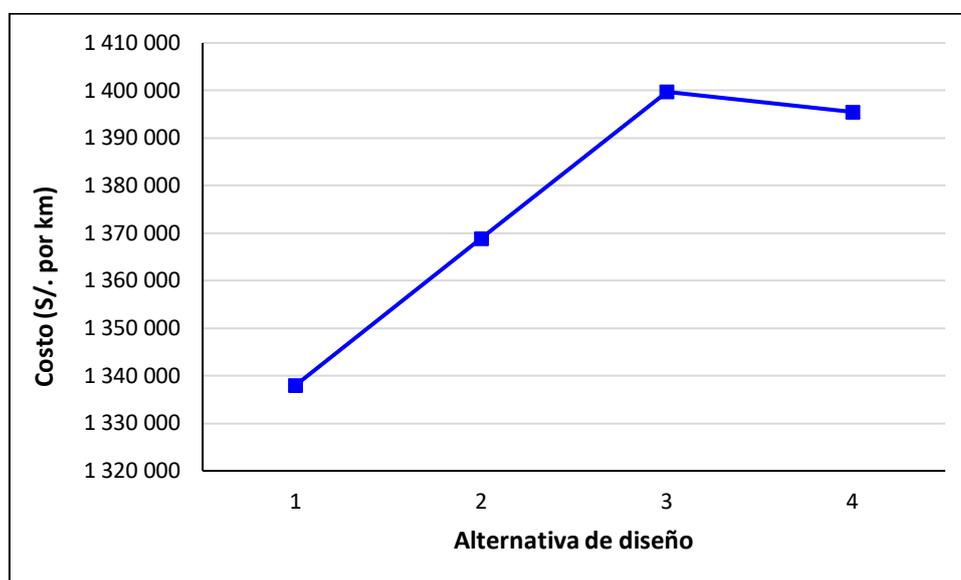


Figura 33: Costo de construcción de alternativas de pavimento rígido método AASHTO (Fuente: propia)

En la Figura 33 se observa que la alternativa más económica de pavimento rígido método AASHTO es la opción 1, la cual tiene un costo de S/.1 337 994. Esta estructura está conformada por una losa de concreto de 32 cm de espesor y base de 15 cm, tal como muestra la Figura 34.

Losa de concreto	Espesor = 32cm. Pavimento de concreto de cemento Portland $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$. $f'c_{\text{mínimo}} = 280 \text{ kg/cm}^2$ para dar inicio al tránsito (80% $f'c$)
Base Granular	Espesor = 15 cm. CBR = 106%. Compactación al 100% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado Método C
Subrasante	Espesor = 30 cm. CBR = 7%. Compactación al 95% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado.

Figura 34: Sección transversal del pavimento rígido método AASHTO (Fuente: propia)

Por otro lado, de la Figura 33 se observa que, existe un aumento de costo de construcción de las alternativas 2 y 3 con respecto a la alternativa 1, lo cual corresponde a mantener el mismo espesor de losa de concreto y aumentar el espesor de la capa base. Asimismo, de la Figura 33 se desprende que, el costo de construcción de la alternativa 4 (losa de concreto de 31 cm y base de 30 cm) es aproximadamente 5% superior al costo de construcción de la alternativa 1 (losa

de concreto de 32 cm y base de 15 cm). De ello se infiere que no resulta económicamente factible reducir 1cm de espesor de losa de concreto, porque se tendría que aumentar 15 cm de espesor de capa base para mantener un correcto diseño (número estructural requerido).

De la Tabla 65 se elabora la gráfica comparativa entre las distintas alternativas obtenidas por medio del método PCA, tal como se muestra en la Figura 35.

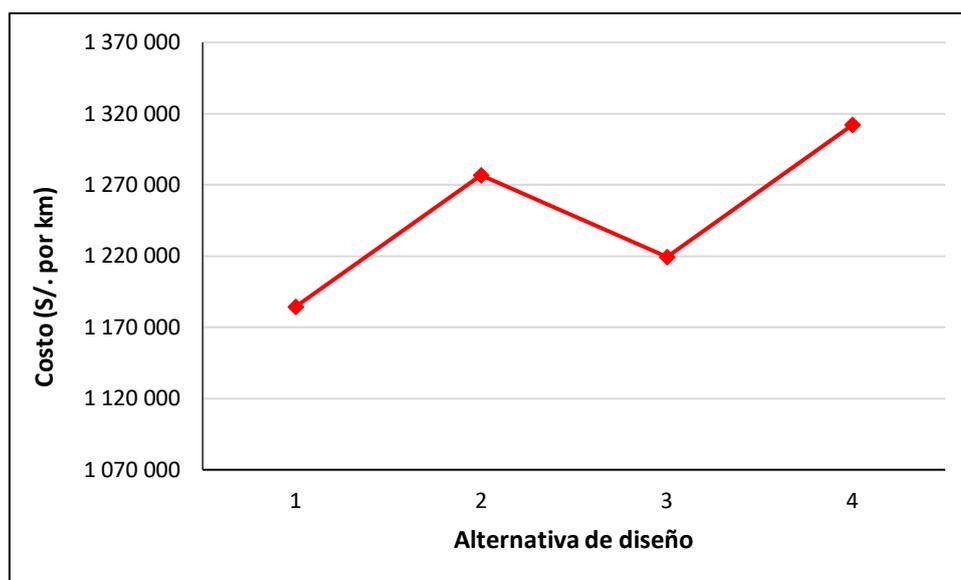


Figura 35: Costo de construcción de alternativas de pavimento rígido método PCA (Fuente: propia)

En la Figura 35 se observa que la alternativa más económica de pavimento rígido método PCA es la opción 1, la cual tiene un costo de S/.1 184 459. Esta estructura está comprendida por una losa de concreto de 28cm y capa base de 15 cm de espesor, tal como se muestra en la Figura 36.

Losa de concreto	Espesor = 28 cm. Pavimento de concreto de cemento Portland $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$. $f'c_{\text{mínimo}} = 280 \text{ kg/cm}^2$ para dar inicio al tránsito (80% $f'c$)
Base Granular	Espesor = 15 cm. CBR = 106%. Compactación al 100% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado Método C
Subrasante	Espesor = 30 cm. CBR = 7%. Compactación al 95% de la densidad máxima seca obtenida del ensayo Proctor Modificado.

Figura 36: Sección transversal del pavimento rígido método PCA (Fuente: propia)

Por otro lado, al igual que en el método AASHTO, de la Figura 35 se desprende que existe una tendencia de aumento de costo de construcción al mantener el mismo espesor de losa de concreto y variar el espesor de la capa base. Asimismo, si se compara la alternativa 3 con la alternativa 2, se observa que al aumentar el espesor de la losa de concreto 1cm y reducir el espesor de la capa base 15 cm, el costo de construcción decrece en aproximadamente 5%.

De acuerdo con lo expuesto en el presente subcapítulo, en la Figura 32 se muestra el comparativo de costos de construcción de todas las alternativas de diseño de pavimento flexible bajo las metodologías AASHTO e Instituto del Asfalto.

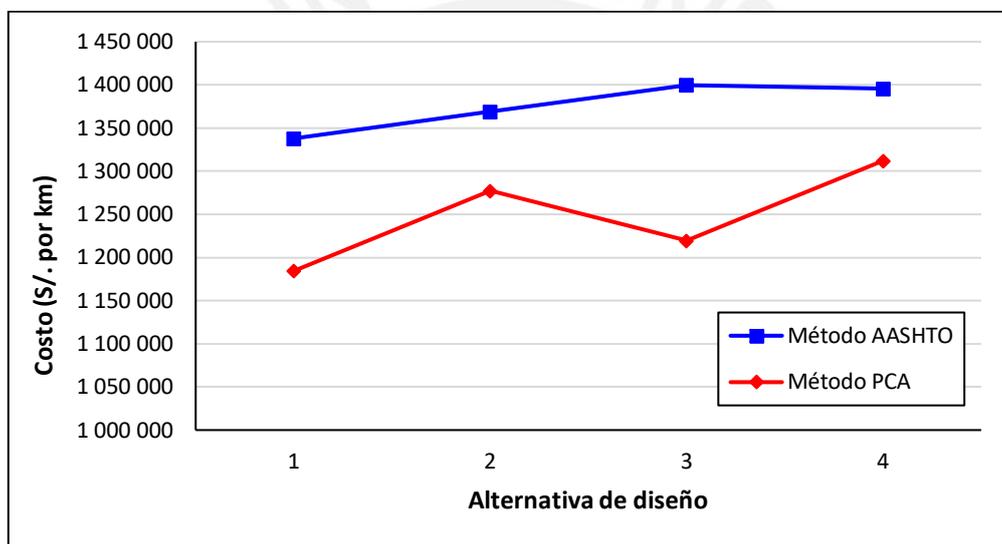


Figura 37: Comparativo de costo de construcción de pavimento rígido métodos AASHTO y PCA (Fuente: propia)

De la Figura 37 se observa que, para todas las alternativas, la metodología PCA brinda un diseño de pavimento rígido mucho más económico que la metodología AASHTO. La diferencia de costo constructivo entre una misma alternativa de ambos métodos es de aproximadamente S/. 160 000.

Del análisis económico efectuado hasta este punto, se puede concluir que el pavimento rígido (S/. 1 184 459) tiene un costo constructivo mayor que el pavimento flexible (S/. 1 057 567), de S/. 126 892, lo cual representa ser aproximadamente un 12% más costoso. Entonces,

en el siguiente capítulo se procederá a evaluar el costo de mantenimiento de ambas opciones para elegir la alternativa de pavimento económicamente más favorable a lo largo de todo el periodo de vida útil de la estructura.



Capítulo 9: Mantenimiento del pavimento

Para esta etapa del proyecto se empleará el software HDM-4, donde se conocerá el daño proyectado que tendrá cada tipo de pavimento durante todo el tiempo de servicio. De esta forma, se podrá establecer los trabajos de mantenimiento rutinario y periódico necesarios para conservar adecuadamente la vía. En primer lugar, se analizará el mantenimiento requerido para el pavimento flexible, y luego, para el pavimento rígido.

Como la carretera es una vía de gran importancia y autopista de primera clase, entonces para el pavimento flexible se establecen los siguientes niveles de servicio:

- ❖ Todas las fisuras deben estar correctamente selladas.
- ❖ El porcentaje máximo de agrietamiento será de 2%.
- ❖ No se admitirán baches.
- ❖ El IRI máximo durante el periodo de servicio será 3.3 m/km.

Luego de ingresar los parámetros de entrada en el programa HDM-4, se obtiene el resumen de deterioro anual del pavimento flexible sin mantenimiento (ver Anexo F). En dicho cuadro se muestra que, al llegar el año 20 de vida útil del pavimento y no realizarse ningún trabajo de conservación, el porcentaje de fisuración de la estructura llega al 90%, el número de baches será 27 432 y el IRI alcanzará un valor de 16 (desde el año 17).

Los valores expuestos previamente muestran que el pavimento se encontrará prácticamente destruido incluso antes de terminar su periodo de diseño. Por lo mencionado anteriormente y para cumplir con los niveles de servicio establecidos, se proponen las siguientes actividades como política de mantenimiento:

- ❖ Sellado de fisuras como mantenimiento rutinario.
- ❖ Sellado asfáltico cada 4 años para controlar la aparición de baches, mejorar la fricción superficial y mantener el porcentaje de agrietamiento al mínimo.

- ❖ Fresado y recapeo de 1 pulgada para mantener el IRI por debajo de 3.3 m/km.

Con estas actividades planteadas, se procede a calcular el siguiente escenario en el programa HDM-4, donde se obtiene el resumen de deterioro anual del pavimento flexible con el mantenimiento establecido (ver Anexo F). En dicho cuadro se muestra que, al aplicar el sellado asfáltico cada 4 años, el porcentaje de fisuración y el número de baches es nulo. Por otro lado, se observa que se alcanza el IRI máximo en el año 11, tiempo en el cual se efectúa el fresado y recapeo de 1", con lo que se logra disminuir el IRI hasta el valor 2.1 m/km para el año 12 y al final del periodo de servicio se alcanza el valor 3 m/km. Por lo tanto, se verifica que dichas actividades permiten cumplir con los niveles de servicio establecidos.

A continuación, se procede a calcular el costo unitario de las partidas de mantenimiento del pavimento flexible para conocer el costo asociado correspondiente. Para ello, en las siguientes tablas se presentan las partidas involucradas en esta etapa del proyecto.

Tabla 66: Partida de recapeo de carpeta asfáltica en caliente de 1"

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S/.)		23.60
	4200	4200			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.42
Capataz	HH	1	0.0019	31.43	0.06
Oficial	HH	2	0.0038	20.60	0.08
Peón	HH	8	0.0152	18.63	0.28
Materiales					20.86
Mezcla asfáltica en caliente para mantenimiento	m ³		0.0530	393.65	20.86
Equipos					0.79
Herramientas manuales	%MO		0.0300	0.42	0.01
Rodillo neumático autopropulsado 135 HP 9.26 ton	HM	1	0.0019	126.26	0.24
Rodillo tándem vibratorio autopropulsado 111-130 HP 9-11 ton	HM	1	0.0019	206.80	0.39
Pavimentadora sobre orugas 105 HP	HM	1	0.0019	143.1	0.27
Subpartidas					1.39
Riego de liga	m ²		1.0000	1.39	1.39

Nota: Fuente propia

Tabla 67: Partida de fresado de carpeta asfáltica de 1''

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S/.)		9.06
	1200	1200			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.21
Capataz	HH	1	0.0067	27.53	0.21
Equipos					8.33
Fresadora y perfiladora de pavimentos	HM	1	0.0067	1250	8.33
Subpartidas					0.52
Transporte y remoción de asfalto	m ³ k		0.2540	2.05	0.52

Nota: Fuente propia

Tabla 68: Partida de sello asfáltico

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S/.)		3.62
	4500	4500			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.18
Capataz	HH	1	0.0018	31.43	0.06
Operario	HH	1	0.0018	26.19	0.04
Oficial	HH	2	0.0036	20.60	0.07
Materiales					2.72
Arena	m ³		0.0128	26.90	0.34
Material confitillo 3/8"	m ³		0.0088	36.80	0.32
Emulsión asfáltica	gln		0.2180	9.40	2.05
Equipos					0.72
Herramientas manuales	%MO		0.0300	0.18	0.01
Camión imprimador 210 HP 1800 gln	HM	1	0.0018	197.97	0.35
Rodillo tándem vibratorio autopropulsado 111-130 HP 9-11 ton	HM	1	0.0018	206.80	0.37

Nota: Fuente propia

Tabla 69: Partida de sellado de fisuras

Rendimiento: m ² /día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S/.)		2.50
	1000	1000			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.28
Capataz	HH	0.1	0.0008	31.43	0.03
Operario	HH	0.5	0.0040	26.19	0.10
Peón	HH	1	0.0080	18.63	0.15
Materiales					1.15
Arena	m ³		0.0015	26.90	0.04
Emulsión asfáltica	gln		0.1180	9.40	1.11
Equipos					1.07
Camión imprimador 210 HP 1800 gln	HM	1	0.0080	30.00	0.24
Rodillo tándem vibratorio autopropulsado 111-130 HP 9-11 ton	HM	1	0.0080	103.64	0.83

Nota: Fuente propia

Para el caso de pavimento rígido, al igual que para pavimento flexible, debido a la importancia del buen estado de la autopista, se establecen los siguientes niveles de servicio:

- ❖ El porcentaje máximo de fisuramiento de losas será 2%.
- ❖ El escalonamiento máximo de losas será 2 mm.
- ❖ El porcentaje máximo de juntas con despostillamiento será 2%.
- ❖ El IRI máximo durante el periodo de servicio será 3.3 m/km.

Luego de ingresar los parámetros de entrada en el programa HDM-4, se obtiene el resumen de deterioro anual del pavimento rígido sin mantenimiento (ver Anexo G). En dicho cuadro se muestra que, al llegar el año 20 de vida útil del pavimento y no realizarse ningún trabajo de conservación, el porcentaje de juntas con despostillamiento llega al 3.9%, el escalonamiento medio llega a 2.2 mm, no se presenta fisuración de losas y el IRI alcanzará un valor de 3.7 m/km.

Por lo mencionado anteriormente y para cumplir con los niveles de servicio establecidos, se proponen las siguientes actividades como política de mantenimiento:

- ❖ Resellado de juntas cada 6 años para evitar la presencia de todo tipo de fisuras y el despostillamiento de juntas.
- ❖ Microfresado de losas de 5 mm para mantener el IRI por debajo de 3.3 m/km y evitar el escalonamiento de las losas.

Con las actividades previamente planteadas, se procede a calcular el siguiente escenario en el programa HDM-4. De esta forma, se obtiene el resumen de deterioro anual del pavimento rígido con el mantenimiento establecido (ver Anexo G). En dicho cuadro se muestra que, al aplicar el resellado de juntas cada 6 años, el porcentaje de juntas con despostillamiento llega a solo 1.5%.

Por otro lado, se observa que se alcanza el IRI máximo en el año 16, tiempo en el cual se efectúa el microfresado de losas, con lo que se logra disminuir el IRI hasta el valor 2.5 m/km y al final del periodo de servicio se alcanza el valor 2.7 m/km. Asimismo, esta actividad de mantenimiento periódico permite que el escalonamiento medio llegue a un valor máximo de 1.8 mm y al final del periodo de servicio se alcance el valor de 0.9 mm.

Por lo mencionado previamente, se verifica que dichas actividades permiten cumplir con los niveles de servicio establecidos. Entonces, se procede a calcular el costo unitario de las partidas de mantenimiento del pavimento rígido para conocer el costo asociado correspondiente. Para ello, en las siguientes tablas se presentan las partidas involucradas en esta etapa del proyecto.

Tabla 70: Partida de resellado de junta

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo Unitario x m (S/.)		10.96
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Subpartidas					10.96
Retiro de sello en juntas	m		1	1.05	1.05
Sellado de juntas	m		1	9.91	9.91

Nota: Fuente propia

Tabla 71: Partida de microfresado de losas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo Unitario x m ² (S/.)		8.81
	1250	1250	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de obra					0.68
Capataz	HH	1	0.0064	31.43	0.20
Peón	HH	4	0.0256	18.63	0.48
Subpartidas					0.12
Limpieza de terreno	pza		0.0100	10.41	0.10
Transporte de remoción de concreto	und		0.0064	1.92	0.01
Equipos					8.02
Herramientas manuales	%MO		0.0300	0.68	0.02
Fresadora y perfiladora de pavimentos	HM	1	0.0064	1250.00	8.00

Nota: Fuente propia

En base a las partidas planteadas previamente, así como la frecuencia de mantenimiento, se pueden obtener los costos de mantenimiento total durante el periodo de diseño de la estructura, tanto para pavimento flexible como rígido, tal como se muestra en la Tabla 72 y Tabla 73, respectivamente. De estas tablas, se desprende que el costo de mantenimiento total de un pavimento rígido es mucho menor que el de un pavimento flexible. Para el caso de estudio, se tiene una diferencia de costo de mantenimiento total entre ambos tipos de S/.254 329. El costo de mantenimiento total del pavimento rígido representa el 51% del costo de mantenimiento del pavimento flexible.

Tabla 72: Costo de mantenimiento total de pavimento flexible

Partida	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Costo (S/.)
Sellado de fisuras	m ²	2.50	25 176
Sello asfáltico	m ²	3.62	104 196
Fresado y recapeo de 1"	m ²	32.66	235 144
Costo Mantenimiento Total en periodo de diseño (S/.)			364 516

Nota: Fuente propia

Tabla 73: Costo de mantenimiento total de pavimento rígido

Partida	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Costo (S/.)
Microfresado de losas	m ²	8.81	119 954
Resellado de juntas	m	10.96	65 760
Costo Mantenimiento Total en periodo de diseño (S/.)			185 714

Nota: Fuente propia

Capítulo 10: Discusión de Resultados

Antes de analizar la opción económicamente más favorable entre ambas alternativas de diseño, se procederá a efectuar el análisis de incidencia de partidas tanto para pavimento flexible como pavimento rígido, tal como se muestra en la Figura 38 y Figura 39, respectivamente.

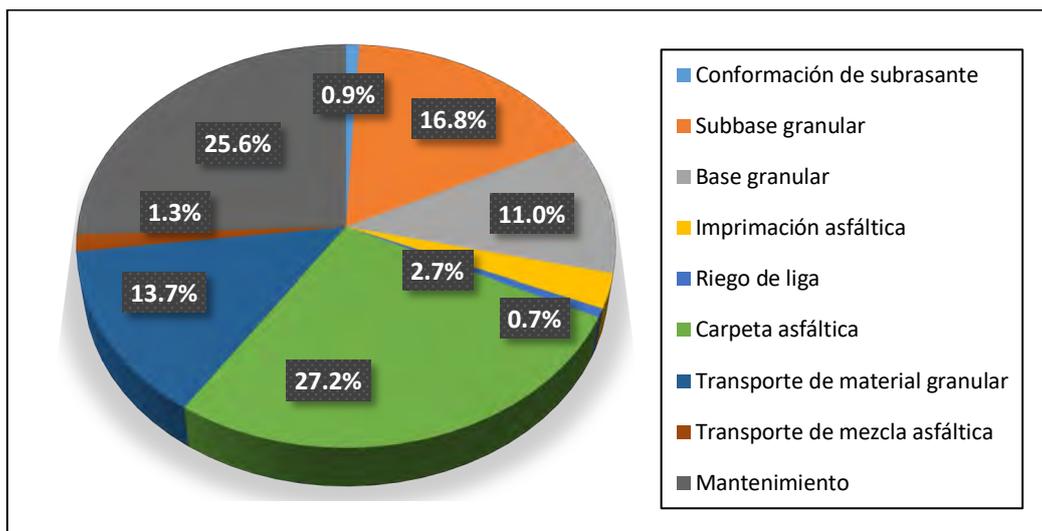


Figura 38: Porcentaje de incidencia de las partidas de pavimento flexible (Fuente: propia)

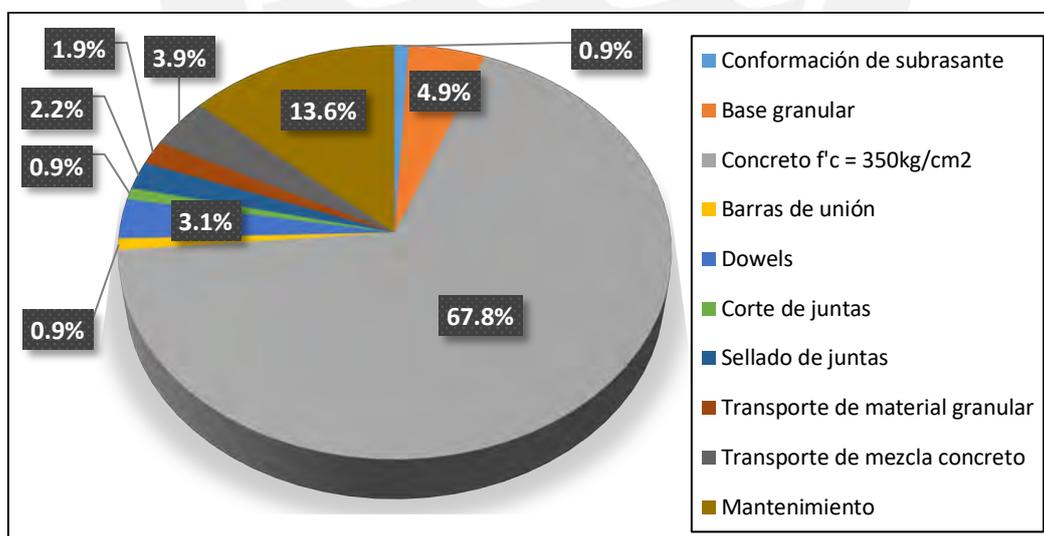


Figura 39: Porcentaje de incidencia de las partidas de pavimento rígido (Fuente: propia)

En la Figura 38 se puede observar que la partida más incidente en el pavimento flexible es la carpeta asfáltica con un porcentaje de 27.2%, seguido del mantenimiento con 25.6% y luego la subbase granular con un 16.8%. Por ello, debido a la incidencia mayoritaria del costo

de la capa asfáltica, es importante diseñar una estructura con espesor de carpeta asfáltica pequeño y espesores de base y subbase mayores, para que el pavimento sea factible económicamente. Asimismo, de la Figura 38 se desprende que el mantenimiento del pavimento representa el 25% del costo total de la obra, lo cual demuestra el gran costo de inversión que necesita un pavimento flexible para mantenerse en condiciones óptimas durante su tiempo de vida útil.

Por otro lado, en la Figura 39 se puede observar que la partida con mayor incidencia en el pavimento rígido es el concreto $f'c=350\text{kg/cm}^2$ con un porcentaje de 67.8%, seguido del mantenimiento con 13.6% y luego la base granular con un 4.9%. Por lo tanto, dada la gran incidencia de costo del concreto, es de vital importancia reducir el espesor de la losa de concreto para lograr un pavimento económico. Asimismo, de la Figura 39 se desprende que el mantenimiento del pavimento solo representa el 14% del costo total de la obra, lo cual demuestra que se necesita poca inversión en un pavimento rígido para conservarlo en condiciones óptimas durante su ciclo de vida de diseño.

Ahora, con toda la información calculada para las dos alternativas de diseño, se procede a efectuar el análisis comparativo entre ellas. Para ello, en la Tabla 74 se muestra el presupuesto de dichas opciones de diseño. Asimismo, en la Figura 40 se muestra la gráfica del cambio del costo total de la obra a lo largo del tiempo de servicio de la vía.

Tabla 74: Presupuesto en costo directo de las alternativas de pavimento flexible y rígido

	Pavimento Flexible	Pavimento Rígido
Costo de construcción (S/.)	1 057 567	1 184 459
Costo de mantenimiento (S/.)	364 515	184 714
Costo Total (S/.)	1 422 082	1 370 173

Nota: Fuente propia

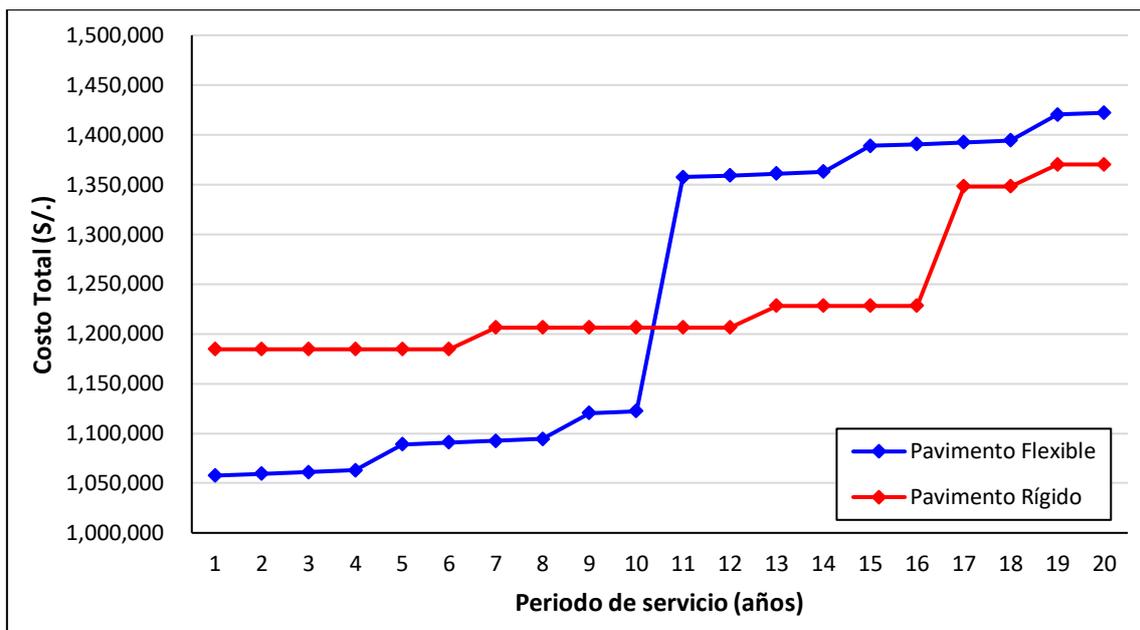


Figura 40: Costo total del pavimento a lo largo del periodo de servicio (Fuente: propia)

De la Tabla 74 se observa que, para el pavimento flexible, el costo de mantenimiento representa el 34.5% del costo constructivo. Por otro lado, para el pavimento rígido, el costo de mantenimiento representa el 15.6% del costo constructivo. Entonces, se desprende que el costo de mantenimiento de un pavimento rígido es mucho menor que el de uno flexible, ya que requiere menor frecuencia de trabajos de conservación.

Asimismo, del análisis planteado se desprende que el pavimento rígido tiene un costo total menor que el pavimento flexible. A pesar de que el costo constructivo del pavimento rígido es elevado, a lo largo del tiempo de vida útil de la estructura resulta una inversión rentable. Esto se visualiza en la Figura 40, donde a partir del año 11 del periodo de servicio, el pavimento flexible alcanza un valor de costo total muy superior al pavimento rígido. Por lo tanto, se deduce que efectuar el análisis económico en la etapa de mantenimiento es sumamente importante para conocer el costo real que involucra un pavimento durante toda su vida útil.

Entonces, de todo el estudio de alternativas efectuado, se selecciona como la opción más económica al pavimento rígido del método PCA. El pavimento tiene un costo total de

S/.1 370 173 y está conformado por una losa de concreto ($f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$) de 28 cm y una base de 15 cm de espesor (ver Figura 36).

Por último, se procede a diseñar las bermas de la alternativa seleccionada. Debido a que las bermas solo se utilizan en casos de emergencia, el manual del MTC recomienda que solo se utilice el 5% del ESAL para el diseño. Asimismo, se empleará la metodología AASHTO para el diseño de este elemento, ya que se demostró que brinda menores espesores de capa que el método IA. A continuación, en la Tabla 75 se muestran el resumen del diseño:

Tabla 75: Resumen de diseño de bermas

Parámetro	Valor	Unidad
Numero de ejes equivalentes (W18)	1.31×10^6	ESAL
Periodo de diseño	20	años
Confiabilidad (Rd)	90	%
Desviación estándar normal (Zr)	-1.282	
Desviación estándar total (So)	0.44	
ΔPSI	1.2	
Módulo de resiliencia de la subrasante (Mr)	8.877	ksi
SN obtenido del nomograma	3.65	
a1	0.40	
a2	0.14	
m2	1.00	
a3	0.10	
m3	0.80	

Nota: Fuente propia

Luego de obtener el SN, se emplea la ecuación 7 para hallar las dimensiones de las capas de la estructura. El manual del MTC recomienda que, para el volumen de tráfico del caso de estudio, el espesor de la carpeta asfáltica debe ser 3" y la base granular 20 cm. Entonces, de la ecuación 7 se obtiene una subbase de 45 cm de espesor. Para un área de berma de 2400 m^2 y empleando las partidas definidas del pavimento flexible se puede obtener el costo de construcción de las bermas. Así pues, el costo de las bermas es de S/.233 258. Por lo tanto, el costo directo total del pavimento rígido y bermas es de S/.1 603 430. En el Anexo H se muestran los planos con el diseño de juntas de la estructura del pavimento.

Capítulo 11: Conclusiones y Recomendaciones

Luego de efectuar el proceso de diseño del pavimento y análisis económico de las alternativas durante la etapa de construcción y el tiempo de vida útil de la estructura, se concluye la tesis con las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- ❖ En base a los datos de la estación meteorológica Augusto Weberbauer, se determinó que la zona de estudio presenta una precipitación total anual de 654 mm, por lo que el tramo de diseño está expuesto a grandes cantidades de lluvia durante la mayor parte del año. El periodo con mayor cantidad de lluvia comprende los meses de diciembre a marzo y la época seca comprende los meses de junio a agosto. Asimismo, la temperatura promedio de la zona es de 14.5 °C, donde la temperatura mínima anual no desciende los 3 °C, por lo que el suelo no está expuesto a ciclos de hielo-deshielo.
- ❖ Es recomendable recolectar la data pluviométrica y meteorológica de la estación más cercana al área de diseño, tanto en altitud como distancia. Asimismo, la estación debe contar con una muestra considerable de datos históricos. De esta forma, el diseño del pavimento será el adecuado para las condiciones de la zona, ya que valores como temperatura promedio anual y porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación son parámetros de entrada de las metodologías de diseño.
- ❖ El suelo de la subrasante está conformado por arcilla de baja plasticidad con un CBR de 7%, clasificada como subrasante regular, por lo que no ha sido necesario emplear alguna técnica de mejoramiento de suelo. Por otro lado, con el CBR se obtuvo el módulo de resiliencia de la subrasante para los pavimentos flexibles y módulo de reacción de la subrasante para los pavimentos rígidos. Como el valor del CBR es bajo, esto condicionó a que las diversas capas de la estructura del pavimento deban tener un espesor grande. Para los 30 cm de subrasante a compactar se utilizará un equipo de rodillo pata de cabra.

- ❖ El suelo de subbase está compuesto por arena limosa con un CBR de 23%. Debido a la presencia de finos, el coeficiente de permeabilidad de esta capa se encuentra entre 10^{-2} y 10^{-4} cm/s, por lo que el drenaje en esta capa no será rápido. Asimismo, el valor bajo de CBR demuestra que el suelo no tiene alta resistencia. Estos dos factores son considerados en el método AASHTO de pavimento flexible, al emplear el coeficiente de drenaje y coeficiente estructural. Entonces, ya que no se tiene buenas condiciones en esta capa, el espesor de la subbase obtenido en las diferentes alternativas es de gran dimensión.
- ❖ El suelo de base está conformado por piedra chancada tipo B con un CBR igual a 106%. Esta capa tiene excelente drenaje al ser un suelo granular y el valor de CBR alto demuestra que el suelo tiene una buena resistencia. Estos dos factores son considerados en el método AASHTO, al emplear el coeficiente de drenaje y coeficiente estructural. Como el valor del CBR es alto, entonces no había necesidad de tener un espesor de base grande.
- ❖ En la distribución de volumen de tráfico se tiene una gran cantidad de vehículos livianos, que representan el 87% del conteo total. Asimismo, la proyección del IMDA demuestra que para el año 15 el tránsito vehicular se duplicará y para el año 20 aumentará en 136% con respecto al año base. Por otro lado, el ESAL para pavimento rígido siempre es mayor que para pavimento flexible, y al observar este parámetro en el tiempo, se aprecia que la diferencia se torna cada vez más grande a medida que el periodo de diseño aumenta. Así pues, para el diseño se cuenta con un ESAL igual a 2.61×10^7 para pavimento flexible y 3.97×10^7 para pavimento rígido, lo cual refleja un gran volumen vehicular que circulará por la carretera durante su tiempo de servicio.
- ❖ En el diseño bajo la metodología AASHTO se toman en cuenta varios parámetros de entrada, en los que destacan la confiabilidad, desviación estándar y pérdida de serviciabilidad, ya que le brindan cierto grado de seguridad al diseño y garantizan que el pavimento tendrá un desempeño óptimo.

- ❖ El diseño bajo la metodología del Instituto del Asfalto analiza al pavimento con los criterios de falla por fatiga y por deformación permanente. Sin embargo, emplea solo tres parámetros de entrada y no considera capa de subbase, por lo que se obtienen espesores de carpeta asfáltica grandes. Por ello, se calculó el menor número estructural de las distintas opciones para realizar una equivalencia con una estructura con capa de subbase y menor espesor de capa asfáltica. El número estructural obtenido por el método IA es mayor que el hallado por el método AASHTO (flexible), por lo que los espesores de las distintas capas del pavimento son mayores que este.
- ❖ Para el método AASHTO (rígido) se iteró el espesor de la capa base para conseguir reducir el espesor de la losa de concreto. Sin embargo, se encontró que al variar el espesor de la capa granular, el espesor de la losa no sufre gran variación, ya que apenas se reduce unos pocos milímetros. Por ello, se recomienda que en futuros trabajos de tesis se itere la resistencia del concreto para evaluar si con ello puede lograrse una variación significativa del espesor de la losa de concreto.
- ❖ La metodología de la PCA tiene dos criterios de diseño: análisis por erosión y análisis por fatiga, donde se efectúa un proceso de iteración para que el porcentaje de erosión y fatiga sea menor al 100%. Asimismo, es la única metodología que estudia el daño que produce cada eje por separado, por lo que no se emplea el ESAL. Además, se tiene un factor de seguridad de carga, de manera que se prevé el paso de vehículos con carga mayor a la reglamentaria. Así pues, se concluye que el daño por fatiga no es el que controla el diseño, sino el daño por erosión. Por ello, debido al volumen vehicular elevado, se seleccionaron las alternativas con un porcentaje de erosión de 40%, de tal forma que brinde cierto grado de confiabilidad al diseño.
- ❖ Es recomendable comparar los resultados obtenidos por medio de los nomogramas de diseño con los programas que actualmente existen en el mercado, para verificar que los

resultados sean coherentes. Esto se debe a que los métodos gráficos dependen en gran medida de la exactitud del diseñador, mientras que los programas de diseño brindan valores exactos como resultado. Así pues, para la metodología del Instituto del asfalto se empleó el programa DAMA, para el método de la PCA se usó el programa BS-PCA y para la metodología AASHTO se utilizaron las ecuaciones de diseño.

- ❖ Para el pavimento flexible, se demostró que es necesario iterar los espesores de las capas de base y subbase para obtener una estructura económica. En el presente caso de estudio, se halló que resulta económicamente ventajoso aumentar 5 cm el espesor de capa base y reducir 10 cm el espesor del material de subbase, porque el costo de construcción se reduce en aproximadamente 2%. Asimismo, cabe recalcar que nunca se debe disminuir el espesor mínimo de carpeta asfáltica que manda la normativa peruana.
- ❖ Para el pavimento rígido, se demostró que es conveniente usar el espesor mínimo de losa de concreto calculado en el diseño, ya que con ello se obtiene el menor costo de construcción. Asimismo, en el presente caso de estudio se halló que resulta económicamente ventajoso aumentar 1 cm el espesor de la losa de concreto y reducir 15 cm el espesor de la capa base, porque el costo de construcción se reduce en aproximadamente 5%.
- ❖ El mantenimiento de un pavimento es de suma importancia para mantener los niveles de servicio dentro de los límites permisibles. Para ello, se necesitan establecer políticas de mantenimiento que cumplan con estos requerimientos. El programa HDM-4 permite visualizar como varía el daño del pavimento en el tiempo y verificar si las actividades de conservación permiten cumplir con los niveles de servicio establecidos.
- ❖ El mantenimiento de un pavimento flexible se debe efectuar con mayor frecuencia que un pavimento rígido. La razón de ello es la diferencia de rigidez entre ambos tipos, en donde

la carpeta asfáltica tiene una rigidez considerablemente menor que una losa de concreto, por lo cual se deteriora en un corto tiempo.

- ❖ La partida más incidente del pavimento flexible es la carpeta asfáltica con un 27%, seguido de la partida de mantenimiento con 25%. Asimismo, la partida más incidente del pavimento rígido es el concreto con un 68%, seguido de la partida de mantenimiento con 14%. Por lo tanto, queda comprobado que del espesor de la carpeta asfáltica y la losa de concreto se puede saber si un pavimento es económico o costoso.
- ❖ Al calcular el costo de construcción de la estructura, se obtuvo el costo del pavimento flexible menor que el pavimento rígido. Sin embargo, al evaluar el costo de mantenimiento total durante el periodo de diseño de la estructura, se produjo el resultado inverso. Para el tipo rígido, el costo de mantenimiento total representa el 15.6% de su costo de construcción, mientras que para el flexible representa el 34.5%, lo cual demuestra la gran inversión que se necesita para mantener un pavimento flexible en óptimas condiciones durante todo su tiempo de vida útil.
- ❖ El pavimento seleccionado tiene un costo directo total de S/.1 603 430, el cual está conformado por una losa de concreto de 28 cm, una base de 15cm, bermas de asfalto y juntas con barras de unión y dowels.
- ❖ Tan importante como el diseño del pavimento, son las etapas de construcción y selección de materiales. Así pues, los materiales deben ser de buena calidad y la mano de obra debe ser especializada en tareas de compactación de suelo, colocación de barras de unión y dowels, entre otros, para que el pavimento tenga un desempeño óptimo.
- ❖ También, se recomienda mantener actualizado los precios de materiales y equipos, así como el rendimiento de la mano de obra, ya que como se ha podido observar, de ello depende el presupuesto de obra.

- ❖ Se sugiere como futuro trabajo de tesis, efectuar un análisis de sensibilidad de las diversas variables involucradas en el diseño, para poder conocer la influencia de cada una de ellas sobre el dimensionamiento de la estructura y su respectivo presupuesto.



Referencias Bibliográficas

- ACI Committee 363R-92. (1997). *State of the Art Report on Report on High Strength Concrete*. American Concrete Institute.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington D.C, Estados Unidos: Autor.
- Asphalt Institute. (1988). *The Asphalt handbook*. Maryland, Estados Unidos: Autor.
- Asphalt Institute. (1991). *Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Manual Series No 1 (MS-1)*. Novena edición. Washington D.C, Estados Unidos: Autor.
- Barrantes, R y Zavala, B. (2007, diciembre). Reporte de zonas críticas por peligros geológicos y geohidrológicos en la región Cajamarca. 30 de octubre de 2018. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico*, pp. 40-51. Recuperado de http://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/204416/06R_ZONAS_CRITICAS_CAJAMA_RCA.pdf/346b70cc-088a-46c7-8745-85d276d62962
- Cesel (2006). Informe Final Ingeniería Definitiva para la Carretera: Chilete – San Pablo – Empalme Ruta 3N (Km. 25 Carretera Cajamarca – Bambamarca). Lima, Perú. Abril, 2006.
- Cruz, J. (2009). *Costos y Presupuestos en Carreteras*. Segunda edición. Lima, Perú: Grupo Universitario.
- Delatte, N. (2008). *Concrete pavement design, construction, and performance*. Londres, Inglaterra: Taylor & Francis.
- Fwa, T. (2006). *The Handbook of Highway Engineering*. Florida, Estados Unidos: Taylor & Francis.
- Garber, N. & Hoel, L. (2005). *Ingeniería de tránsito y carreteras*. Tercera edición. México D.F, México: Thomson.
- Grupo S10. (2019, noviembre). Costo de maquinarias, materiales y horas hombre. *Costos: Revista especializada para la construcción*, pp. 120-140.
- Higuera, C. (2010). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. Tunja, Colombia: Uptc.
- Huang, Y. (2004). *Pavements analysis and design*. Segunda edición. Upper Saddle River, Estados Unidos: Prentice Hall.

Índice Medio Diario Anual - Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (s.f.). Disponible 10 de setiembre de 2019, de <http://mtcgeo2.mtc.gob.pe/imdweb/>

Instituto Mexicano del Transporte (2001). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. *Autor.* Publicación Técnica N°142, pp. 10-11. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>

Londoño, C. (1999). “Diseño de juntas para pavimento de concreto”. En Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial. *Ingeniería de pavimentos*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Menéndez, J. (2009). *Ingeniería de pavimentos: Materiales, diseño y conservación*. Primera edición. Lima, Perú: Instituto de la Construcción y Gerencia.

Ministerios de Transportes y Comunicaciones. (2003). *Reglamento Nacional de Vehículos*. Recuperado de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_70.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras. Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Recuperado de [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20\(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013\).pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013).pdf)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_9%20MCV-2014_2016.pdf

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales EM-2016*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (DG-2018)*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2022). *Provias Nacional entregó 239 kilómetros de carreteras pavimentadas en la Red Vial Nacional*. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/574338-provias-nacional-entrego-239-kilometros-de-carreteras-pavimentadas-en-la-red-vial-nacional>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2022, enero). Plan Estratégico Sectorial Multianual 2018-2026. *Sector Transportes y Comunicaciones*, pp. 5.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Segunda edición. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.
- National Cooperative Highway Research Program. (2001). Appendix CC-1: Correlation of CBR values with soil index properties. En American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Recuperado de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_cc.pdf
- Packard, P.E. (1984). *Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements*. Illinois, Estados Unidos: Portland Cement Association (PCA).
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2009). *Norma E.060 Concreto Armado*. Lima: Autor.
- Rico, A. y Del Castillo, H. (1977). *La ingeniería de los suelos en las vías terrestres*. Segundo volumen. México D.F, México: Limusa.
- Rogers, M. & Enright, B. (2016). *Highway Engineering*. Tercera edición. West Sussex, Inglaterra: Wiley Blackwell.
- Salazar, A. (1998). *Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos*. México D.F, México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (s.f.). Disponible 28 de agosto de 2019, de <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=mapa-climatico-del-peru>
- Sobolewski, M. (2005). *Various methods of the measurement of the permeability coefficient in soils – possibilities and application*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Recuperado de <http://www.ejpau.media.pl/volume8/issue2/art-13.html>

Valle Rodas, R. (1964). *Carreteras, calles y autopistas: principios generales de la mecánica de suelos aplicados a la pavimentación y métodos para el cálculo de pavimentos flexibles*. Cuarta edición. Buenos Aires, Argentina: El Ateneo

Vivar, G. (1991). *Diseño y construcción de pavimentos*. Lima, Perú: Colegio de Ingenieros del Perú.



Anexo A: Tablas de Referencia

Tabla A1: Categorías de subrasante

Categorías de la subrasante	CBR
Subrasante Inadecuada	CBR<3%
Subrasante Pobre	3≤CBR<6%
Subrasante Regular	6≤CBR<10%
Subrasante Buena	10≤CBR<20%
Subrasante Muy Buena	20≤CBR<30%
Subrasante Excelente	CBR>30%

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección Suelos y Pavimentos” por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014)

Tabla A2: Requerimientos granulométricos para subbase granular

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso (%)			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100	-	-
25 mm. (1")	-	75 - 95	100	100
9.5 mm. (3/8")	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100
4.75 mm. (N° 4)	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85
2.0 mm. (N° 10)	15 - 40	20 - 45	25 - 50	40 - 70
425 μm. (N° 40)	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45
75 μm. (N° 100)	2 - 8	5 - 15	5 - 15	8 - 15

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción” por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

Tabla A3: Requerimientos de ensayos especiales para subbase granular

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	> 3000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	50% máx.	50% máx.
CBR	MTC E 132	D 1883	T 193	40% mín.	40% mín.
Límite Líquido	MTC E 110	D 4318	T 89	25% máx.	25% máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	D 4318	T 90	6% máx.	4% máx.
Equivalencia de Arena	MTC E 114	D 2419	T 176	25% mín.	35% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	-	-	1% máx.	1% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	D 4791	-	20% máx.	20% máx.

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción” por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

Tabla A4: Requerimientos granulométricos para base granular

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso (%)			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100	-	-
25 mm. (1")	-	75 - 95	100	100
9.5 mm. (3/8")	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100
4.75 mm. (N° 4)	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85
2.0 mm. (N° 10)	15 - 40	20 - 45	25 - 50	40 - 70
425 µm. (N° 40)	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45
75 µm. (N° 100)	2 - 8	5 - 15	5 - 15	8 - 15

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción" por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

Tabla A5: CBR mínimo según tráfico en ejes equivalentes

Valor Relativo de Soporte, CBR	Tráfico en ejes equivalentes (<math><10^6</math>)	Mínimo 80%
		Tráfico en ejes equivalentes (>math>\geq 10^6</math>)

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción" por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

Tabla A6: Requerimientos de agregado grueso para base granular

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	> 3000 msnm
Partículas con Una Cara Fracturada	MTC E 210	D 5821	-	80% mín.	80% mín.
Partículas con Dos Caras Fracturadas	MTC E 210	D 5821	-	40% mín.	50% mín.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	40% máx.	40% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	D 4791	-	15% máx.	15% máx.
Sales Solubles Totales	MTC E 219	D 1888	-	0.5% máx.	0.5% máx.
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	MTC E 209	Cc 88	T 104	-	18% máx.

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción" por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

Tabla A7: Requerimientos de agregado fino para base granular

Ensayo	Norma	Requerimiento	
		< 3000 msnm	> 3000 msnm
Índice Plástico	MTC E 111	4% máx.	2% mín.
Equivalencia de Arena	MTC E 114	35% mín.	45% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	MTC E 209	-	15%

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción” por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

Tabla A8: Factor de distribución por carril

Número de líneas en cada dirección	Porcentaje de 18 kips ESAL en el carril de diseño (%)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 – 75

Fuente: Tomado de “Guide for design of pavement structures” por AASHTO (1993)

Tabla A9: Porcentaje de vehículos en el carril de diseño

Número de líneas de tráfico en dos direcciones	Porcentaje de vehículos en el carril de diseño (%)
2	50
4	45 (35 – 48)
6 o más	40 (25 – 48)

Fuente: Tomado de “Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets” por Asphalt Institute (1991)

Tabla A10: Niveles de confiabilidad según clasificación funcional

Clasificación Funcional	Nivel Recomendado de Confiabilidad (%)	
	Urbana	Rural
Interestatal	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterial	80 - 99	75 - 95
Colectora	80 - 95	75 - 95
Local	50 - 80	50 - 80

Fuente: Tomado de “Guide for design of pavement structures” por AASHTO (1993)

Tabla A11: Valores de desviación estándar normal correspondiente al nivel de confiabilidad

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

Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Tabla A12: Desviación estándar total para pavimento flexible

Tipo de Cuento Vehicular	Desviación Estándar Total, So
Medido	0.44
Estimado	0.49

Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Tabla A13: Valores de coeficientes de drenaje para pavimento flexible

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	Menor a 1%	1-5%	5-25%	mayor a 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.2
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.8
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.6
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.4

Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Tabla A14: Valores límite de diseño de la subrasante

Nivel de Tráfico ESAL	Percentil para hallar el valor de diseño de la subrasante (%)
$\leq 10^4$	60
$10^4 - 10^6$	75
$> 10^6$	87.5

Fuente: Tomado de "Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets" por Asphalt Institute (1991)

Tabla A15: Espesor mínimo de carpeta asfáltica para bases no tratadas

Tráfico ESAL	Condición de Tráfico	Espesor mínimo de concreto asfáltico (mm)
$< 10^4$	Trafico ligero en estacionamientos, avenida y vías rurales	75
$10^4 - 10^6$	Tráfico medio de camiones	100
$> 10^6$	Tráfico pesado de camiones	125

Fuente: Tomado de "Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets" por Asphalt Institute (1991)

Tabla A16: Desviación estándar total para pavimento rígido

Tipo de Conteo Vehicular	Desviación Estándar Total, S_o
Medido	0.34
Estimado	0.39

Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Tabla A17: Resistencia del concreto en base al ESAL

ESAL	Resistencia mínima equivalente a la compresión del concreto (f'_c)
$\leq 5 \times 10^6$	280 kg/cm ²
$5 \times 10^6 - 1.5 \times 10^7$	300 kg/cm ²
$\geq 1.5 \times 10^7$	350 kg/cm ²

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección Suelos y Pavimentos" por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014)

Tabla A18: Coeficiente de transferencia de carga

Berma	De Asfalto		De Concreto	
	SI	NO	SI	NO
Dispositivo de transferencia de carga				
Tipo de Pavimento				
Pavimento no reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Pavimento reforzado continuo	2.9 - 3.2	-	2.3 - 2.9	-

Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Tabla A19: Valores de coeficientes de drenaje para pavimento rígido

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	Menor a 1%	1-5%	5-25%	mayor a 25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.1
Bueno	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1
Regular	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.9
Pobre	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.8
Muy pobre	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.7

Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Tabla A20: Módulo de reacción efectivo

Valor de k subrasante (pci)	Valores de k_{efec} (pci)			
	4 in.	6 in.	9 in.	12 in.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Tabla A21: Esfuerzo equivalente para pavimento sin berma de concreto (eje simple/ eje tándem)

Espesor de losa (pulg.)	Módulo de reacción efectivo de la subrasante (pci)						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Tabla A22: Esfuerzo equivalente para pavimento sin berma de concreto (eje trídem)

Espesor de losa (pulg.)	Módulo de reacción efectivo de la subrasante (pci)						
	50	100	150	200	300	500	700
4	510/431	456/392	437/377	428/369	419/362	414/360	412/359
4.5	436/365	380/328	359/313	349/305	339/297	331/292	328/291
5	387/317	328/281	305/266	293/258	282/250	272/244	269/242
5.5	347/279	290/246	266/231	253/223	240/214	230/208	226/206
6	315/249	261/218	237/304	223/196	209/187	198/180	193/178
6.5	289/225	238/196	214/183	201/175	186/166	173/159	168/156
7	264/204	219/178	196/165	183/158	167/149	154/142	148/138
7.5	247/187	203/162	181/151	168/143	153/135	139/127	132/124
8	230/172	189/149	168/138	156/131	141/123	126/116	120/112
8.5	215/159	177/138	158/128	145/121	131/113	116/106	109/102
9	200/147	166/128	148/119	136/112	122/105	108/98	101/94
9.5	187/137	157/120	140/111	129/105	115/98	101/91	93/87
10	174/127	148/112	132/104	122/98	108/91	95/84	87/81
10.5	163/119	140/105	125/97	115/92	103/86	89/79	82/76
11	153/111	132/99	119/92	110/87	98/81	85/74	78/71
11.5	142/104	125/93	113/86	104/82	93/76	80/70	74/67
12	133/97	119/88	108/82	100/78	89/72	77/66	70/63
12.5	123/91	113/83	103/78	95/74	85/68	73/63	67/60
13	114/85	107/79	98/74	91/70	81/65	70/60	64/57
13.5	105/80	101/75	93/70	87/67	78/62	67/57	61/54
14	97/75	96/71	89/67	83/63	75/59	65/54	59/51

Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Tabla A23: Factor de erosión para pavimento sin berma de concreto y con pasajunta (eje simple/ eje tándem)

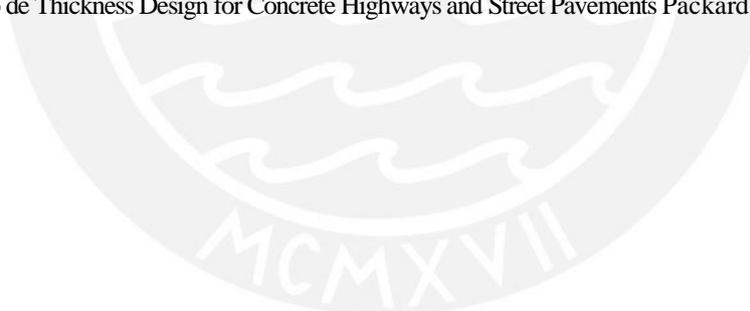
Espesor de losa (pulg.)	Módulo de reacción efectivo de la subrasante (pci)					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Tabla A24: Factor de erosión para pavimento sin berma de concreto y con pasajunta (eje trídem)

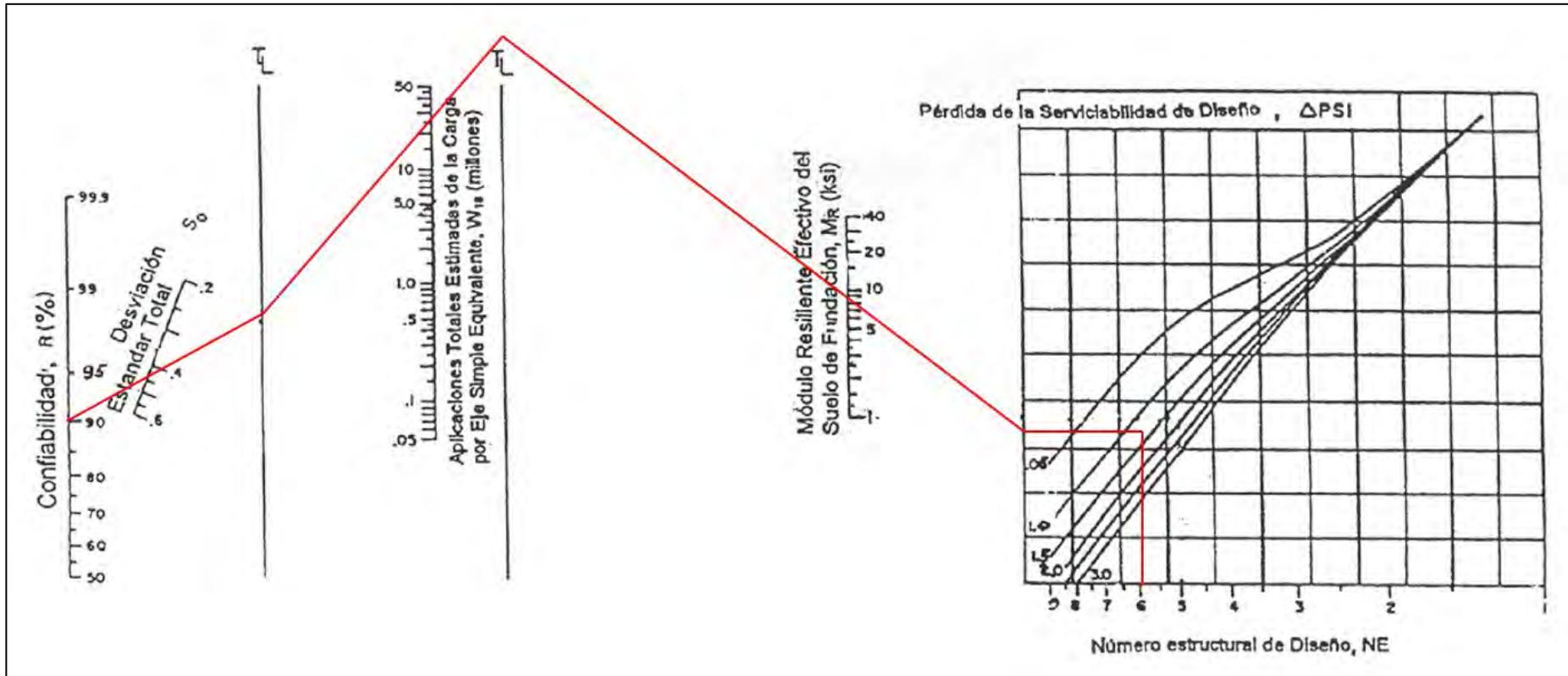
Espesor de losa (pulg.)	Módulo de reacción efectivo de la subrasante (pci)					
	50	100	200	300	500	700
4	3.89/3.33	2.82/3.20	3.75/3.13	3.70/3.10	3.61/3.05	3.53/3.00
4.5	3.78/3.24	3.69/3.10	2.62/2.99	3.57/2.95	3.50/2.91	3.44/2.87
5	3.68/3.16	3.58/3.01	2.50/2.89	3.46/2.83	3.40/2.79	3.34/2.75
5.5	3.59/3.09	3.49/2.94	3.40/2.80	3.36/2.74	3.30/2.67	3.25/2.64
6	3.51/3.03	3.40/2.87	3.31/2.73	3.26/2.66	3.21/2.58	3.16/2.54
6.5	3.44/2.97	3.33/2.82	3.23/2.67	3.18/2.59	3.12/2.50	3.05/2.45
7	3.37/2.92	3.26/2.76	3.16/2.61	3.10/2.53	3.04/2.43	3.00/2.37
7.5	3.31/2.87	3.20/2.72	3.09/2.56	3.03/2.47	2.97/2.37	2.93/2.31
8	3.26/2.83	3.14/2.67	3.03/2.51	2.97/2.42	2.90/2.32	2.86/2.25
8.5	3.20/2.79	3.09/2.63	2.97/2.47	2.91/2.38	2.84/2.27	2.79/2.20
9	3.15/2.75	3.04/2.59	2.92/2.43	2.86/2.34	2.78/2.23	2.73/2.15
9.5	3.11/2.71	2.99/2.55	2.87/2.39	2.81/2.30	2.73/2.18	2.68/2.11
10	3.06/2.67	2.94/2.51	2.83/2.35	2.76/2.26	2.68/2.15	2.63/2.07
10.5	3.02/2.64	2.90/2.48	2.78/2.32	2.72/2.23	2.64/2.11	2.58/2.04
11	2.98/2.60	2.86/2.45	2.74/2.29	2.68/2.20	2.59/2.08	2.54/2.00
11.5	2.94/2.57	2.82/2.42	2.70/2.26	2.64/2.16	2.55/2.05	2.50/1.97
12	2.91/2.54	2.79/2.39	2.67/2.23	2.60/2.13	2.51/2.02	2.46/1.94
12.5	2.87/2.51	2.75/2.36	2.63/2.20	2.56/2.11	2.48/1.99	2.42/1.91
13	2.84/2.48	2.72/2.33	2.60/2.17	2.53/2.08	2.44/1.96	2.39/1.88
13.5	2.81/2.46	2.68/2.30	2.56/2.14	2.49/2.05	2.41/1.93	2.35/1.86
14	2.78/2.43	2.65/2.28	2.53/2.12	2.46/2.03	2.38/1.91	2.32/1.83

Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)



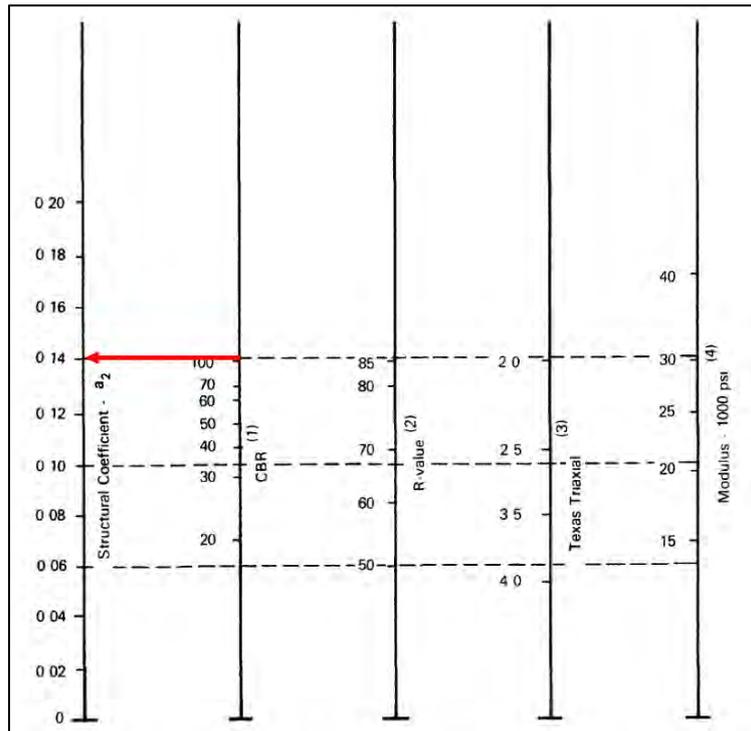
Anexo B: Diseño de Pavimento Flexible – Método AASHTO

Figura B1: Cálculo del número estructural del pavimento



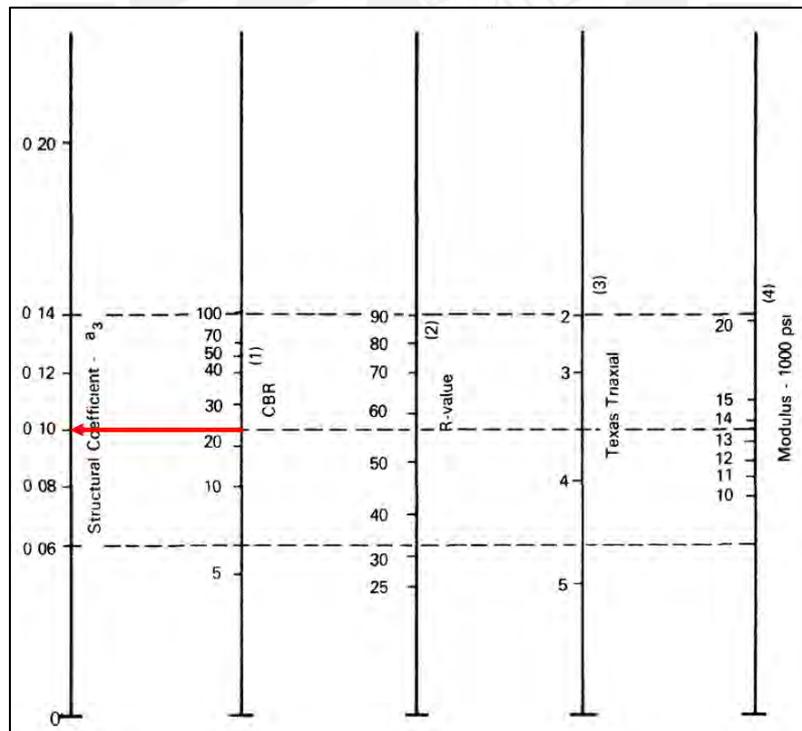
Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

Figura B2: Cálculo de coeficiente estructural de base (a2)



Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

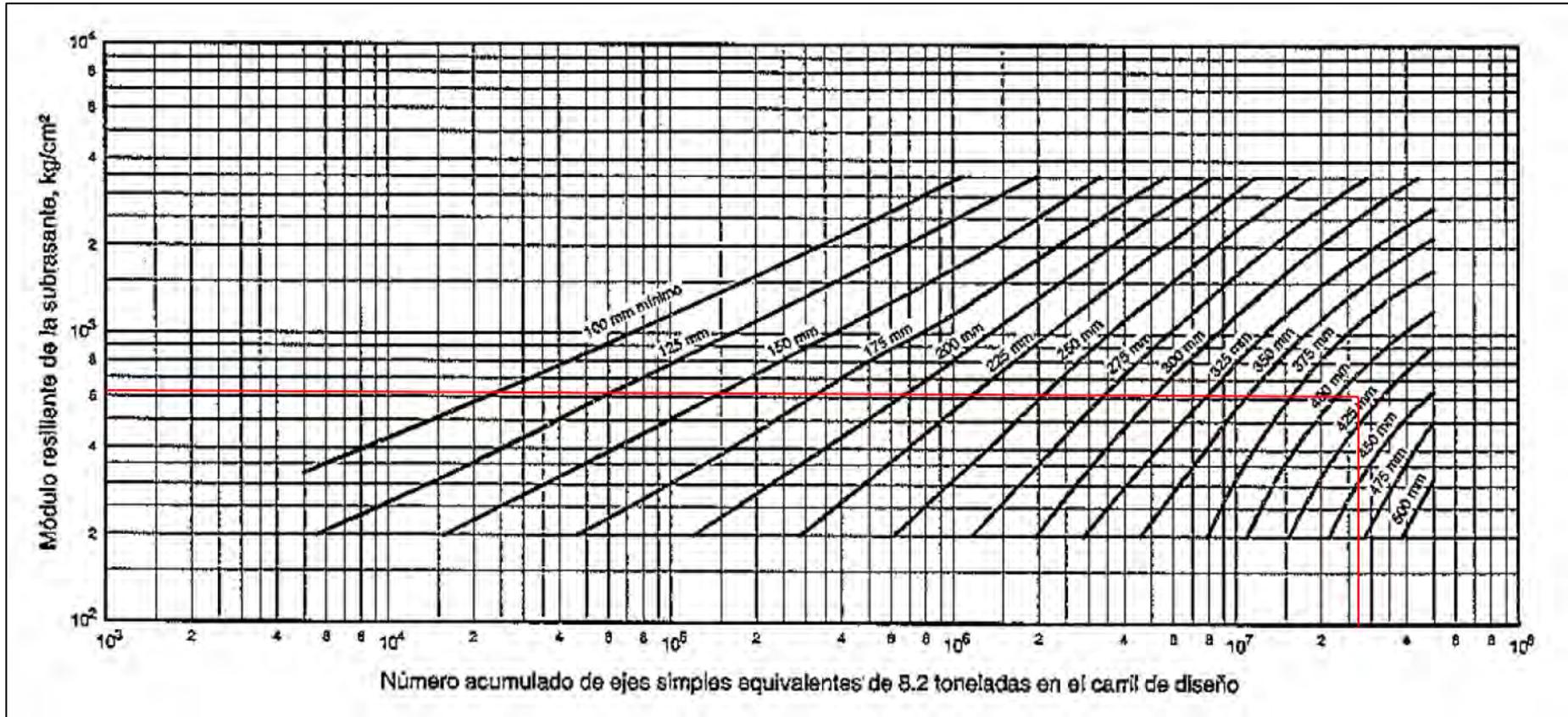
Figura B3: Cálculo de coeficiente estructural de subbase (a3)



Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

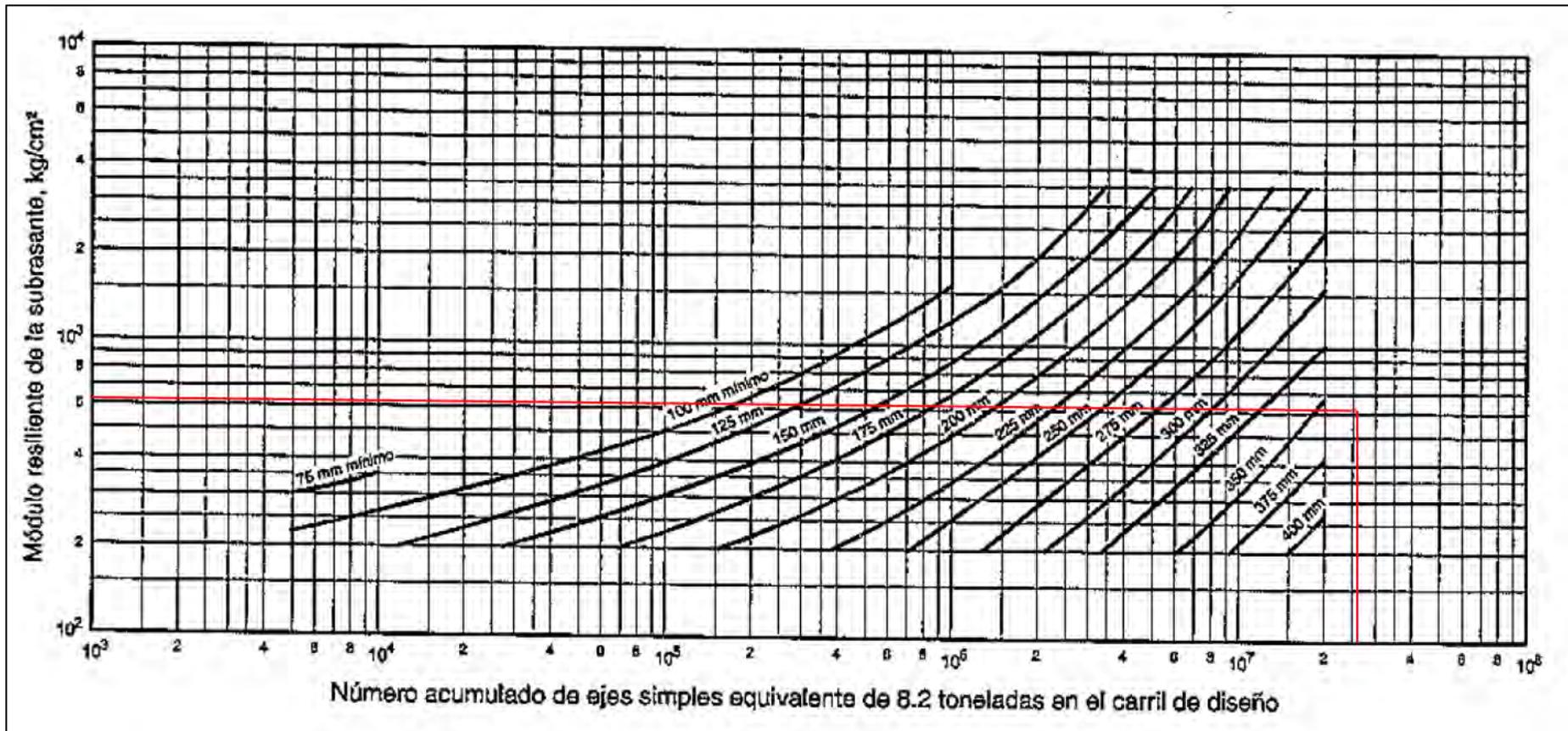
Anexo C: Diseño de Pavimento Flexible – Método Instituto del Asfalto

Figura C1: Cálculo de espesor de carpeta asfáltica sin base



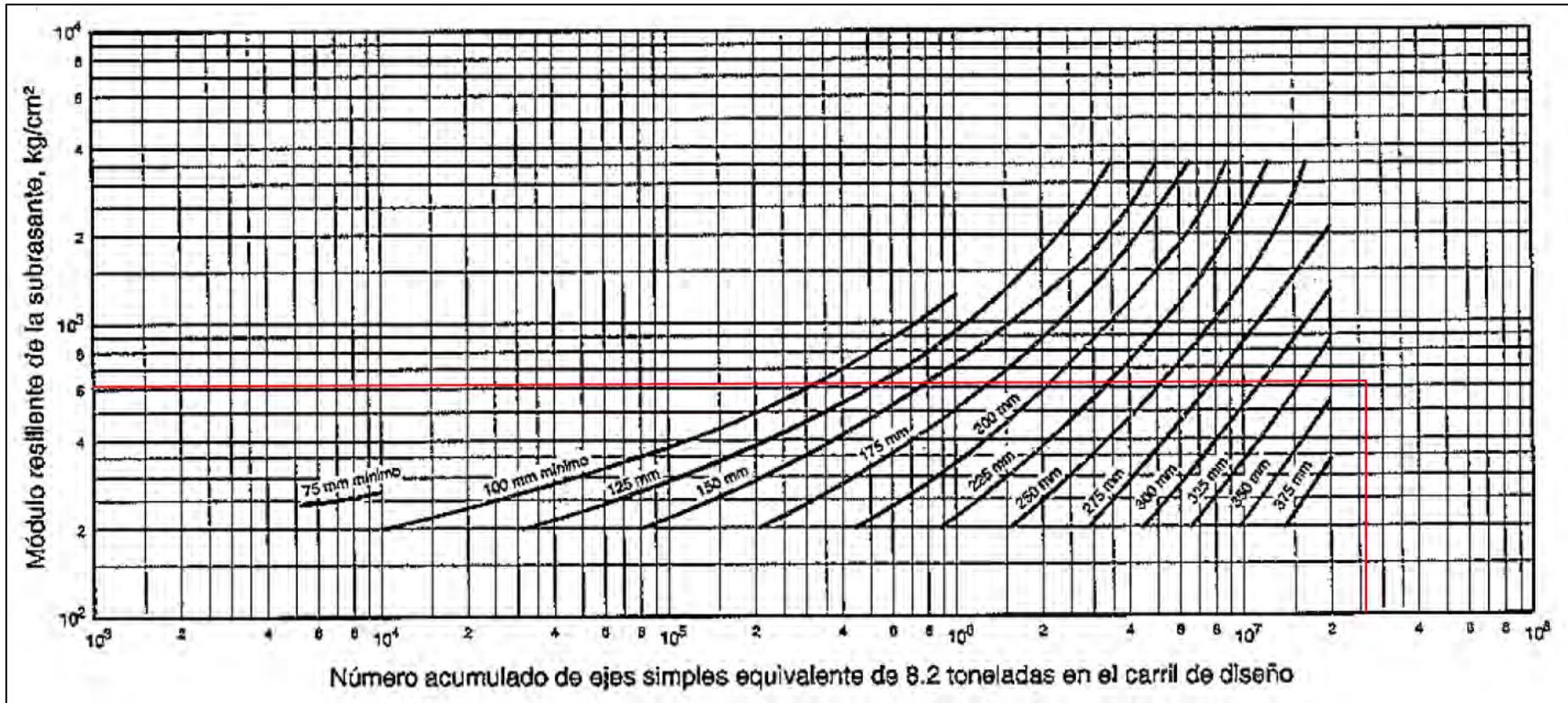
Fuente: Tomado de "Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets" por Asphalt Institute (1991)

Figura C2: Cálculo de espesor de carpeta asfáltica con base de 15 cm.



Fuente: Tomado de "Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets" por Asphalt Institute (1991)

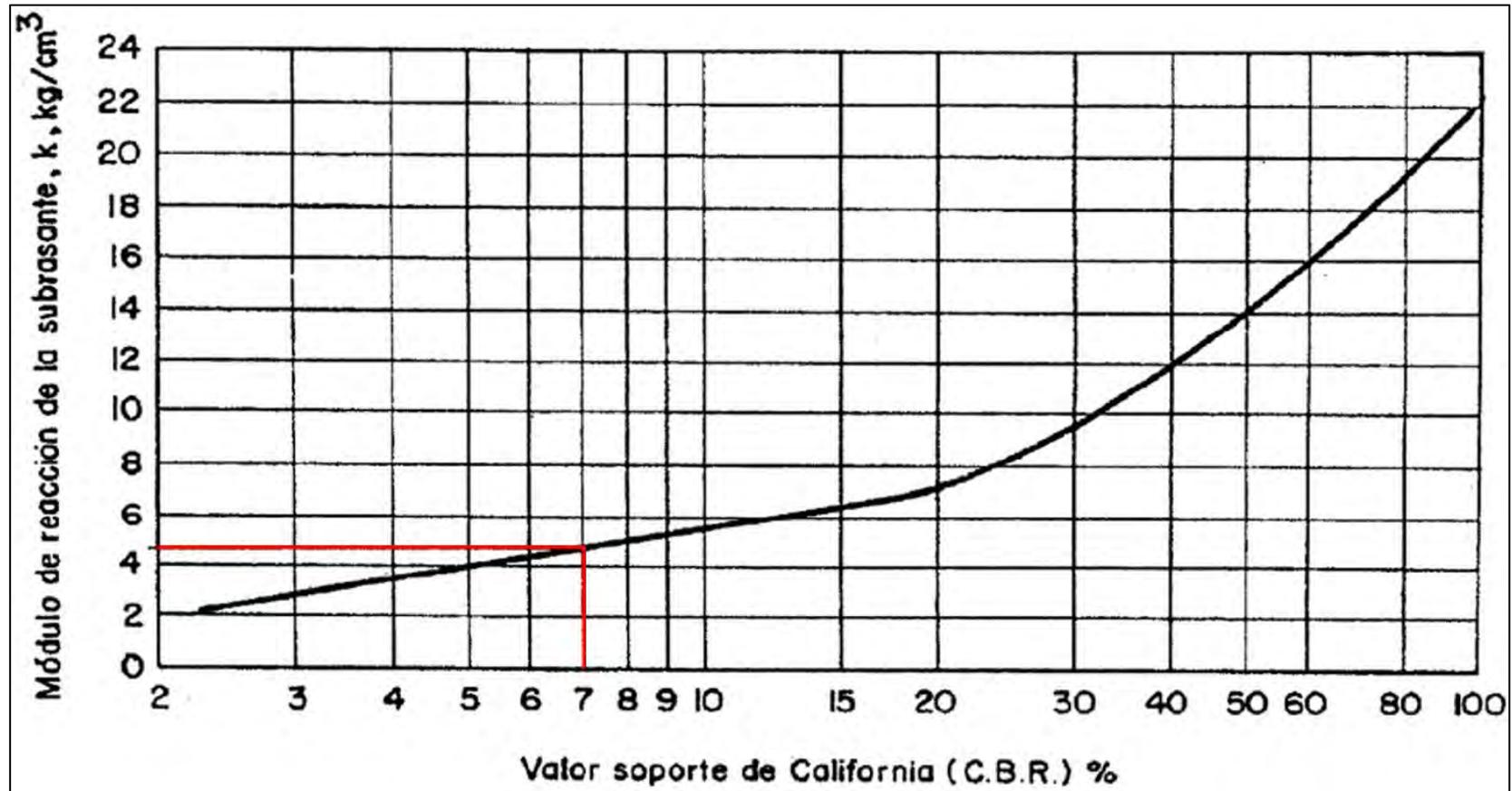
Figura C3: Cálculo de espesor de carpeta asfáltica con base de 30 cm.



Fuente: Tomado de "Thickness design: Asphalt Pavements for Highways and Streets" por Asphalt Institute (1991)

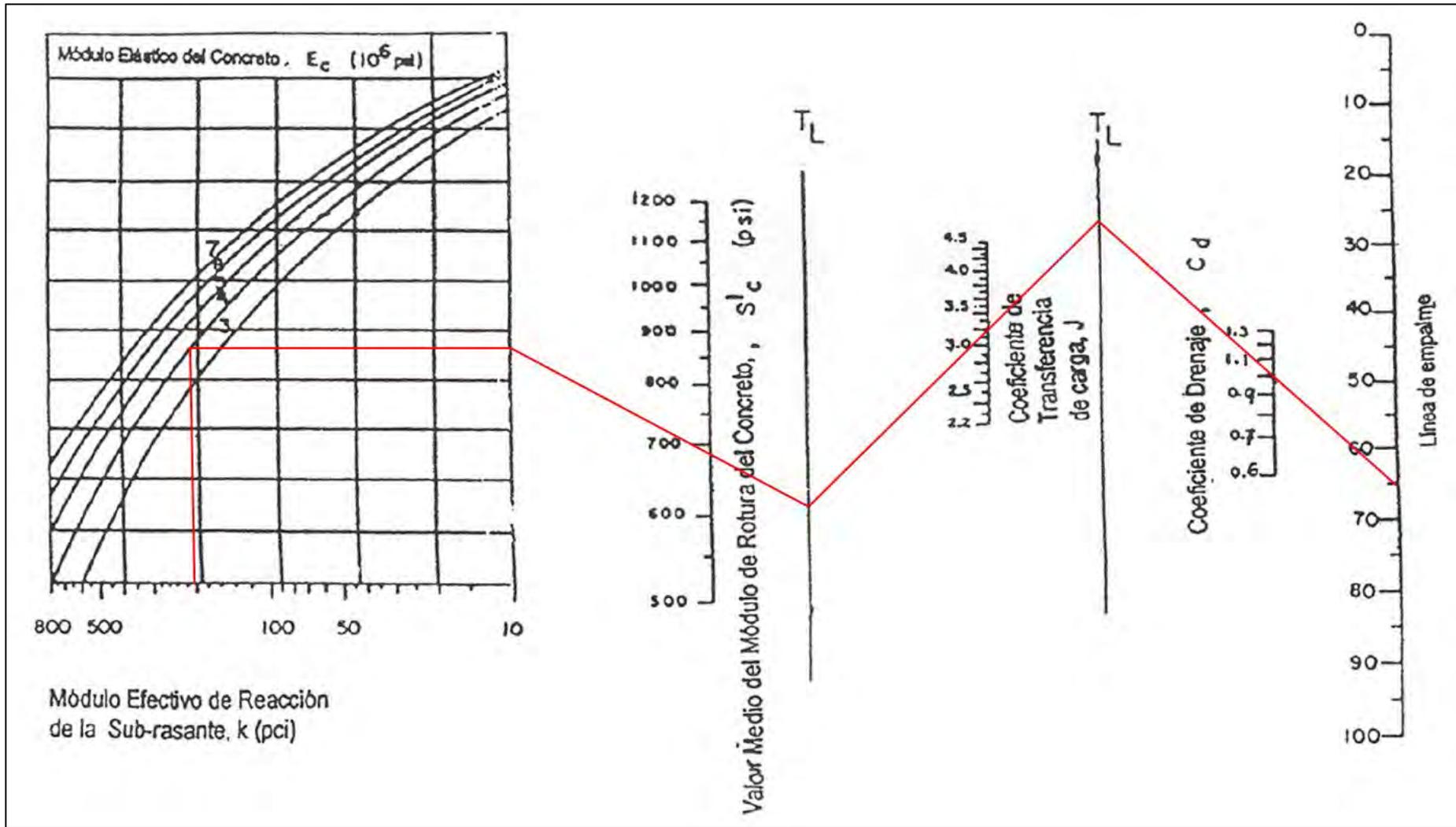
Anexo D: Diseño de Pavimento Rígido – Método AASHTO

Figura D1: Cálculo del módulo de reacción de la subrasante a partir del CBR



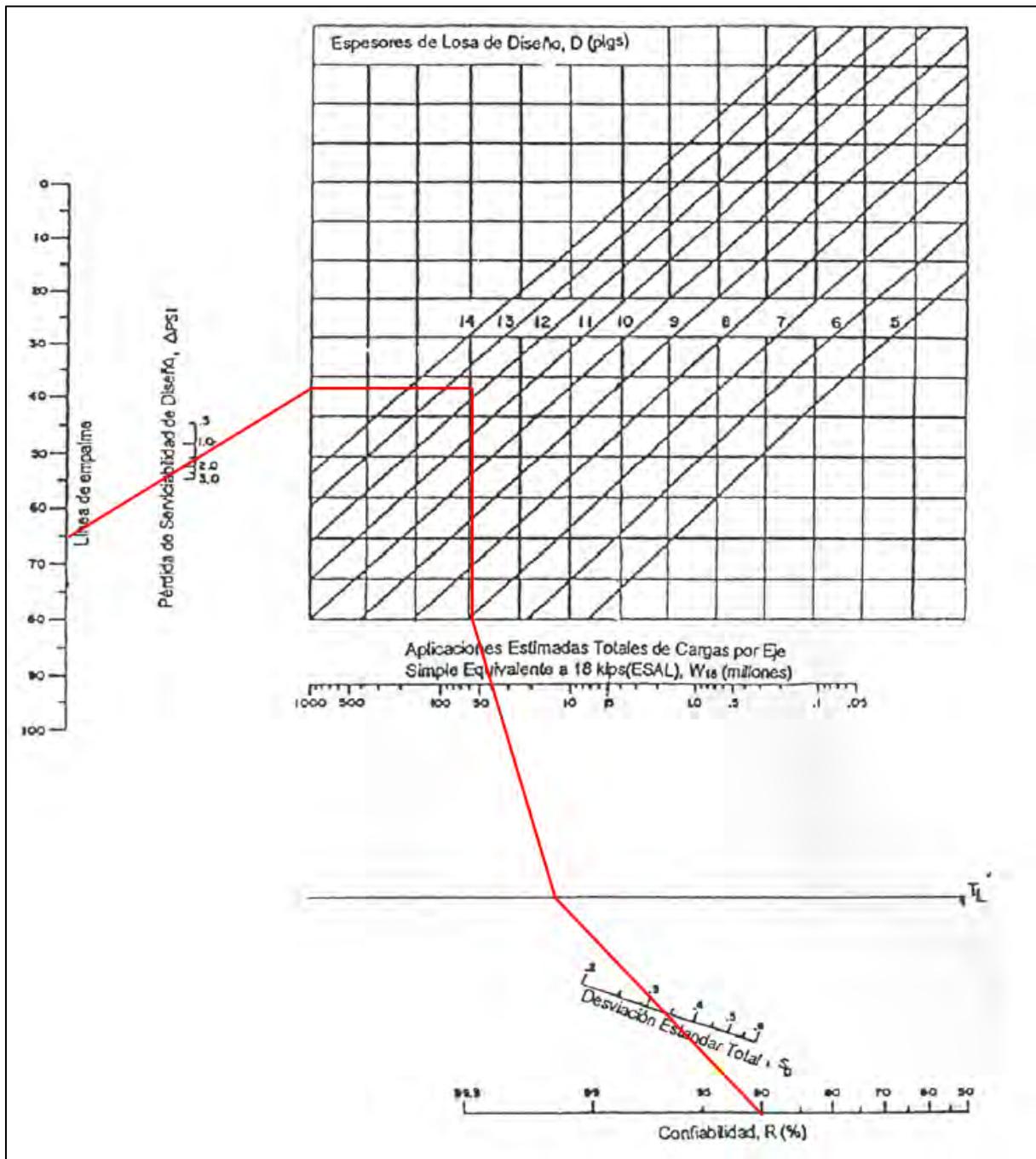
Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Figura D2: Cálculo del espesor de losa de concreto para una base de 15 cm – Parte 1



Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

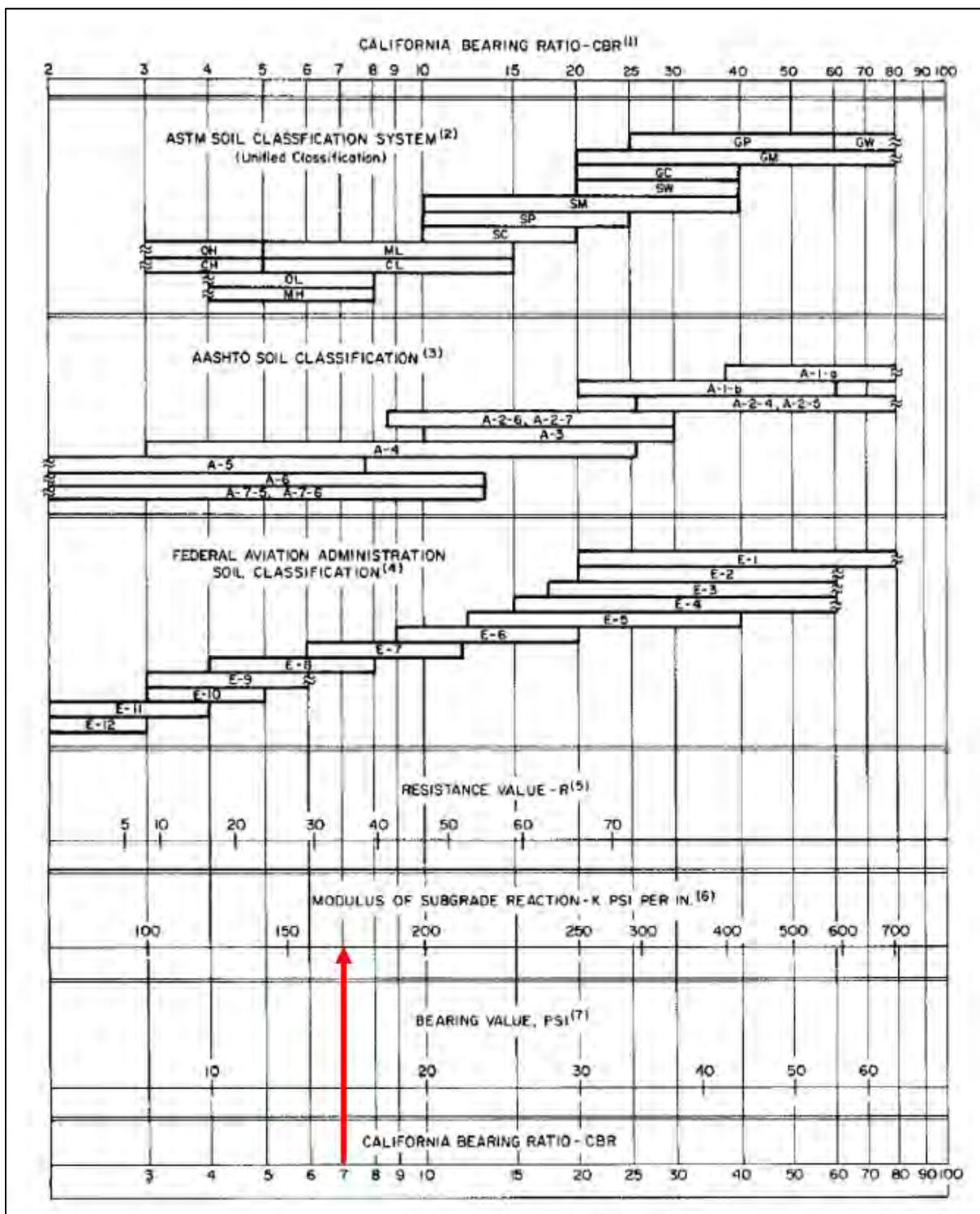
Figura D3: Cálculo del espesor de losa de concreto para una base de 15 cm – Parte 2



Fuente: Tomado de "Guide for design of pavement structures" por AASHTO (1993)

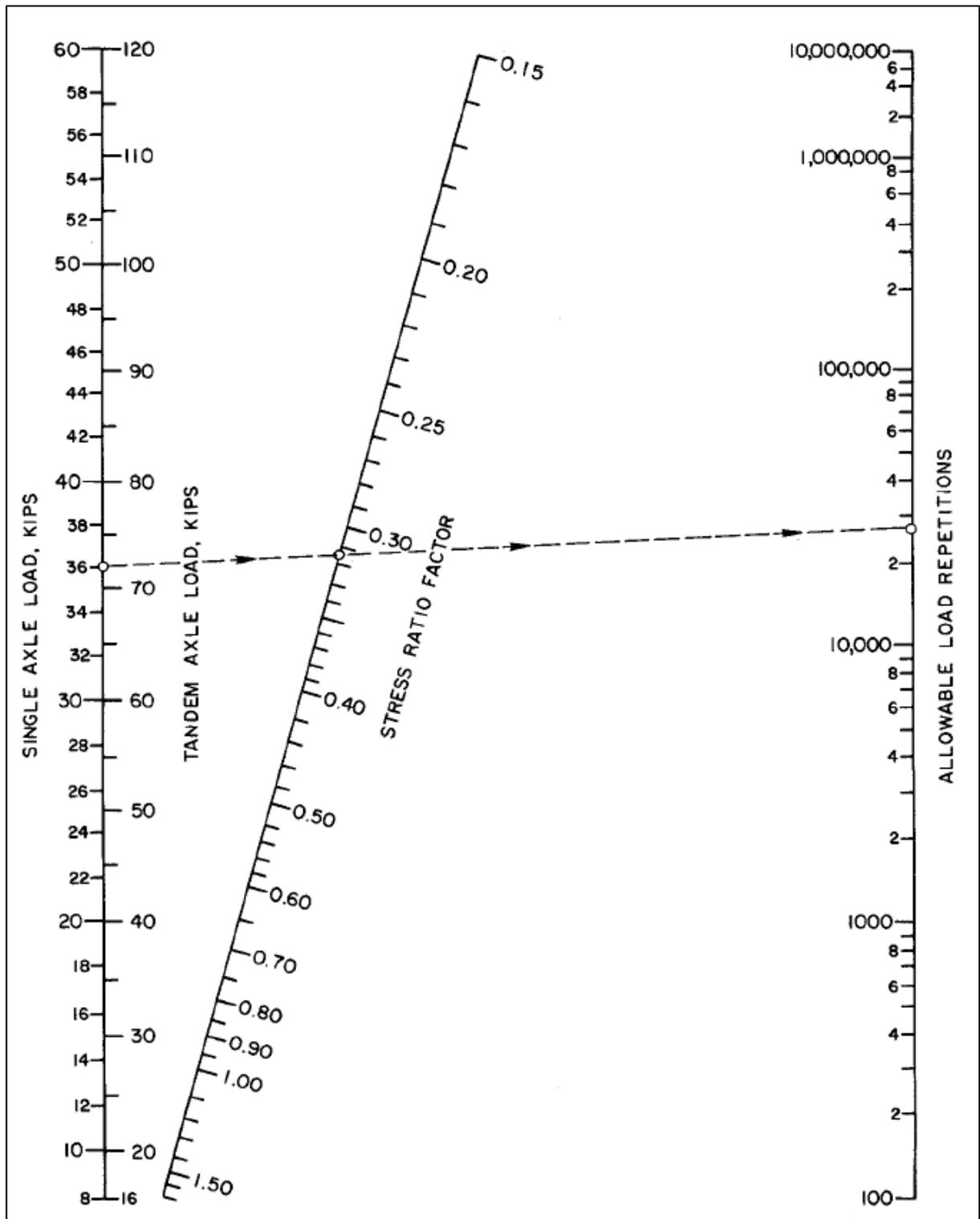
Anexo E: Diseño de Pavimento Rígido – Método PCA

Figura E1: Cálculo del módulo de reacción de la subrasante a partir del CBR



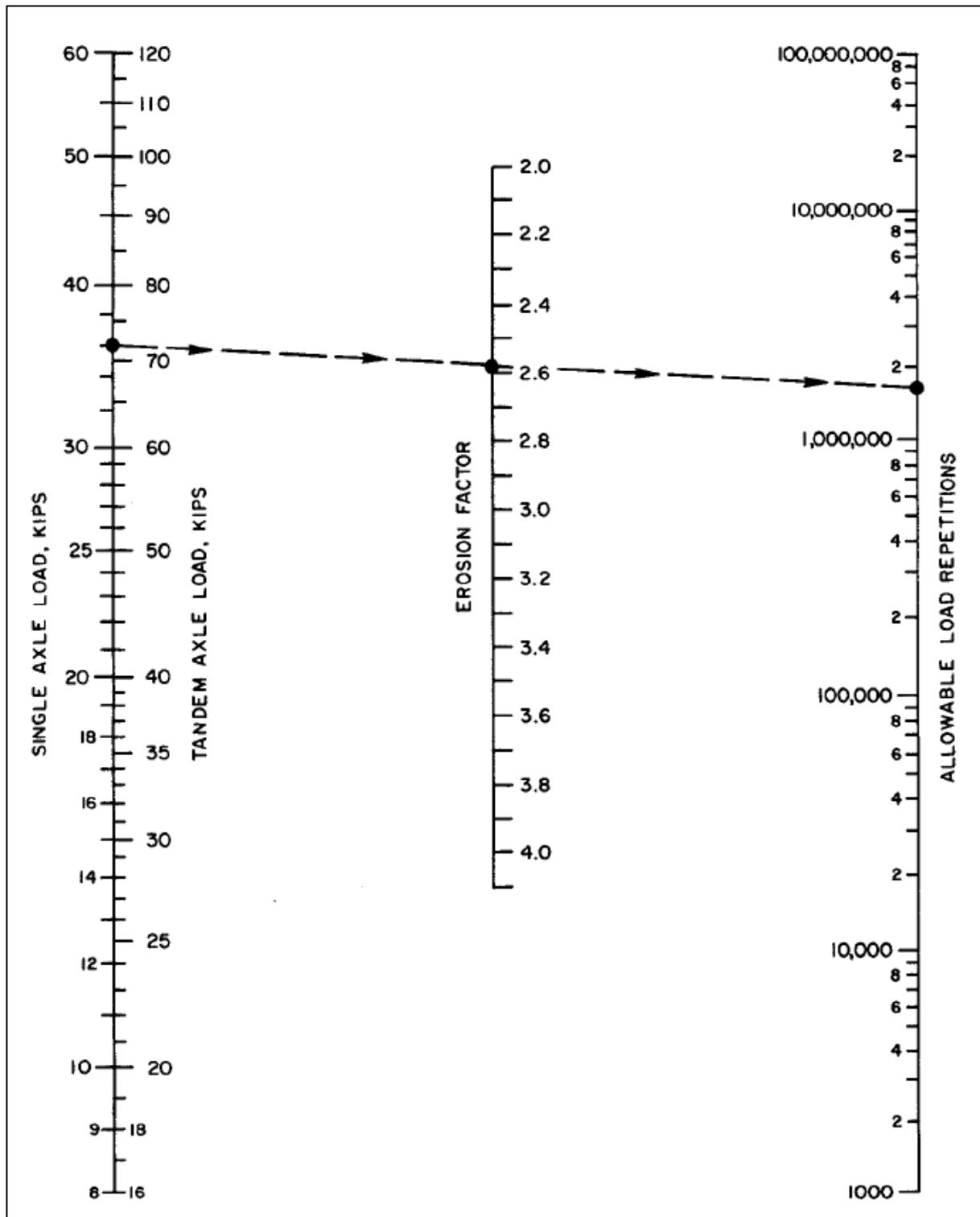
Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Figura E2: Ábaco para hallar el número repeticiones admisibles para el análisis por fatiga



Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Figura E3: Ábaco para hallar el número repeticiones admisibles para el análisis por erosión



Fuente: Tomado de Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements Packard (PCA -1984)

Anexo F: Mantenimiento de Pavimento Flexible en HDM-4



Resumen del deterioro anual del firme (Combinado)

Nombre del estudio: **Tesis Pavimento Flexible**Fecha de ejecución: **07-12-2022****Alternativa:** Pavimento Flexible con Mantenimiento**Tramo:** 53+780km-54+780km**Clase carretera:** Primaria**Tipo Firme:** Bituminoso**Longitud:** 1.0km**Ancho:** 7.2m

Año	TM IMD	ESAL millones/ ELANE	IRI ant. m/km	IRI medio m/km	Valores Medios Anuales											
					Todas fis. estr. %	Desp. áridos %	Rotura borde m2	Prof. rodera mm	No. de baches	No estruct.	Espesor árido mm	Escalón. medio mm	Juntas desconch %	No de fallos por km	Losas fisuradas %	Fisuras det. Ns/km
2023	8,369	0.9	2.3	2.1	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	5.8						
2024	8,757	0.9	2.4	2.3	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	5.8						
2025	9,162	0.9	2.5	2.4	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	5.8						
2026	9,587	1.0	2.6	2.5	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	5.8						
2027	10,030	1.0	2.7	2.6	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	5.8						
2028	10,495	1.1	2.8	2.7	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	5.8						
2029	10,981	1.1	2.9	2.9	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0	5.8						
2030	11,489	1.2	3.1	3.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	5.8						
2031	12,021	1.2	3.2	3.1	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	5.8						
2032	12,578	1.3	3.3	3.3	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	5.8						
2033	13,160	1.4	2.1	2.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	6.0						
2034	13,769	1.4	2.2	2.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	6.0						
2035	14,407	1.5	2.3	2.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	6.0						
2036	15,074	1.6	2.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	6.0						
2037	15,772	1.6	2.5	2.5	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	6.1						

2038	16,502	1.7	2.6	2.6	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	6.1		
2039	17,266	1.8	2.8	2.7	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	6.1		
2040	18,065	1.9	2.9	2.8	0.0	0.8	0.0	1.3	0.0	6.1		
2041	18,902	1.9	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	6.1		



Alternativa:	Pavimento Flexible Sin Mantenimiento	
Tramo:	53+780km-54+780km	Clase carretera: Primaria
Tipo Firme:	Bituminoso	
Longitud:	1.0km	Ancho: 7.2m

Año	TM IMD	ESAL millones/ ELANE	IRI ant. m/km	IRI medio m/km	Valores Medios Anuales											
					Todas fis. estr. %	Desp. áridos %	Rotura borde m2	Prof. rodera mm	No. de baches	No estruct.	Espesor árido mm	Escalón. medio mm	Juntas desconch %	No de fallos por km	Losas fisuradas %	Fisuras det. Ns/km
2023	8,369	0.9	2.3	2.1	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	5.8						
2024	8,757	0.9	2.4	2.3	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	5.8						
2025	9,162	0.9	2.5	2.4	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	5.8						
2026	9,587	1.0	2.6	2.5	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	5.8						
2027	10,030	1.0	2.7	2.6	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	5.8						
2028	10,495	1.1	2.8	2.7	1.0	0.0	0.0	3.3	0.0	5.8						
2029	10,981	1.1	3.0	2.9	3.9	0.0	0.0	3.4	0.0	5.8						
2030	11,489	1.2	3.1	3.0	8.9	0.0	0.0	3.6	0.0	5.7						
2031	12,021	1.2	3.3	3.2	16.2	0.0	0.0	3.8	0.0	5.7						
2032	12,578	1.3	3.5	3.4	25.9	0.0	0.0	3.9	0.0	5.6						
2033	13,160	1.4	3.8	3.6	38.3	0.0	0.0	4.1	0.0	5.5						
2034	13,769	1.4	4.3	4.0	53.0	0.0	0.0	4.3	157.1	5.4						
2035	14,407	1.5	6.1	5.2	66.5	0.0	0.0	4.5	505.1	5.2						
2036	15,074	1.6	11.5	8.8	77.4	0.0	0.0	4.8	1,190.4	5.0						
2037	15,772	1.6	16.0	13.8	85.6	0.0	0.0	5.0	2,450.9	4.9						
2038	16,502	1.7	16.0	16.0	91.4	0.0	0.0	5.2	4,678.2	4.9						
2039	17,266	1.8	16.0	16.0	90.0	0.0	0.0	5.5	8,572.0	4.8						
2040	18,065	1.9	16.0	16.0	90.0	0.0	0.0	5.8	15,385.0	4.7						
2041	18,902	1.9	16.0	16.0	90.0	0.0	0.0	6.0	27,432.3	4.6						

Gráfico Regularidad Media por Tramos

Nombre del Estudio: Tesis Pavimento Flexible

Fecha de Ejecución: 07-12-2020

Detalles del Tramo:

ID: Tramo 1

Clase de Carretera: Primaria

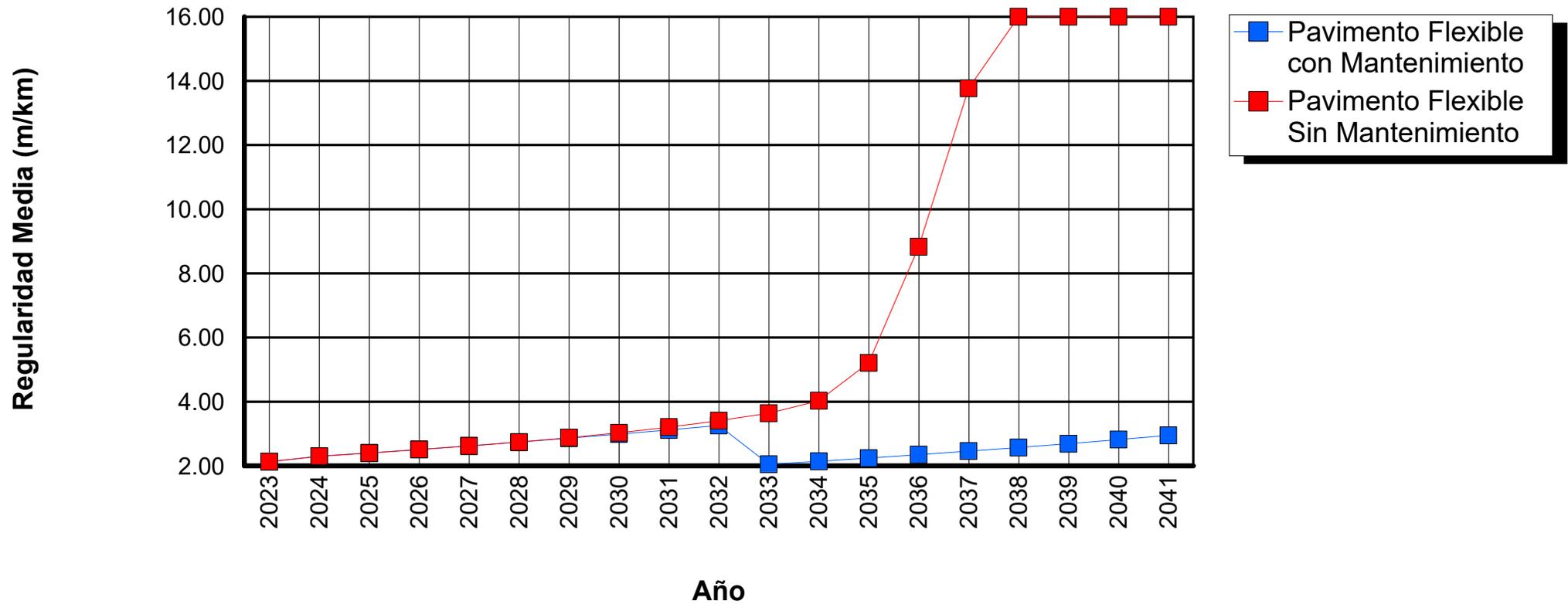
Rampa + Pendiente: 50.0 m/km

Descripción: 53+780km-54+780km

Longitud: 1.0 km

Curvatura: 180.0 %/km

Ancho: 7.2 m



Anexo G: Mantenimiento de Pavimento Rígido en HDM-4



Resumen del deterioro anual del firme (Combinado)

Nombre del estudio: **Tesis Pavimento Rigido**Fecha de ejecución: **07-12-2022****Alternativa:** Pavimento Rigido Con Mantenimiento**Tramo:** Carretera Chilete - San Pablo - Empalme Ru**Clase carretera:** Primaria**Tipo Firme:** Hormigon**Longitud:** 1.0km**Ancho:** 7.2m

Año	TM IMD	ESAL millones/ ELANE	IRI ant. m/km	IRI medio m/km	Valores Medios Anuales											
					Todas fis. estr. %	Desp. áridos %	Rotura borde m2	Prof. rodera mm	No. de baches	No estruct.	Espesor árido mm	Escalón. medio mm	Juntas desconch %	No de fallos por km	Losas fisuradas %	Fisuras det. Ns/km
2023	8,369	1.3	2.4	2.4								0.5	0.0			
2024	8,757	1.4	2.5	2.5								0.6	0.0			
2025	9,162	1.4	2.5	2.5								0.7	0.1			
2026	9,587	1.5	2.6	2.6								0.8	0.2			
2027	10,030	1.6	2.7	2.7								0.9	0.3			
2028	10,495	1.6	2.7	2.7								1.0	0.4			
2029	10,981	1.7	2.8	2.8								1.1	0.4			
2030	11,489	1.8	2.9	2.9								1.2	0.5			
2031	12,021	1.9	2.9	2.9								1.3	0.6			
2032	12,578	2.0	3.0	3.0								1.3	0.7			
2033	13,160	2.1	3.1	3.1								1.4	0.8			
2034	13,769	2.2	3.1	3.1								1.5	0.9			
2035	14,407	2.3	3.2	3.2								1.6	1.0			
2036	15,074	2.4	3.3	3.3								1.7	1.0			
2037	15,772	2.5	3.3	3.3								1.8	1.1			

2038	16,502	2.6	3.4	2.7			0.9	1.2
2039	17,266	2.7	2.5	2.5			0.6	1.3
2040	18,065	2.8	2.6	2.6			0.8	1.4
2041	18,902	3.0	2.7	2.7			0.9	1.5



Alternativa:	Pavimento Rigido Sin Mantenimiento			
Tramo:	Carretera Chilete - San Pablo - Empalme Ru	Clase carretera:	Primaria	
Tipo Firme:	Hormigon			
Longitud:	1.0km	Ancho:	7.2m	

Año	TM IMD	ESAL millones/ ELANE	IRI ant. m/km	IRI medio m/km	Valores Medios Anuales											
					Todas fis. estr. %	Desp. áridos %	Rotura borde m2	Prof. rodera mm	No. de baches	No estruct.	Espesor árido mm	Escalón. medio mm	Juntas desconch %	No de fallos por km	Losas fisuradas %	Fisuras det. Ns/km
2023	8,369	1.3	2.4	2.2								0.5	0.0			
2024	8,757	1.4	2.5	2.2								0.6	0.0			
2025	9,162	1.4	2.5	2.5								0.7	0.1			
2026	9,587	1.5	2.6	2.6								0.8	0.2			
2027	10,030	1.6	2.7	2.6								0.9	0.3			
2028	10,495	1.6	2.7	2.7								1.0	0.4			
2029	10,981	1.7	2.8	2.8								1.1	0.5			
2030	11,489	1.8	2.9	2.8								1.2	0.7			
2031	12,021	1.9	2.9	2.9								1.3	0.9			
2032	12,578	2.0	3.0	3.0								1.3	1.1			
2033	13,160	2.1	3.1	3.0								1.4	1.3			
2034	13,769	2.2	3.2	3.1								1.5	1.6			
2035	14,407	2.3	3.2	3.2								1.6	1.9			
2036	15,074	2.4	3.3	3.3								1.7	2.1			
2037	15,772	2.5	3.4	3.3								1.8	2.5			
2038	16,502	2.6	3.5	3.4								1.9	2.8			
2039	17,266	2.7	3.5	3.5								2.0	3.2			
2040	18,065	2.8	3.6	3.6								2.1	3.5			
2041	18,902	3.0	3.7	3.7								2.2	3.9			

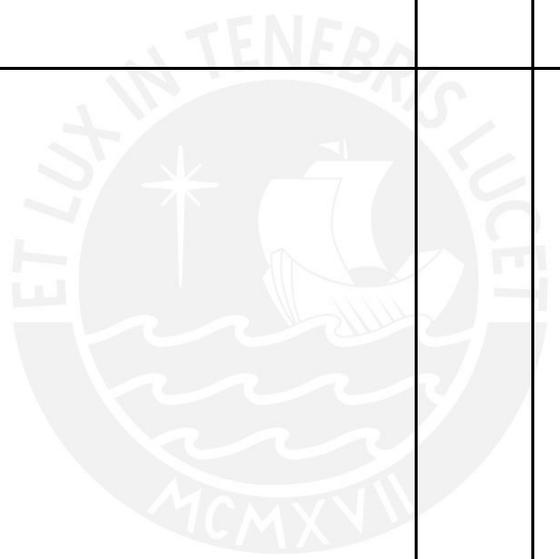


Gráfico Regularidad Media por Tramos

Nombre del Estudio: **Tesis Pavimento Rigido**

Fecha de Ejecución: **07-12-2022**

Detalles del Tramo:

ID: **Tramo 1**

Clase de Carretera: **Primaria**

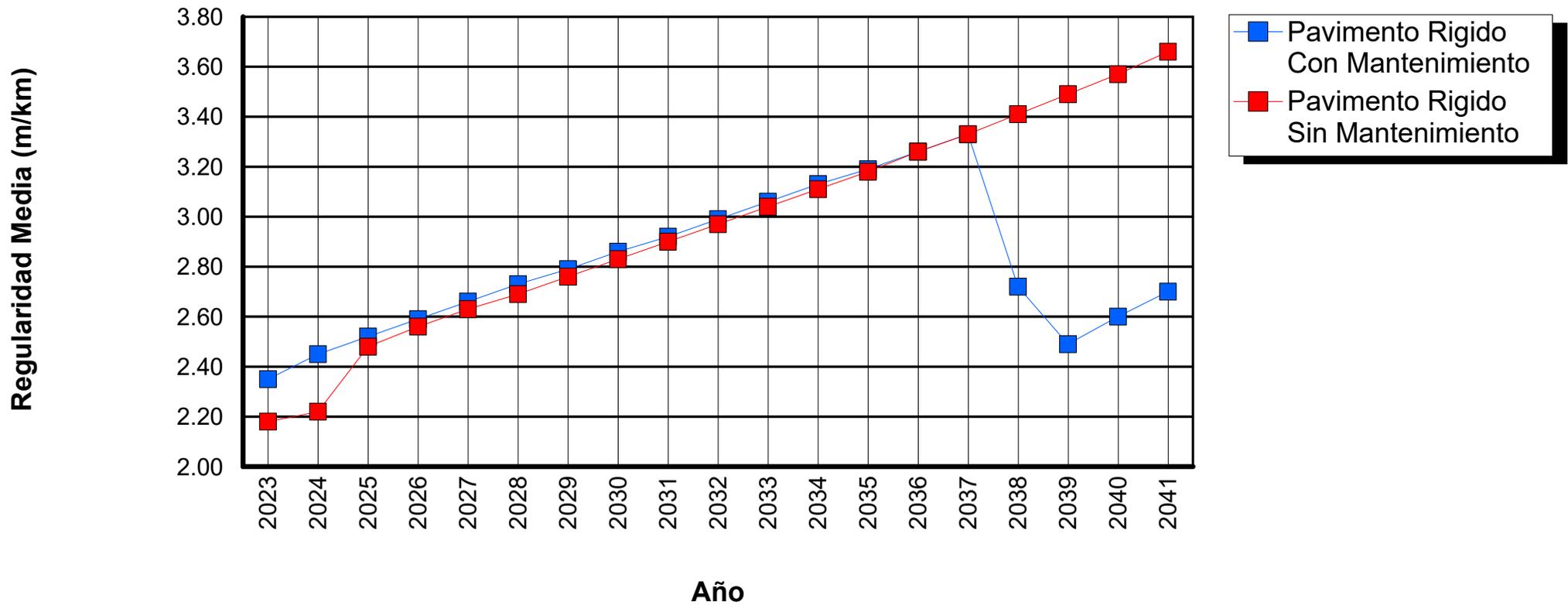
Rampa + Pendiente: **50.0 m/km**

Descripción: **Carretera Chilete - San Pablo - Empalme Ruta 3N**

Longitud: **1.0 km**

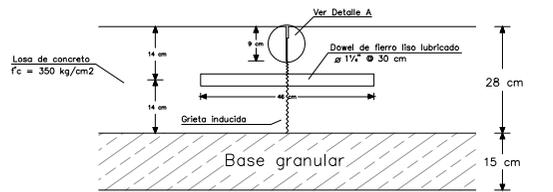
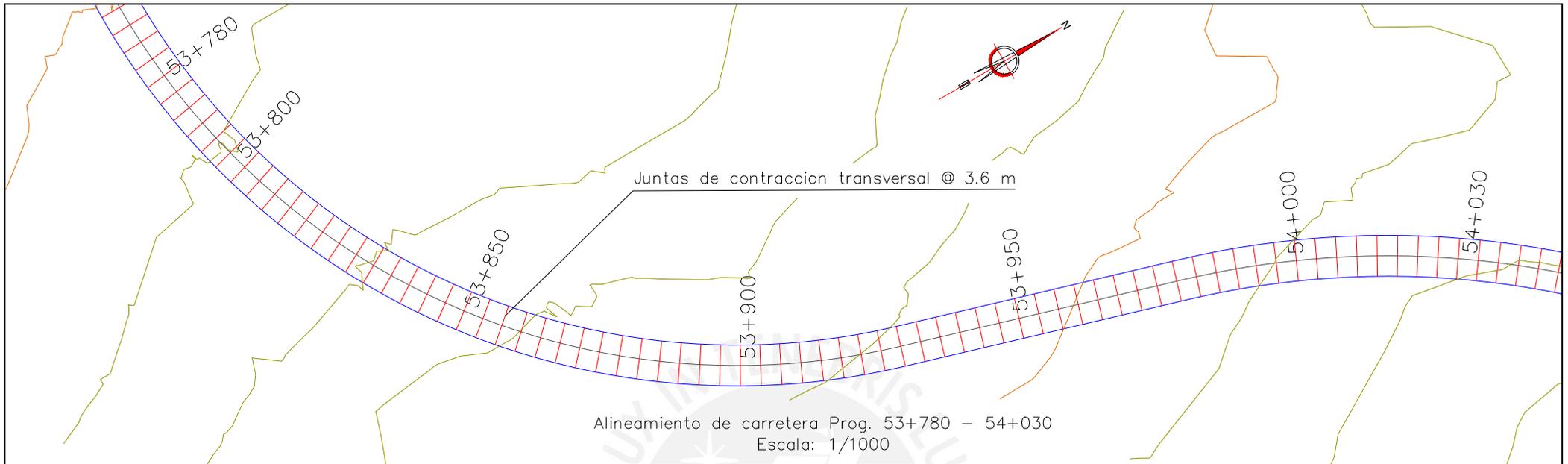
Curvatura: **180.0 °/km**

Ancho: **7.2 m**

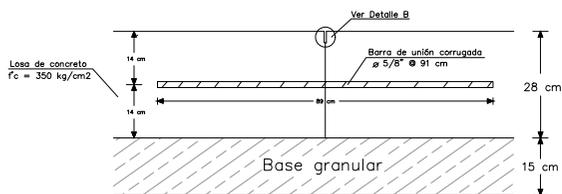


Anexo H: Planos de Diseño de Juntas

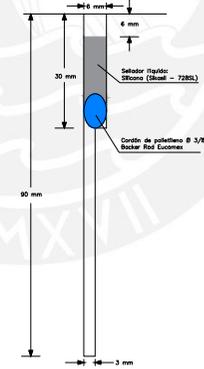




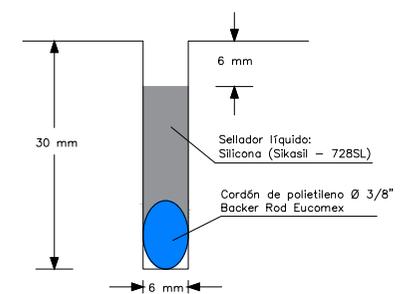
Junta transversal de contracción/construcción Esc:1/20



Junta longitudinal de contracción/construcción Esc:1/20



Detalle A Esc:1/2



Detalle B Esc:1/1



PUCP

FACULTAD DE CIENCIAS
E INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DEL PAVIMENTO DE LA
CARRETERA CHILETE - SAN
PABLO - EMPALME RUTA 3 N
DEL KM. 53+780 AL KM. 54+780

Asesor:
Ing. Juan Pablo Zamora

Tesista:
José Ipanaqué López

Código:
20134693

OBSERVACIONES:

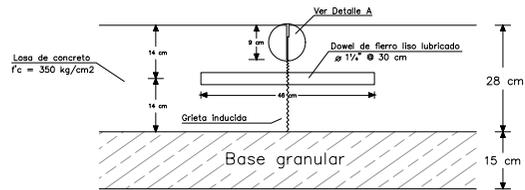
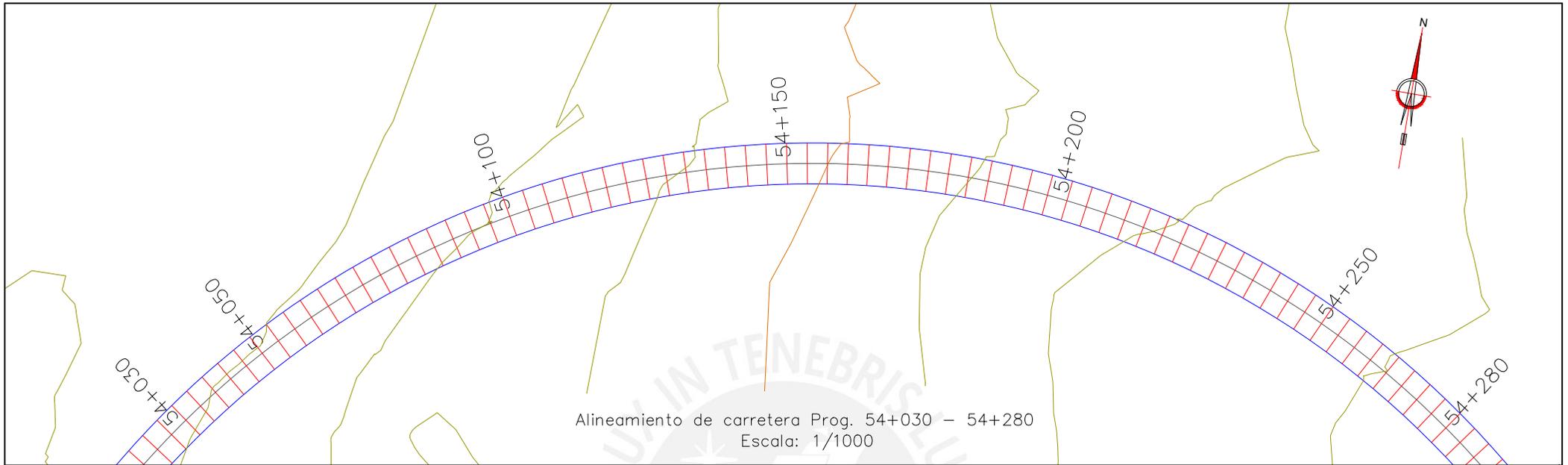
Plano:
DETALLE
DE
JUNTAS

N° de plano:
DJ-01

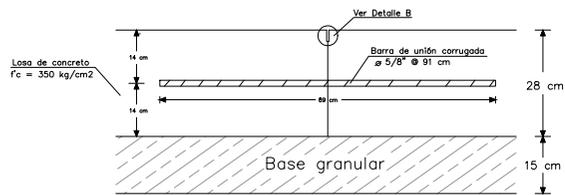
Lámina:
1

Escala:
INDICADA

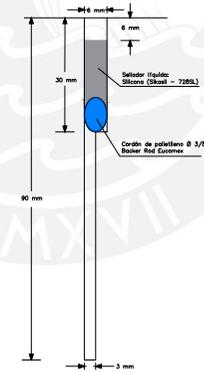
Anexo:
H



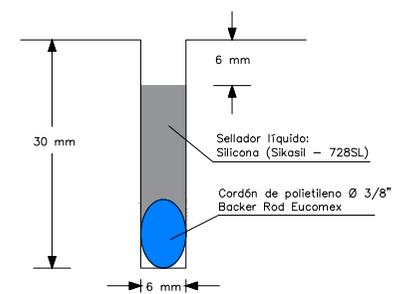
Junta transversal de contracción/construcción Esc:1/20



Junta longitudinal de contracción/construcción Esc:1/20



Detalle A Esc:1/2



Detalle B Esc:1/1



PUCP

FACULTAD DE CIENCIAS
E INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DEL PAVIMENTO DE LA
CARRETERA CHILETE - SAN
PABLO - EMPALME RUTA 3 N
DEL KM. 53+780 AL KM. 54+780

Asesor:
Ing. Juan Pablo Zamora

Tesista:
José Ipanaqué López

Código:
20134693

OBSERVACIONES:

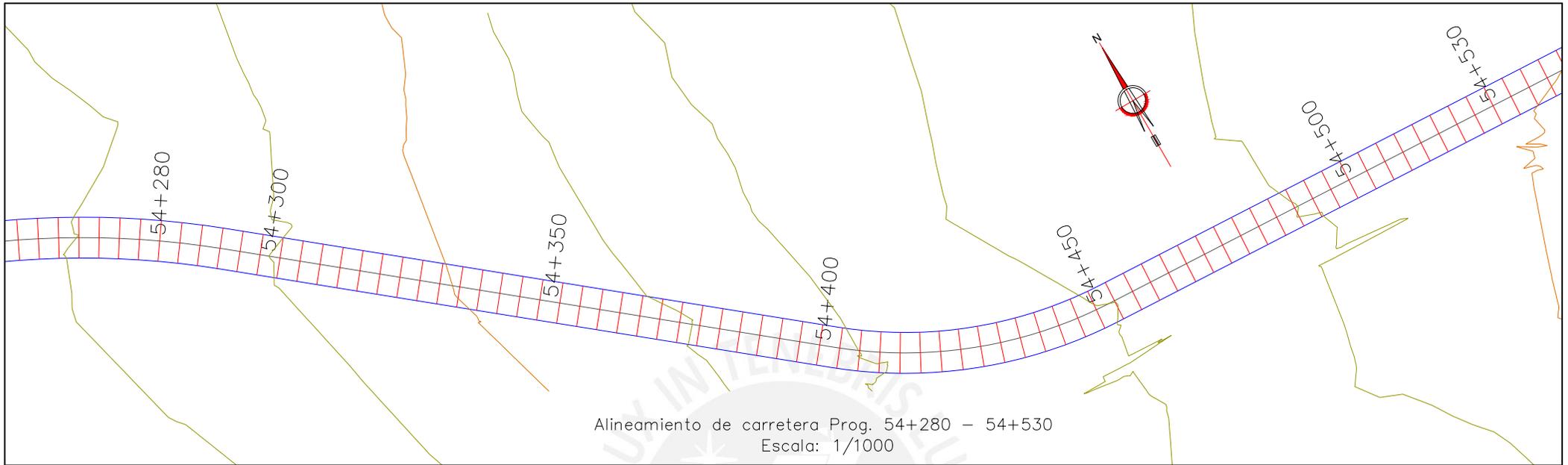
Plano:
DETALLE
DE
JUNTAS

N° de plano:
DJ-02

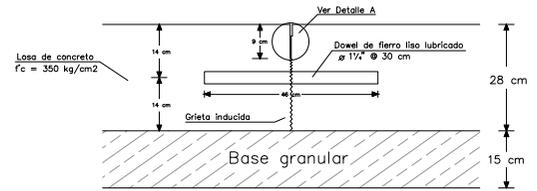
Lámina:
2

Escala:
INDICADA

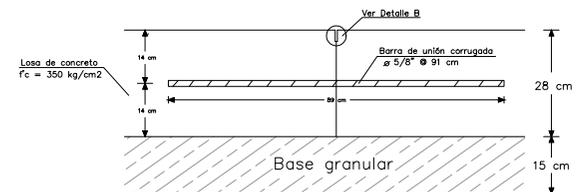
Anexo:
H



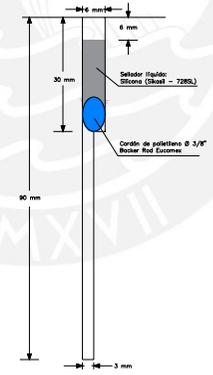
Alineamiento de carretera Prog. 54+280 - 54+530
Escala: 1/1000



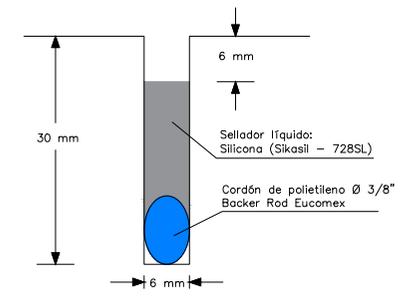
Junta transversal de contracción/construcción Esc:1/20



Junta longitudinal de contracción/construcción Esc:1/20



Detalle A Esc:1/2



Detalle B Esc:1/1



PUCP

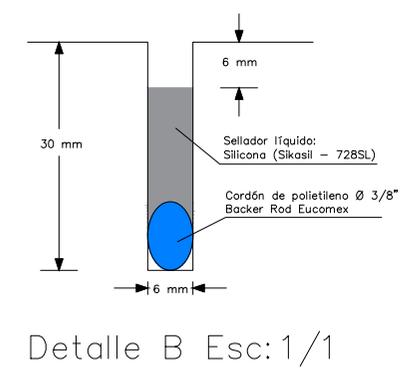
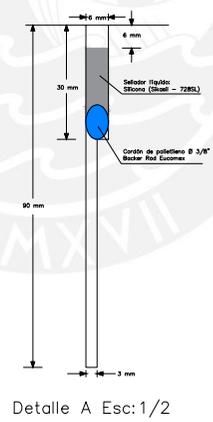
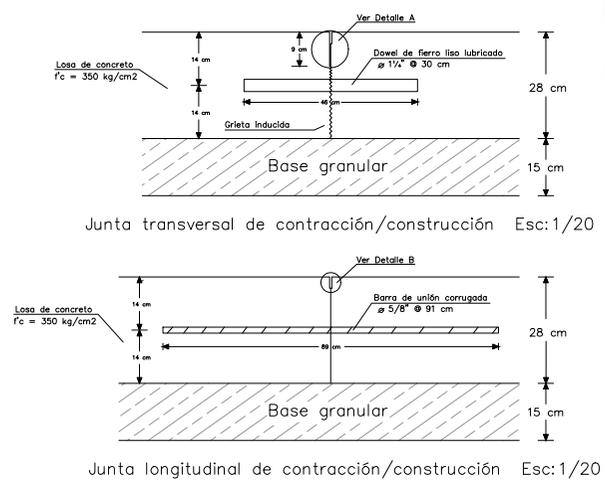
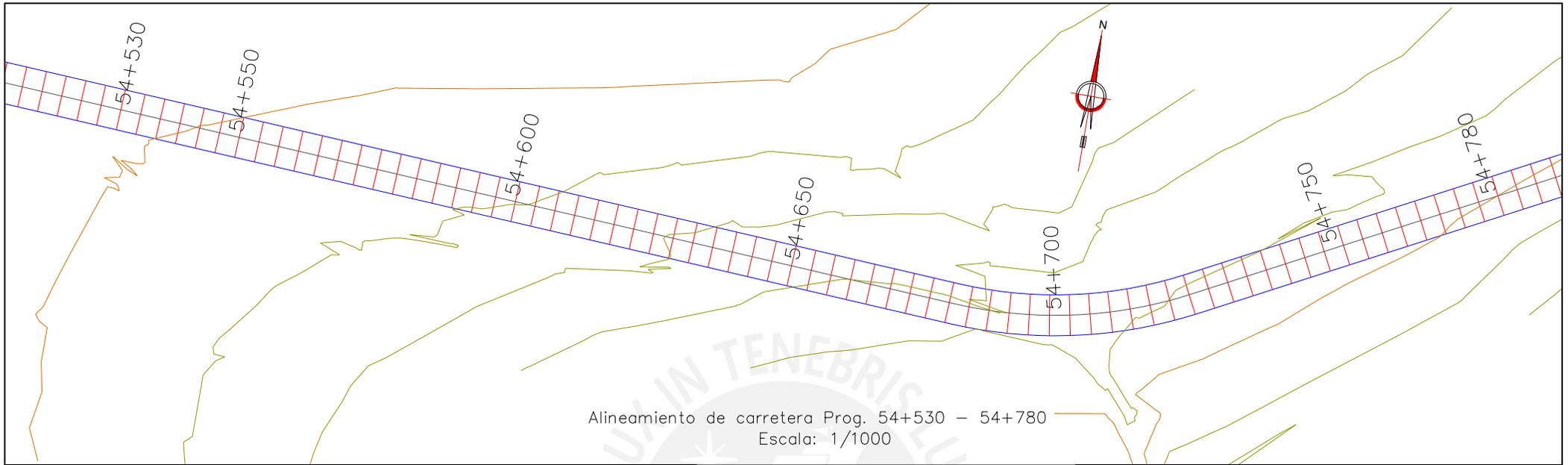
FACULTAD DE CIENCIAS
E INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
DISEÑO DEL PAVIMENTO DE LA
CARRETERA CHILETE - SAN
PABLO - EMPALME RUTA 3 N
DEL KM. 53+780 AL KM. 54+780

Asesor:	Ing. Juan Pablo Zamora
Tesista:	José Ipanaqué López
Código:	20134693

OBSERVACIONES:	

Plano:
DETALLE
DE
JUNTAS

N° de plano:	DJ-03	Lámina:	3
Escala:	INDICADA	Anexo:	H



PUCP

FACULTAD DE CIENCIAS
E INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
DISEÑO DEL PAVIMENTO DE LA
CARRETERA CHILETE - SAN
PABLO - EMPALME RUTA 3 N
DEL KM. 53+780 AL KM. 54+780

Asesor:
Ing. Juan Pablo Zamora

Tesista:
José Ipanaqué López

Código:
20134693

OBSERVACIONES:

Plano:
DETALLE
DE
JUNTAS

N° de plano:
DJ-04

Escala:
INDICADA

Lámina:
4

Anexo:
H