

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Instituto de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa de Maestría en Ingeniería Civil



**Diseño con Pavimento de Larga Duración del tramo
carretero Ciudad Juárez - Villa Ahumada, Chihuahua**

Documento presentado en requerimiento parcial para obtener el grado de Maestría
en Ingeniería Civil

Autor: **Marina Isabel Mendoza Fong**

Director: **Abraham Leonel López León**

Ciudad Juárez, Chih., a 11 de diciembre de 2019

Revisión del Documento de Proyecto de Titulación por Director del Proyecto

Después de haber revisado los aspectos técnicos, la estructura y formato del documento en general con título “*Diseño con Pavimento de Larga Duración del tramo carretero Ciudad Juárez - Villa Ahumada, Chihuahua*” que presenta la C. Marina Isabel Mendoza Fong, considero que se cumplen los requerimientos necesarios para que se proceda a su evaluación final ante el comité evaluador que designe el Comité Académico del Programa de Maestría en Ingeniería Civil.

ATENTAMENTE

Dr. Abraham Leonel López León
Ciudad Juárez, Chih a 11 de diciembre de
2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Los miembros del sínodo, nombrado por el Comité Académico del Programa de Maestría en Ingeniería Civil, habiendo realizado la evaluación del proyecto de titulación “*Diseño con Pavimento de Larga Duración del tramo carretero Ciudad Juárez - Villa Ahumada, Chihuahua*” que presenta la C. Marina Isabel Mendoza Fong, con matrícula 175398, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Civil, manifiesta que ha sido aprobado por

Director

Dr. Abraham Leonel López León

Evaluador

Mtro. Arturo Marrufo Meléndez

Evaluador

Mtro. Rubén Iván Alvarado Venegas

Ciudad Juárez, Chih., a 11 de diciembre de 2019

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un pavimento de larga duración con los programas IMT-PAVE 3.0, Per Road 4.4, Street Pave 12 y WinPAS 12 para el tramo carretero Ciudad Juárez (de la glorieta del km 20) - Villa Ahumada para comprobar los beneficios económicos a largo plazo comparados contra el costo de la reconstrucción del tramo por medio de un análisis del costo del ciclo de vida. Para lograrlo se obtuvieron datos del tránsito, clima y materiales de la región. Se analizaron y compraron secciones de pavimentos de larga duración de Texas, Nuevo México y Ohio de las cuales ha sido estudiado su desempeño en campo. El espesor del concreto asfáltico del diseño final es de 28 cm (11 in) y el espesor total de la estructura es de 53 cm (21 in) diseño realizado con el IMT-PAVE 3.0, programa cuyas características se adaptaron mejor a este proyecto. Se utilizaron como criterios de desempeño para el diseño del pavimento el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente. Con el análisis del costo del ciclo de vida se comprobó que los pavimentos de larga duración respetan un beneficio del 56% respecto a la reconstrucción con pavimento tradicional.

Palabras clave: pavimento de larga duración, agrietamiento por fatiga, deformación permanente, análisis del costo de ciclo de vida.

Contenido

Índice de figuras	viii
Índice de tablas.....	ix
Simbología	xii
Capítulo 1. Introducción	14
1.1 Antecedentes	15
1.1.1 Pavimentos de Larga Duración	15
1.1.2 Análisis del Costo del Ciclo de Vida	26
1.2 Planteamiento del problema	27
1.2.1 Área de estudio	28
1.2.2 Alcance	29
1.3 Objetivos	29
1.3.1 Objetivo general	29
1.3.2 Objetivos específicos	29
1.4 Justificación	29
2 Marco teórico.....	30
2.1 Tipos de pavimentos	30
2.1.1 Pavimentos de Larga Duración	30
2.2 Diseño de pavimentos.....	35
2.3 Factores de diseño	37
2.3.1 Tránsito y cargas.....	37
2.3.2 Caracterización de materiales	38
2.3.3 Clima	39
2.3.4 Criterios de falla	39
2.4 Programas de diseño.....	41
2.5 Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCCA)	45
3 Metodología.....	47
3.1 Obtención de datos necesarios para elaborar el diseño del PLD mediante el uso de varios programas ..	48
3.1.1 Tránsito.....	48
3.1.2 Materiales.....	51
3.1.3 Clima	53
3.2 Diseño de PDL	53
3.2.1 IMT-PAVE 3.0.....	53
3.2.2 Per Road 4.4.....	54
3.2.3 Street Pave.....	54
3.2.4 WinPAS	55
3.3 Comparativo de costos del PLD y costos de las reparaciones del tramo mediante el LCCA.....	55

4	Resultados.....	58
4.1	Datos para el diseño.....	58
4.1.1	Tránsito.....	61
4.1.2	Materiales.....	67
4.1.3	Clima.....	72
4.2	Diseño del PLD	75
4.2.1	IMT-PAVE 3.0.....	77
4.2.2	Per Road 4.4	79
4.2.3	Street Pave 12	81
4.2.4	WinPas 12.....	82
4.3	Comparativo de costos del PLD y costos de las reparaciones del tramo mediante el LCCA	86
5	Discusiones.....	96
5.1	Datos para el diseño.....	96
5.1.1	Tránsito.....	96
5.1.2	Materiales.....	98
5.1.3	Clima.....	99
5.2	Diseño final del PLD.....	100
5.3	Comparativo de costos del PLD y costos de las reparaciones del tramo mediante el LCCA	102
6	Conclusiones	104
6.1	Conclusiones del proyecto	104
6.2	Trabajo futuro	105
	Referencias bibliográficas.....	106
	Anexo A. Iteraciones realizadas con los programas IMT-PAVE 3.0 y Per Road 4.4	113
	Anexo B. Costos para el usuario	128
	Anexo C. Factores equivalentes de carga del Instituto del Asfalto.....	134
	Anexo D. Diseño de PLD de la carretera Chihuahua – Madera	136

Índice de figuras

Figura 1. Diseños opcionales de PLD para Nuevo México (Tarefder et. al, 2012).	22
Figura 2. Tramo carretero identificado con el número índice 19 (Datos Viales SCT, DGST 2017).	28
Figura 3. Pantalla de entrada del programa IMT-PAVE 3.0	41
Figura 4. Espectros de carga del programa IMT-PAVE 3.0 con el nivel de alta sobrecarga.....	42
Figura 5. Pantalla para ingresar al programa Per Road 4.0	43
Figura 6. Pantallas para ingresar la información del tránsito en el programa Per Road 4.0.	43
Figura 7. Pantalla para iniciar con la introducción de datos en el Street Pave.	44
Figura 8. Pantalla de inicio del WinPAS	45
Figura 9. Metodología general	47
Figura 10. TDPA por tipo de vehículo.	63
Figura 11. Gráfica con los TDPA por tipo de vehículo del año 2006 al 2011.	63
Figura 12. Modelos de regresión para los datos faltantes del año 2012.	64
Figura 13. Modelos de regresión lineal para los factores de equivalencia de carga del eje con valores del Instituto del Asfalto.....	65
Figura 14. Curva granulométrica de la muestra 1 de la base de la estructura actual del pavimento.	68
Figura 15. Curva granulométrica de la muestra 2 de la base de la estructura actual del pavimento.	69
Figura 16. Curva granulométrica de la muestra 1 de mezcla asfáltica de la estructura actual del pavimento, que muestra los límites granulométricos para mezclas asfálticas de granulometría densa establecidos en la norma N-CMT-4-04/17.	71
Figura 17. Curva granulométrica de la muestra 2 de mezcla asfáltica de la estructura actual del pavimento, que muestra los límites granulométricos para mezclas asfálticas de granulometría densa establecidos en la norma N-CMT-4-04/17.	71
Figura 18. Pantalla de entrada de datos de tránsito para el programa IMT-PAVE 3.0.....	77
Figura 19. Pantalla del análisis espectral del programa IMT-PAVE 3.0	77
Figura 20. Pantalla de entrada de datos estructurales del programa Per Road 4.0.....	79
Figura 21. Pantalla de salida de datos del programa Per Road 4.0	79
Figura 22. Pantalla con los datos de tránsito solicitados por el programa Street Pave.	82
Figura 23. Pantalla con los datos de salida después de correr el diseño con el programa Street Pave.	82
Figura 24. Pantalla con los datos del tránsito del programa WinPAS.	83
Figura 25. Pantalla con los datos de salida arrojados por el programa WinPAS.	84
Figura 26. Gráfica comparativa de los VPN únicamente considerando los costos para la agencia.....	93
Figura 27. Grafica comparativa del VPN incluyendo los costos para el usuario.....	94

Índice de tablas

Tabla 1. Nueva estructura propuesta por el departamento de transporte de Texas para el diseño de PLD.	19
Tabla 2. Sección estructural de PLD utilizada en Nuevo México.	20
Tabla 3. Información del diseño estructural de pavimentos de larga duración.	21
Tabla 4. Criterios de desempeño para pavimentos perpetuos.	21
Tabla 5. Características de las estructuras de prueba analizadas en Ohio.	23
Tabla 6. Módulos de elasticidad y criterios de desempeños utilizados con el programa Per Road en Ohio.	23
Tabla 7. Presupuesto federal asignado al estado de Chihuahua para conservación de tramos carreteros.	27
Tabla 8. Requisitos, componentes y metas de un pavimento a largo plazo.	31
Tabla 9. Valores del FEL utilizados por diversos autores.	33
Tabla 10. Distribución limitante refinada y relaciones máximas de fatiga a la deformación por tensión prevista.	33
Tabla 11. Recomendaciones de tipos de mezclas para pavimentos de larga duración.	34
Tabla 12. Criterios de diseño o valores umbral recomendados para juzgar la aceptabilidad de un diseño de prueba de la MEPDG.	36
Tabla 13. Tipos de fallas para pavimentos flexibles.	39
Tabla 14. Clasificación SUCS.	52
Tabla 15. Factores del Costo de Operación Base para terreno sensiblemente plano.	56
Tabla 16. Indicadores del estado de la superficie de rodamiento.	56
Tabla 17. Datos de entrada y de accesibilidad para cada programa de diseño de pavimentos.	59
Tabla 18. Ventajas y desventajas de los programas utilizados para el diseño del PLD.	60
Tabla 19. TDPA del tramo de estudio de los años 2003 al 2018.	61
Tabla 20. Cálculo de la tasa de crecimiento (%) por promedios.	62
Tabla 21. Factores de equivalencia de carga del eje (EALF).	65
Tabla 22. Cálculo de ejes equivalentes para el proyecto.	66
Tabla 23. Condiciones actuales del pavimento, de acuerdo con lo estipulado en la metodología de la guía AASHTO 1993 (niveles de humedad cercanos a la saturación entre 1% y 5%, confiabilidad $R = 90\%$, desviación estándar normal Z_r de -1.28 y una desviación estándar S_0 de 0.45, valor recomendado para pavimentos flexibles).	66
Tabla 24. Condiciones basadas en una estructura típica de Texas para PLD, de acuerdo con lo estipulado en la metodología de la guía AASHTO 1993 (niveles de humedad cercanos a la saturación entre 1% y 5%, confiabilidad $R = 90\%$, desviación estándar normal Z_r de -1.28 y una desviación estándar S_0 de 0.45, valor recomendado para pavimentos flexibles).	67
Tabla 25. Granulometría de las muestras 1 y 2 y límites de Atterberg de la muestra 2(base).	67
Tabla 26. Granulometría y límites de Atterberg de la muestra 1 y 2 (terreno natural).	69
Tabla 27. Clasificación SUCS, CBR y M_R de las cuatro muestras.	69
Tabla 28. Resultados de la prueba de resistencia de la mezcla asfáltica con el método Marshall (pastillas de 101 mm de diámetro).	70
Tabla 29. Composición granulométrica de las muestras de mezcla asfáltica 1 y 2.	70
Tabla 30. Datos de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y precipitación para Ciudad Juárez, Samalayuca y Villa Ahumada.	73
Tabla 31. Datos de temperaturas promedio por estación del año para Ciudad Juárez, Samalayuca y Villa Ahumada.	74
Tabla 32. Estructuras base y propuestas utilizadas como punto de partida para las iteraciones del diseño del PLD.	75
Tabla 33. Iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0 para una de las estructuras base con los niveles legal y alta sobrecarga de los espectros de carga.	78

Tabla 34. Iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0 con el nivel de alta sobrecarga que cumplen ambos criterios de falla y utilizan módulos menores a 10000 MPa, en orden ascendente en función del espesor total del concreto asfáltico.	78
Tabla 35. Iteraciones realizadas con una de las estructuras base en el programa Per Road 4.4	80
Tabla 36. Distribución horizontal de la deformación por tensión en el fondo de la capa de concreto asfáltico utilizada para la evaluación por fatiga en el programa Per Road 4.4	80
Tabla 37. Espesores para el concreto asfáltico obtenidos con el programa Street Pave.	82
Tabla 38. Números estructurales (SN) calculados con el programa WinPAS.	82
Tabla 39. Estructuras consideradas para el diseño final, seleccionadas de las iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0.	85
Tabla 40. Comparativa de precio por m ² de las tres opciones seleccionadas de las iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0.	85
Tabla 41. Costos estimados para la construcción inicial del PT, PLD nuevo y para PLD sobre pavimento actual.	88
Tabla 42. Actividades consideradas para las conservaciones rutinaria, periódica y reconstrucción.	90
Tabla 43. Costos futuros estimados a partir de las actividades de conservación rutinaria, conservación periódica y reconstrucción para ambas estructuras (PT y PLD).	91
Tabla 44. Costo de operación base (\$/veh-km) para cada tipo de vehículo.	92
Tabla 45. Costo de operación base (\$/veh-km) considerando el factor de costo base (F _b) para el estado de la superficie de rodadura muy bueno, regular y malo.	92
Tabla 46. Costos de operación del tránsito anual (millones de pesos/km) utilizando el TDPA del tramo de estudio en el año 2018.	92
Tabla 47. Valor Presente Neto (VPN) de las tres alternativas analizadas.	93
Tabla 48. Cálculo del Valor Presente Neto (VPN) de las actividades de conservación y reconstrucción de las dos estructuras de pavimento (PT y PLD).	95
Tabla 49. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa y tamaño nominal de ¾" (19mm).	99
Tabla 50. Espesores totales y del concreto asfáltico de las seis estructuras base y de las estructuras seleccionadas de los programas IMT-PAVE y Per Road.	100
Tabla 51. Porcentaje del VPN de las tres alternativas de pavimento sin considerar los costos para el usuario.	102
Tabla 52. Porcentaje del VPN incluyendo los costos para el usuario de las tres alternativas de pavimento.	102
Tabla 53. Iteraciones realizadas con el nivel de carga legal del programa IMT-PAVE 3.0 con las seis estructuras base y las dos estructuras propuestas.	113
Tabla 54. Iteraciones realizadas con el nivel de alta sobrecarga del programa IMT-PAVE 3.0 con las seis estructuras base, las dos estructuras propuestas y los ajustes de espesores y módulos realizados.	116
Tabla 55. Estructuras que cumplieron ambos criterios de falla con el nivel de alta sobrecarga del programa IMT-PAVE 3.0.	120
Tabla 56. Iteraciones de las seis estructuras base, las dos propuestas y ocho pruebas con ajuste de espesor y módulos con el programa Per Road 4.4.	122
Tabla 57. TDPA por tipo de vehículo y tasa de crecimiento (r) del 2.05%.	128
Tabla 58. Costo de operación base por tipo de vehículo (\$/veh-km).	130
Tabla 59. Costo de operación en función de las condiciones de la superficie de rodamiento por tipo de vehículo (\$/veh-km) para el PLD.	131
Tabla 60. Costo de operación en función de las condiciones de la superficie de rodamiento por tipo de vehículo (\$/veh-km) para el PT.	131
Tabla 61. Costo de operación del tránsito anual (en millones de pesos) para la opción PLD.	132
Tabla 62. Costo de operación del tránsito anual (en millones de pesos) para la opción PT.	133
Tabla 63. Factores equivalentes de carga (EALF) del Instituto del Asfalto.	134
Tabla 64. TDPA del periodo 2003 al 2018 del tramo Chihuahua -Cauhtémoc.	137
Tabla 65. Cálculo de los eje equivalentes para el tramo Chihuahua -Cauhtémoc.	137
Tabla 66. TDPA del periodo 2003 al 2018 del tramo Cauhtémoc - Madera.	138
Tabla 67. Cálculo de los eje equivalentes para el tramo Cauhtémoc – Madera.	138
Tabla 68. Datos de temperatura media de estaciones cercanas a la carretera Chihuahua – Madera.	139
Tabla 69. Estructuras base para diseño de la carretera Chihuahua-Madera.	140

Tabla 70. Iteraciones con el programa IMT-PAVE para el tramo Chihuahua – Cuauhtémoc utilizando el nivel de alta sobrecarga para los espectros de carga.	141
Tabla 71. Iteraciones que cumplen ambos criterios de falla para el tramo Chihuahua – Cuauhtémoc.....	142
Tabla 72. Iteraciones con el programa IMT-PAVE para el tramo Cuauhtémoc - Madera utilizando el nivel de alta sobrecarga para los espectros de carga.	143
Tabla 73. Iteraciones que cumplen ambos criterios de falla para el tramo Cuauhtémoc – Madera.	144

Simbología

AAPA	Australian Asphalt Pavement Association	FRL	Capa resistente a la fatiga
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials	HiMA	Asfalto altamente modificado
ACPA	American Concrete Pavement Association	HSD	Distribución horizontal de la deformación
AF	Agrietamiento por Fatiga	IMIP	Instituto Municipal de Investigación y Planeación
APA	Asphalt Pavement Alliance	IMT	Instituto Mexicano del Transporte
ATBP	Base asfáltica tratada	INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal
BBFT	Prueba de fatiga en viga de flexión	INEGI	Instituto Nacional de estadística y Geografía
BE	Base Estabilizada	IP	Índice de Plasticidad
BG	Base Granular	IRI	Índice Internacional de Rugosidad
CA	Concreto Asfáltico	LCCA	Análisis del costo del ciclo de vida
CAM	Capa de Alto Módulo	MEPDG	Guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista
CANACAR	Cámara Nacional del Autotransporte de Carga	MESAL	Millones de ejes equivalentes
CAPUFE	Caminos y Puentes Federales	NAPA	National Asphalt Pavement Association
CAT	Capa Absorbente de Tensión	NCAT	National Center of Asphalt Technology
CBR	California Bearing Ratio	NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	OGFC	Carpetas de fricción de graduación abierta
COV	Costos de Operación Vehicular	PG	Grado de desempeño
CP	Conservación Periódica	PLD	Pavimento de Larga Duración
CR	Conservación Rutinaria	R	Reconstrucción

CSEP	Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana	RBL	Capa con alto contenido de asfalto
CT	Coeficiente de acumulación del tránsito	RRL	Capa resistente a las roderas
DCG	Graduación densa gruesa	SAPAs	State Asphalt Pavement Associations
DFC	Graduación Densa Fina	SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transporte
DGCC	Dirección General de Conservación de Carreteras	SMA	Stone Mastic o Matrix Asphalt
DGST	Dirección General de Servicios Técnicos	SMN	Servicio Meteorológico Nacional
EALF	Equivalent Axle Load Factor	SN	Número Estructural
EAPA	European Asphalt Pavement Association	SP	Superpave
EE/ESAL	Ejes Equivalentes	SR	Subrasante
ELLPAG	European Long-Life Pavement Group	SUCS	Sistema Unificado de Calcificación de Suelos
ET	Eje de Transporte	TC	Tasa de Crecimiento
FEHRL	Forum of European National Highway Research Laboratories	TD	Tránsito de diseño
FEL	Límite de resistencia a la fatiga	TDPA	Tránsito Diario Promedio Anual
FHWA	Federal Highway Administration	TMN	Tamaño Máximo Nominal
FPS	Flexible Pavement System	UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

Capítulo 1. Introducción

Ciudad Juárez, al ser una ciudad fronteriza, es un punto de entrada y salida del país tanto de personas como de mercancías, por lo cual toda carretera constituye un activo valioso para el desarrollo social y económico de la región, por lo que es importante mantenerlas en condiciones óptimas y seguras además de evitar mayores costos de operación vehicular (COV).

El tramo carretero Ciudad Juárez- Villa Ahumada de la red federal libre, forma parte del corredor Querétaro-Ciudad Juárez, que conecta el norte con el centro de México, siendo uno de los principales del sistema carretero nacional de acuerdo con la Cámara Nacional del Autotransporte de Carga (CANACAR). Estadísticas básicas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) del año 2018, muestran que el 55.5% de la carga y el 95.6 % de los pasajeros se movilizó por medio de transporte terrestre (Dirección General de Autotransporte Federal, Subsecretaría de Transporte, 2019).

La rapidez, el costo y la capacidad del transporte disponible tienen un impacto significativo sobre la vitalidad económica de un área. La disponibilidad de las instalaciones de transporte puede influir de manera determinante en el crecimiento y desarrollo de una región. El transporte eficiente permite el desarrollo de la industria y del comercio; reduce los costos de materia prima o de los bienes manufacturados, aumenta la competencia entre regiones, dando como resultado menores costos y mayor oferta para el consumidor (Garber & Hoel, 2005).

Para que la circulación sobre una carretera sea cómoda y segura, es necesario disponer de una superficie que reúna las condiciones adecuadas para permitir el movimiento de los vehículos a la velocidad límite, sin que la conducción se convierta en una tarea riesgosa y fatigosa (Garber & Hoel, 2005). Un indicador de la calidad de rodadura de un camino es el Índice Internacional de Rugosidad (IRI por sus siglas en inglés), el cual fue establecido por el Banco Mundial como índice estándar para medir la rugosidad de un pavimento. Para México, la norma N-CSV-CAR-1-03-004-16 establece que para corredores carreteros el IRI debe ser entre 1.8 m/km a 2.5 m/km para que sea aceptable, y menor de 1.8 m/km se considera bueno.

Una red de carreteras debe posibilitar que los vehículos circulen con seguridad, rapidez y comodidad por ello la conservación y reconstrucción de las carreteras son imprescindibles (Garber & Hoel, 2005). En México, la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) lleva a cabo un Programa Nacional de Conservación de Carreteras el cual se apoya de una Guía de Procedimientos y Técnicas para la Conservación de Carreteras en el país. Con el fin de preservar las carreteras federales libres de peaje, la DGCC desarrolla anualmente subprogramas de: conservación rutinaria de tramos y puentes, conservación periódica, reconstrucción de tramos y puentes, señalamientos, atención a puntos de conflicto y mantenimiento integral.

Construir infraestructura de transporte requiere enormes recursos de energía, materiales y terreno por lo que es importante analizar todas las alternativas posibles, el costo-beneficio del proyecto, considerar la importancia de un buen diseño y cuidar el proceso constructivo. Al disponer de mayores recursos tecnológicos se tiene la posibilidad de implementarlos y aprovecharlos para mejorar el proceso constructivo con el fin de aumentar la calidad y disminuir costos, tal vez no inmediatamente, pero sí a largo plazo. Los pavimentos de larga duración (PLD) son una opción que vale la pena considerar sobre todo en la construcción de carreteras por las que circulan vehículos de carga, al contar con una estructura con mayor tiempo de vida que sólo requiera mantenimiento periódico mínimo se beneficia principalmente al usuario.

Un aspecto fundamental para la construcción de cualquier proyecto es la parte económica, al depender parte de las carreteras de la federación para su conservación, mantenimiento y reparación se deben de ajustar a la disposición de recursos. La red carretera federal del estado de Chihuahua comprende alrededor de 2100 km entre tramos libres y de cuota, tanto federales como estatales. Al reducir las actividades de conservación implementado PLD podrían aprovecharse los recursos en otros programas.

Por lo anterior, en esta investigación se realizará un análisis comparativo del costo de una reconstrucción total del tramo carretero Ciudad Juárez- Ahumada con PLD y pavimento tradicional, el cual tiene una longitud aproximada de 111 km. Se analizarán dos aspectos importantes: Dimensionamiento estructural del pavimento y mantenimiento de la estructura con el fin de comprobar los beneficios económicos de los PLD.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Pavimentos de Larga Duración

Para conseguir que las carreteras se construyan y desempeñen adecuadamente su función es necesario desarrollar actividades, que abarcan desde la preparación de planes para el desarrollo de la red de carreteras en el futuro hasta las labores de conservación y explotación de las existentes, pasando por el proyecto y construcción de nuevas vías (Kraemer & al., 2003).

La ingeniería de transporte es parte fundamental para el desarrollo de un proyecto carretero el cual puede dividirse en planeación, diseño, construcción, administración y operación de tránsito y mantenimiento. La planificación incluye la selección del proyecto para su diseño y construcción; el diseño contempla la especificación de todas las características del proyecto de transporte; la construcción abarca todos los aspectos del proceso de edificación; la administración y operación del tránsito incluyen estudios para mejorar la capacidad y la seguridad; y el mantenimiento implica todo el trabajo necesario para asegurar que el sistema de carreteras se conserve en un orden apropiado de operación (Garber & Hoel, 2005).

Desde finales de los noventas, el concepto de pavimentos de larga duración se ha establecido en Europa y Estados Unidos. Los PLD están basados en pavimentos anteriores llamados full-depth y deep-strength, pero especialmente en adelantos recientes en el diseño, la funcionalidad y tecnología de los materiales. En la práctica, el fin de los PLD es extender significativamente la

vida de los pavimentos restringiendo fallas como agrietamiento y roderas a la superficie del pavimento (European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2007).

Los PLD también conocidos como perpetuos, larga vida, larga duración o vida extendida (perpetual, long-life, long-lasting, extend-life pavements) no son propiamente algo nuevo. Durante la Conferencia de Directores Europeos de Caminos a finales de la década de los noventa se consultó a los miembros sobre temas de interés que afectarían la red europea de caminos, con el fin de identificar oportunidades de conocimiento e iniciar con las investigaciones. Los PLD fueron uno de los temas sugeridos por la Agencia de Autopistas del Reino Unido lo que contribuyó a la formación del Grupo Europeo de Pavimentos de Larga Duración (ELLPAG, por sus siglas en inglés) formado por miembros del Foro de Laboratorios Nacionales Europeos de Investigación de Carreteras (FEHRL, por sus siglas en inglés) y miembros de la Agencia de Autopistas del Reino Unido.

Algunos objetivos del ELLPAG fueron revisar el estado de arte actual del diseño y el mantenimiento de PLD completamente flexibles en Europa y redactar una guía integral de prácticas recomendadas, sencilla de manejar, para el diseño y mantenimiento de todos los tipos comunes de pavimentos en Europa. Obteniéndose para el 2004 ELLPAG Phase 1 Report: A Guide to the Use of Long-Life Fully Flexible Pavements (European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2007).

Así que, para la ELLPAG un pavimento de larga duración es “un tipo de pavimento que no presentará deterioro significativo en las capas base del camino debido a un apropiado mantenimiento de la superficie... (European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2007)”. Mientras que, en Estados Unidos la Asphalt Pavement Alliance (APA) los define como “un pavimento asfáltico diseñado y construido para durar más de 50 años sin requerir rehabilitación o reconstrucción estructural, necesitando solamente la renovación periódica de la superficie...”

La APA en el documento Perpetual Asphalt Pavements a Synthesis menciona que las investigaciones han comprobado que un pavimento bien construido y diseñado puede durar largo tiempo. En décadas pasadas, en Estados Unidos, se construían pavimentos llamados full-depth y deep-strength los cuales alcanzaron ciclos de vida extendidos, pero con un diseño demasiado conservador que provocaba pavimentos sobre diseñados (Asphalt Pavement Alliance (APA), 2010).

Mazumder et. al (2015), comentó que el contraste entre el enfoque de diseño de pavimentos de larga duración contra los convencionales es el método, mientras el primero es de tipo empírico-mecanicista el segundo, es puramente empírico debido a que en la elección del espesor de la carpeta únicamente se considera la cantidad de tránsito, lo que los hace demasiado conservadores. En el diseño empírico el espesor del pavimento se incrementa en función del aumento del tránsito, sin embargo, llega un punto en que el espesor es suficiente para la cantidad de carga esperada, que cualquier capa adicional proporciona una estructura sobredimensionada y costos extras innecesarios. La parte mechanicista se refiere a la aplicación de los principios de ingeniería mecánica, que conduce a un proceso de diseño racional considerando las acciones del clima y el tránsito vehicular y utiliza un modelo para calcular la reacción del pavimento a las cargas de tránsito (Mazumder, et al., 2015).

De acuerdo con el documento Phase 1 Report: A Guide to the Use of Long-Life Fully Flexible Pavements (Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), 2004), la mayoría de los países europeos utilizan un periodo de diseño máximo de 20 años para pavimentos totalmente flexibles. Aunque algunos países están adoptando periodos de diseño más largos, por ejemplo: Inglaterra, 40 años, Francia y Alemania, 30 años. La vida de la estructura del pavimento es decidida mayormente por estrategia económica, aunque también se consideran los materiales y el tipo de camino. También se menciona que hay dos métodos para crear un PLD, ya sea construyendo una estructura completamente nueva o mejorando una estructura ya existente para que tenga características de un PLD.

Los PLD han sido construidos en países como: China, Reino Unido, Australia, Estados Unidos y México. En China, tradicionalmente los caminos con altos niveles de tránsito se construyen con pavimentos semirrígidos, en el 2004 se construyó el primer PLD combinado con la estructura de un pavimento semirrígido el cual se comparó con otra estructura puramente semirrígida, la finalidad de este estudio era encontrar la mejor alternativa para la rehabilitación de los caminos (Sultan & Guo, 2017).

En Inglaterra, se utilizan diseños conservadores de hasta 390 mm y no se recomiendan espesores menores de 200 mm, incluso para carreteras de poco tránsito que deben durar 40 años, ya que pueden presentar deformación estructural y una propagación rápida de grietas (Nunn & Ferne, 2001). Un ejemplo de PLD en Reino Unido es la autopista M-5 (Tarefder & Bateman, 2009).

En Australia se llevó a cabo un proyecto para implementar el diseño de PLD utilizando el FEL (por sus siglas en inglés, límite de resistencia a la fatiga) debido a que los diseños presentaban espesores muy conservadores. Una de las conclusiones del proyecto “Technical background to the development of the AAPA (Australian Asphalt Pavement Association) long life pavement design procedure” fue que para lograr un pavimento de larga duración el espesor máximo del asfalto de ser entre 300 mm y 350 mm y un espesor mínimo de 200 mm, el cual coincide con lo establecido en Inglaterra, ya que el estudio comparó datos de Australia con datos de Estados Unidos e Inglaterra. Además, se estableció una relación entre el FEL y la rigidez de la mezcla asfáltica que se recomienda para el diseño de PLD en Australia (Australian Asphalt Pavements Association(AAPA), 2015).

En Estados Unidos para el año 2009 había 39 secciones de PLD en 19 estados, Texas era el estado con mayor número de secciones en servicio (8), diseñadas y analizadas por métodos empírico-mecanicistas utilizando los programas Flexible Pavement System (FPS 19W) y Per Road (Tarefder & Bateman, 2009). Todas las secciones son examinadas para revisar su desempeño y obtener relaciones campo-laboratorio para instaurar criterios de falla más precisos (Walubita, et al., 2010).

El Departamento de Transporte de Texas publicó en el 2010 el documento The Texas Perpetual Pavements: Experience overview and the way forward (Walubita, et al., 2010). En dicha publicación comparte su experiencia construyendo PLD, para el momento en que se realizó el estudio las estructuras tenían 5 años. En el 2001 se comenzó con una estructura conformada por cinco capas de concreto asfáltico con diferentes tipos de mezclas y espesores y una capa base rígida o estabilizada. Después de revisar el desempeño de los tramos con pruebas en campo y en

laboratorio se disminuyeron los espesores de las capas y se modificaron los tipos de mezclas, los cuales se muestran en la tabla 1. El espesor de la capa rígida de carga estaba especificado para 8 in o mayor, el tamaño máximo nominal del agregado de 1.0 in a 1.5 in y asfalto grado PG 76-XX con la temperatura mínima dependiendo del lugar donde se construiría. También se redujo el tamaño del agregado debido a la poca trabajabilidad de la mezcla y problemas para compactarla (Walubita, et al., 2010). Ya que el diseño utilizado resultó ser muy conservado, se estableció un nuevo espesor total mínimo de 12 in (305 mm) para el concreto asfáltico (CA). Para la base el espesor debe ser de 6 in (152 mm), si el volumen de tránsito es menor o igual a 30 MESAL (millones de ejes equivalentes) y 8 in (203 mm), si es mayor de 50 MESAL. El documento también menciona un punto importante que son los problemas de construcción como variaciones en la densidad, segregación vertical y permeabilidad debido a la poca trabajabilidad de la capa formada por agregado grueso con tamaño máximo de 1 pulgada (25.4 mm) y a la falta de experiencia en la construcción de PLD (Walubita, et al., 2010). En la tabla 1 se muestra un resumen de los nuevos criterios de diseño para PLD en Texas.

Tabla 1. Nueva estructura propuesta por el departamento de transporte de Texas para el diseño de PLD.

Tipo de mezcla	Espesores						Capa	Grado PG	Módulos propuestos	
	≤ 30 MESAL		30 ≤ 50 MESAL		> 50 MESAL				ksi	MPa
	in	mm	in	mm	in	mm				
PFC (opcional)									350	2400
SMA	2	50	2	50	2 a 3	50-75	Superficie	70-28	650	4400
¾" Superpave	2	50	3	75	≥3	≥75	Transición	70-22	800	5500
RRL ⅞" o ¾" Superpave	≥6	≥150	≥8	≥200	≥8	≥200	Estructural resistente a las roderas	64-22/70-22 para >50 MESAL	800	5500
RBL-½" Superpave	2	50	2	50	2 a 4	50-100	Resistente al agrietamiento por fatiga	64-22	500	3400
Base estabilizada con cal		≥150	≥6	≥150	≥8	≥200			60	400
Base estabilizada con cemento	≥6								100	690
Subrasante									12	83

RRL (Rut Resistant Layer) = capa resistente a las roderas; RBL (Rich Binder Layer) =capa resistente al agrietamiento por fatiga; MESAL=Millones de ejes equivalentes
FUENTE: (Walubita, et al., 2010)

En Nuevo México, el departamento de transporte desarrolló un estudio en el año 2008 para implementar un guía para el diseño de PLD con materiales y condiciones climáticas del estado. Utilizaron el enfoque empírico mecanicista para el diseño (MEPDG de la AASHTO), evaluaron los efectos de la infiltración de la humedad en la reducción de la rigidez y resistencia del concreto asfáltico y la capa base y cuantificaron el impacto de remover la capa RBL (Tarefder & Bateman, 2009). En el 2012 Tarefder et. al presentaron el documento Design of Optimal Perpetual Pavement Structure para Nuevo México. En el estudio se analizaron pavimentos con sólo dos capas de CA, eliminando la capa del fondo, comúnmente denominada Rich Binder Layer (RBL, por sus siglas en inglés), la cual consiste en una capa con alto contenido de asfalto que reduce el porcentaje de vacíos y aumenta la flexibilidad. Por lo general los espesores de la RBL van de 3 in a 7 in (75 mm a 18 mm). Esta capa se considera costosa y presenta problemas de infiltración de humedad. Para reducir el agrietamiento por fatiga puede utilizarse una capa RBL o bien incrementar el espesor del pavimento para que la deformación por tensión en el fondo de la capa base de CA sea insignificante (Tarefder & Bateman, 2012). De acuerdo con Tarefder et. al, 2012 para los PLD en Nuevo México las roderas es el criterio de falla que causa mayor preocupación.

El documento también incluye un LCCA comparando estructuras con y sin RBL. La tabla 2 presenta las características de los materiales utilizados para el análisis y evaluación de las alternativas de diseño para PLD utilizados por Tarefder et. al, 2012. La tabla 3 muestra los estados en Estados Unidos que utilizan la capa RBL en las estructuras de PLD y el límite para la deformación en la capa base del concreto asfáltico. La tabla 4 presenta los criterios de desempeño del pavimento utilizados por la MEPDG 2008 de la AASHTO. Se considera que un pavimento falla cuando las fallas previstas son mayores o iguales a los valores de la tabla 4. Los resultados predichos de MEPDG se analizan en base al agrietamiento de la superficie hacia abajo, agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba, roderas en el CA, roderas en toda la estructura e Índice de Rugosidad Internacional (IRI) durante un período de 50 años (Tarefder & Bateman, 2012).

Tabla 2. Sección estructural de PLD utilizada en Nuevo México.

Capa	Espesor (in)	Tipo de mezcla TMN	Grado PG	% Asfalto	% Vacíos	E (ksi)
	1.5					
Superficie	2.0-2.5	SP-III ¾"	76-22	10.5	6	
	3	SP-IV ½"	70-22	11.5	6	
	15-T1-T3	SP-II 1"		9	6	
Intermedia	15-T1-T3-2	SP-III ¾"	76-22	10.5	6	
	15-T1-T3-4	SP-IV ½"	70-22	11.5	7	
	3	SP-II 1"				
RBL	5	SP-III ¾"	64-22			
	7	SP-IV ½"				
Base granular	6				7	20
	10					
Subrasante	12				5	8

SP=Superpave; T=Espesor; PG= Grado de Desempeño; E= Módulo de elasticidad; TMN=Tamaño Máximo Nominal. FUENTE: (Tarefder & Bateman, 2012)

Tabla 3. Información del diseño estructural de pavimentos de larga duración.

No.	Estado	Concepto PLD		
		Límite de deformación en la capa base del CA ($\mu\epsilon$)	RBL	Método de diseño o programa
1	California (I-710)	70	Si	Circly, CA-4PRS
2	Illinois (I-70)	60	No	Illipave
3	Iowa (US-60)	70	No	-
4	Kansas (US-75)	70	Si	AASHTO 1993, EVERSTRESS
5	Kentucky(I-695)	70	No	Diseño Mecanicista
6	Maryland(I-695)	No	Si	AASHTO 1993
7	Michigan (US-24)	65	Si	-
8	Minnesota(I-35)	No	No	ELSYM 5, Von Quintus Cat.2001
9	New Jersey(I-287)	No	No	-
10	Nuevo México (US-70)	No	Si	Instituto del Asfalto
11	Ohio (US-30)	70	Si	Kenlayer
12	Oklahoma (SH-152)	70	Si	PerRoad
13	Oregon (I-5)	70	Si	AASHTO 1993, WESLEA
14	Texas (SH-114)	70	Si	FPS 19W, Per Road
15	Virginia(I-95)	No	No	-
16	Washington (I-90)	No	No	AASHTO 1993, EVERSERIES
17	Wisconsin (STH-50)	-	Si	AASHTO 1972, WisPave

FUENTE: (Tarefder & Bateman, 2012)

Tabla 4. Criterios de desempeño para pavimentos perpetuos.

Criterio de desempeño	Valor máximo
Agrietamiento tipo piel de cocodrilo (% del área del carril)	20
Roderas total (in)	0.50
Roderas en el CA a los 10 años	0.25
Agrietamiento térmico (ft/mi)	700
Agrietamiento de la superficie hacia abajo (ft/mi)	700
Índice Internacional de Rugosidad -IRI (in/mi)	200

FUENTE: (Tarefder & Bateman, 2012)

La figura 1 representa las estructuras propuestas para PLD en Nuevo México. La primera opción no incluye la capa RBL, debido al costo que genera. Esta estructura tiene 3 in de CA en la primera capa con mezcla SP-IV y 7 in en la segunda capa de CA con mezcla SP-II. Ambas capas tienen asfalto modificado con 6% de vacíos. El agrietamiento por fatiga, al final de 50 años, es de 12%. La deformación permanente en la primera capa < 0.2 in y < 0.05 in en la segunda capa al final de 50 años. La segunda opción conformada por 3 in de CA en la capa de superficie, 4 in de CA en la capa intermedia y 3 in de espesor para la capa RBL. Utilizando mezcla SP-IV para la superficie y la RBL y mezcla SP-II en la capa intermedia. Asfaltos superpave PG 76-22 para las dos primeras capas de CA y asfalto PG 64-22 en la RBL que contiene 3% de vacíos de aire

mientras que, las otras dos capas 6%. Los resultados de este diseño mostraron agrietamiento por fatiga <2% y agrietamiento de la superficie hacia abajo < 0.5 ft/mi y pocas o ninguna rodera en las capas intermedia y base al final de los 50 años de vida de diseño del pavimento (Tarefder & Bateman, 2012).

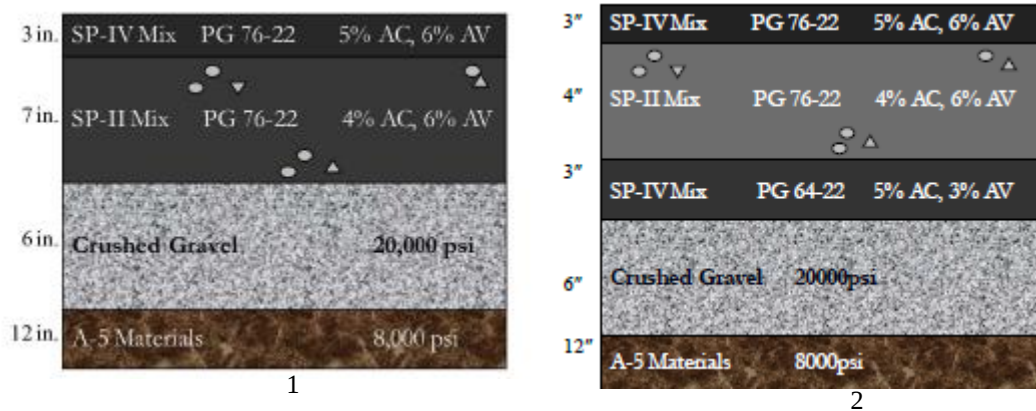


Figura 1. Diseños opcionales de PLD para Nuevo México (Tarefder et. al, 2012).

El Departamento de Transporte de Ohio en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA) publicó en junio del 2015 (Sargand, et al., 2015) el reporte del desempeño de tres secciones de prueba de PLD con espesores de CA de 11in (280 mm), 13in (330 mm) y 15in (380 mm) con la intención de desarrollar un procedimiento para el diseño óptimo de PLD. Se probó la resistencia a la fatiga de las tres secciones y sólo las dos últimas cumplieron el criterio de desempeño de PLD. Se realizaron pruebas con un asfalto altamente modificado (HiMA por sus siglas en inglés) que aumenta la rigidez a altas temperaturas lo que podría reducir el espesor de los PLD. Los reportes de las pruebas de laboratorio mostraron que el HiMA parece resistir la deformación por roderas en la superficie y en la capa intermedia mejor que una mezcla estándar. También el documento (Sargand, et al., 2015) menciona que de utilizarse bases estabilizadas estas pueden reemplazar la última capa de CA y sugiere que, de no haber información disponible para el FEL puede utilizarse el valor conservador de $70 \mu\epsilon$ ($\epsilon \times 10^{-6}$). Las secciones de prueba estudiadas en el proyecto de Ohio consistían en cuatro capas de CA (superficie, intermedia, base y capa resistente a la fatiga (FRL, por sus siglas en ingles); una base granular y la subrasante estabilizada con cal en las primeras 18 in de las secciones con 11 in y 13 in de espesor de CA. Para evaluar las secciones de prueba utilizaron el programa Per Road. En la tabla 5 se muestran las características de las capas y en la tabla 6 los módulos y los criterios de desempeño utilizados en la evaluación con el programa Per Road.

Tabla 5. Características de las estructuras de prueba analizadas en Ohio.

Capa/ Sección	Espesor (in)			TMN (in)	Asfalto grado PG	% Asfalto	% Vacíos
	39D168	39BS803	39BN803				
Superficie	1	1	1	$\frac{3}{8}$	76-22M	7.6	4
Intermedia	2	2	2	$\frac{3}{4}$	64-28	4.9	4
Base de CA	8	6	4	$1\frac{1}{2}$	64-22	4.2	4
FRL	4	4	4	$1\frac{1}{2}$	64-22	4.6	3
CA Total	15	13	11				
Base granular	6	6	6				
Subrasante estabilizada con cal		18	18				

TMN=Tamaño Máximo Nominal; PG= Grado de desempeño; CA=Concreto Asfáltico; FRL=Fatigue Resistance Layer
FUENTE: (Sargand, et al., 2015)

Tabla 6. Módulos de elasticidad y criterios de desempeños utilizados con el programa Per Road en Ohio.

Capa	Módulo (ksi)	Ubicación	Criterio de desempeño	
			Criterio	Límite del umbral
Superficie e Intermedia	1500			
Base de CA	1200	fondo	Deformación horizontal	50 $\mu\epsilon$
FRL	800	fondo	Deformación horizontal	70 $\mu\epsilon$
Base granular	10	fondo	Deflexión vertical	20 mil
Subrasante	20		Presión vertical	8/4 psi
Subrasante estabilizada con cal	40			

CA=Concreto Asfáltico, FRL= Fatigue Resistant Layer (capa resistente a la fatiga)

FUENTE: (Sargand, et al., 2015)

La Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecanicista (MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), de la AASHTO 2008, presentó un cambio en la manera de diseñar pavimentos al emplear una metodología que puede calibrarse con las condiciones locales (tránsito, materiales y clima); la cual tiene tres etapas básicas: la primer etapa consiste en determinar los valores de entrada de los materiales, el tránsito y el clima; la segunda etapa consiste en el análisis estructural para predecir las respuestas críticas del pavimento, la cual es la parte mecanicista, y la definición de la relación entre las respuestas críticas del pavimento y las fallas observadas en campo (parte empírica); la tercer etapa se trata de evaluar las alternativas estructuralmente viables por medio de un análisis del costo del ciclo de vida (LCCA) (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).

Otra característica que tiene la MEPDG es el nivel de los datos de entrada de los materiales y el tránsito el cual depende de la confiabilidad de los datos que se utilizarán. La jerarquía de los datos proporciona flexibilidad para la obtención de información para el diseño de un proyecto en función de su grado de criticidad, los recursos disponibles y a la experiencia del diseñador. La MEPDG dispone de tres niveles, que se describen brevemente a continuación:

- El primer nivel representa el más alto grado de precisión sobre los parámetros de entrada los cuales son medidos directamente en el sitio y son específicos para ese proyecto por lo que, representa un alto costo en pruebas y recolección de datos. Requiere pruebas de laboratorio o en campo de los materiales como: la prueba del módulo dinámico para mezclas de CA en caliente, datos de espectros de carga por eje del sitio en específico y pruebas de deflexión no destructivas (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).
- En el segundo nivel, la información es obtenida a partir de correlaciones, ecuaciones de regresión o de base de datos de agencias de gobierno o privadas. Es considerado como un nivel estándar para diseños rutinarios (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).
- El tercer nivel, este nivel tiene la menor precisión en los datos. Debe utilizarse en diseños donde las consecuencias por fallas prematuras sean mínimas, por ejemplo, caminos con bajos volúmenes de tránsito, se basa en valores estimados o valores promedios de la región (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).

En el 2002 Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en conjunto con la SCT, generaron la publicación técnica 197 “Mecánica de materiales para pavimentos”, debido a la importancia de considerar las propiedades de los materiales en el diseño de la estructura del pavimento a lo largo de la vida útil de éste. También con la incorporación de métodos de diseño mecanicistas los datos utilizados anteriormente corresponden a observaciones empíricas que, si bien han funcionado, no siempre logran vidas útiles largas (más de 20 años) y algunas son sobre diseñadas. Los cambios en el tipo de tránsito (vehículos más pesados y altos volúmenes) también influyen en la eficacia del método de diseño, con el objetivo de diseñar pavimentos apegados al comportamiento real el documento describe el comportamiento de materiales considerados los más usados en la construcción de la estructura del pavimento e incluye el concepto de módulo de resiliencia (Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) e Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2002).

Otra publicación del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) junto con la SCT es el documento técnico no. 258 denominado Conceptos Mecanicistas en Pavimentos (2004). En el cual menciona la relevancia de aplicar esos conceptos en el diseño de pavimentos para aumentar su confiabilidad. Para iniciar con el proceso de diseño, con la metodología mecanicista, se parte de un diseño preliminar para el cual son necesarios los espesores de las capas y las características de los materiales, el tipo de clima definido por la precipitación y la temperatura y el nivel de tránsito vehicular el cual puede ser definido por los ejes equivalente o por el espectro de distribución de cargas (Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2004).

La Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT publicó en el año 2013 el Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana

(CSEP) el cual refiere que para su elaboración se regionalizaron los terrenos naturales, las temperaturas y la precipitación, se caracterizaron los datos de tránsito, se calculó el módulo resiliente de mezclas asfálticas y suelos, de materiales extraídos de muestreos en bancos de materiales y pavimentos existentes. En el documento se proponen secciones de pavimento flexible, semirrígido y rígido, acordes con las condiciones regionales y de tránsito de cada proyecto. Para el diseño de las estructuras, se utilizaron el método de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México) 1999 y el método AASHTO 1993. Se menciona que es una guía por lo que es importante que los parámetros a considerar se encuentren dentro de los rangos indicados en el CSEP (Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Dirección General de Servicios Técnicos, 2013).

En octubre del 2017 se llevó a cabo el foro Tecnología e Innovación en la Construcción de Carreteras por parte de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción delegación Veracruz, en una de las conferencias se habló de los PLD y su construcción en el país. Se comentó que el primer proyecto de PLD que se realizó fue en Nuevo León en el libramiento Dr. González el cual se finalizó en el 2011. Otros proyectos son: en el 2012 Monterrey – Reynosa, en el 2013 la línea 5 del Metrobús de la Cd. de México, en el 2014 la línea 6 del Metrobús de la Cd. de México, en el 2015 las autopistas México – Puebla y Querétaro – Irapuato, de acuerdo con el autor la vida útil de estos proyectos es de 25 años (Espinosa Arreola, 2017).

Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) presentó, en el décimo congreso mexicano del asfalto (2017), el documento Diseño Estructural y de Mezclas Asfálticas de Alto Desempeño para Pavimentos de Larga Duración en el cual comenta que, debido a la intensidad del tránsito vehicular y las cargas que circulan por la red de autopistas a su cargo ha sido necesario proporcionar mayor durabilidad a los pavimentos asfálticos, por lo que se ha recurrido a los PLD que tienen un desempeño y vida útil superior a un pavimento tradicional, usualmente mayor a 25 años. Refieren también que, para el diseño del PLD utilizaron el programa Per Road 4.3; el cual solicita geometría del pavimento, espectros de carga del tránsito, variabilidad de espesores y umbrales de deformación máxima para controlar la fatiga y la deformación permanente (Moreno Fierros, 2017).

El documento de CAPUFE menciona que el PLD está formado por una capa de desplante o transición, una capa absorbente de tensión (CAT) con un módulo de 5000 MPa (725 ksi), una capa de alto modulo (CAM) de 10000 MPa (1500 ksi) y una capa de rodadura. El diseño se realizó siguiendo una metodología empírico mecanicista. Para la caracterización del tránsito utilizaron datos de estudios de pesaje dinámico realizados en diferentes tramos de la red bajo su cargo. Definieron umbrales de falla para el diseño con valores recomendados por el NCAT de los Estados Unidos, el cual establece un umbral de falla por fatiga de $-120 \mu\epsilon$ y el umbral de falla por deformación permanente de $250 \mu\epsilon$. Respecto a los materiales, midieron el módulo dinámico de la mezcla, conforme la norma AAHSTO T-342, y el módulo de resiliencia para el suelo y materiales granulares, conforme la norma AASHTO T-307. Realizaron una comparativa del Per Road con otros programas: DISPAV UNAM, AASHTO 93, DAMA (Instituto del Asfalto) y AASHTO DARWIN 2008 (Moreno Fierros, 2017). También incluyeron un ejemplo de un análisis del costo del ciclo de vida (LCCA, por sus siglas en inglés) de la autopista México – Cuernavaca comprando un PLD contra un pavimento de concreto para un periodo de diseño de 30 años (Moreno Fierros, 2017).

Otro ejemplo de PLD en México es el construido en Monterrey en el municipio de Dr. González. Se construyeron poco más de 11 km con una vida de diseño de 25 años (Sanchez Miranda, 2016). La estructura consta de tres capas de CA: la primera es la capa de rodadura con 30 mm de espesor utilizando un asfalto PG 70-28 modificado con polímero; la segunda capa es la CAM con un espesor de 180 mm y asfalto modificado con polímero para obtener un módulo dinámico superior a 10000 MPa (1500 ksi) y la tercer capa, CAT con un espesor de 100 mm y un asfalto PG 76-22 con un contenido de vacíos del 3% con la intención de proporcionar mayor flexibilidad a la mezcla y resistencia al agrietamiento por fatiga debido a la repetición de cargas, el módulo dinámico de diseño de 3000 MPa (435 ksi) (Sanchez Miranda, 2016).

1.1.2 Análisis del Costo del Ciclo de Vida

Junto con la investigación del desempeño de los PLD también se analiza el impacto económico el cual puede realizarse a través de un análisis del costo del ciclo de vida (LCCA, por sus siglas en inglés) para comparar las diversas alternativas de diseño del pavimento, cuantificando los impactos económicos a largo plazo.

Para realizar un LCCA hay que determinar el periodo de análisis y tomar en cuenta los costos iniciales y futuros para identificar la opción con el mejor valor a lo largo de su vida útil. Una característica conveniente de un LCCA, cuando se comparan dos alternativas de costos diferentes, es que los costos comunes se pueden cancelar y sólo se consideran los costos que son diferentes. Los pasos para realizar el LCCA pueden variar dependiendo del autor que se consulte, de acuerdo con (Braham, 2017) se tienen seis pasos: (1) establecer alternativas de diseño para el periodo de análisis, (2) determinar periodos de rendimiento y el tiempo de actividad, (3) estimar costos, (4) desarrollar diagramas de flujo de gastos, (5) calcular el valor presente neto y (6) analizar los resultados para reevaluar estrategias de diseño (Braham, 2017).

En el año 2002 el departamento de transporte de Estados Unidos, específicamente la oficina de gestión de activos (Office of Asset Management) de la FHWA publicó el documento Lyfe-Cicle Cost Analysis Primer con la finalidad de promover el uso del LCCA para reputar las opciones de inversión en el área de transporte y demostrar el valor de dicho análisis, desde el punto de vista económico, en la toma de decisiones.

La American Concrete Pavement Association (ACPA) publicó en el 2012 el boletín técnico “Análisis del Costo del Ciclo de Vida: Una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas en pavimentación”. En este documento la ACPA menciona que el LCCA es útil para evaluar y comprar el costo entre alternativas de pavimentos ya sea de mezcla asfáltica o de concreto. Si el análisis es realizado de manera correcta se puede identificar la opción con el mejor desempeño al menor costo durante el periodo del análisis. Los LCCA pueden realizarse por el método determinístico, asumiendo un valor definido para cada actividad, o bien, probabilísticamente al considerar la variabilidad de cada dato de entrada. Para el desarrollo de este análisis pueden emplearse softwares, la ACPA en su publicación refiere los siguientes: AASHTOWare Pavement ME Design, StreetPave de la ACPA, LCCA Original y LCCA Express de la APA y RealCost de la FHWA. Los tres primeros son de tipo determinístico y el último, determinístico y probabilístico (American Concrete Pavement Association (ACPA), 2012).

1.2 Planteamiento del problema

Al formar parte el tramo de estudio de un eje de transporte, que une un cruce fronterizo con el centro y sur del país y registrar alto volúmenes de tránsito, es necesario mantenerlo en óptimas condiciones de operación para ofrecer al usuario ventajas en tiempo de recorrido y mayor seguridad, que influyen en el desarrollo económico de la región. Activar la economía no sólo beneficia a las empresas, también optimiza los recursos que la federación puede invertir en la conservación de los tramos carreteros sobre todos los libres de peaje, que dependen totalmente del presupuesto federal. Para este año el presupuesto referente a conservación de tramos carreteros (periódica y rutinaria) para el estado de Chihuahua ascendió a \$403 636 526 pesos siendo casi el doble con respecto al año anterior (tabla 7) (Programa Nacional de Conservación de Carreteras).

En la memoria documental 40, que es parte del informe de rendición de cuentas de la administración federal 2013-2018, se menciona que el 63% de las carreteras libres de peaje tiene más de tres décadas en operación, lo que refleja que se diseñaron para condiciones de tránsito diferentes a las actuales, ya que los pesos de los vehículos pasaron de 34 ton en 1960 a 66.5 ton en 1997 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT, 2018). El estado físico de las carreteras influye en los COV que actualmente se estiman en \$374,000 millones de pesos por año. El principal factor que propicia poco avance en la conservación de la red carretera es la insuficiencia y las asignaciones irregulares de recursos, lo que obliga a dar prioridad a las conservaciones periódicas que si bien mejoran las condiciones no restituyen la vida útil del pavimento (Memoria Documental, SCT 2018) (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT, 2018).

El rezago en la conservación y mantenimiento de las carreteras influye en el desarrollo económico del país, al ser este el principal medio de transporte de mercancías en el país. La conservación es un aspecto fundamental para la duración de las carreteras, construyendo estructuras de pavimento que requieran únicamente mantenimiento de su superficie (capa de rodadura) y que tengan una vida útil de hasta 40 años se pueden disminuir los gastos derivados de las conservaciones y asignar mayores recursos a reconstrucciones que aumenten la vida útil de las estructuras actuales. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT, 2018).

Tabla 7. Presupuesto federal asignado al estado de Chihuahua para conservación de tramos carreteros

Año	Conservación	Monto asignado
2016	Periódica	\$ 203 137 652
	Rutinaria	\$ 133 038 461
	Reconstrucción de tramos	\$ 14 299 999
	Total	\$ 350 476 112
2017	Periódica	\$ 73 545 774
	Rutinaria	\$ 137 875 527
	Total	\$ 211 421 301
2018	Periódica	\$ 75 217 104
	Rutinaria	\$ 131 942 183
	Total	\$ 207 159 287

	Periódica	\$ 229 182 441
2019	Rutinaria	\$ 174 454 085
	Total	\$ 403 636 526

FUENTE: Dirección General de Conservación de Carreteras, México.

1.2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende el tramo carretero libre Villa Ahumada-Ciudad Juárez (de la glorieta del km 20) de la carretera federal 45, ver figura 2.



Figura 2. Tramo carretero identificado con el número índice 19 (Datos Viales SCT, DGST 2017).

El tramo mencionado, es una carretera tipo ET4 de aproximadamente 111 km, clasificación que establece que es un eje de transporte de cuatro carriles, sobre el cual pueden circular vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso de acuerdo con el Apéndice para la clasificación de los caminos y puentes del reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal (Secretaría de Gobernación, Diario Oficial de la Federación, 2006).

El camino es de tipo plano, en él se encuentran mesetas y porciones desérticas limitadas por serranías asiladas de corta elevación. El clima de la región varía de semidesértico a árido extremoso. Siendo los meses de junio a agosto en los que se registran las temperaturas máximas y las temperaturas mínimas, de diciembre a febrero. La precipitación pluvial se presenta de junio a septiembre y se caracteriza por lluvias torrenciales (INAFED Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2010).

La carretera federal 45 recorre los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo es una de las más importantes del país y tiene una longitud de 1920 km (Gómez Martínez, et al., 2017). Esta carretera forma parte del corredor Querétaro -Ciudad Juárez, constituye el paso del transporte de carga proveniente del centro y sur del país. Se encarga de unir Ciudad Juárez con la capital del estado, pasando por Villa Ahumada. Si bien circulan tanto camiones de carga como de pasajeros, el tránsito que predomina son los

vehículos particulares (Datos viales SCT, 2018). Ciudad Juárez es el municipio más poblado de la entidad con 1, 391,180 habitantes (INEGI, 2017) con una tasa de crecimiento media anual de 0.92% del 2010 al 2015 y el 65.3% de la actividad económica se concentra en la industria de transformación (IMIP, 2018). Mientras que Villa Ahumada a pesar de ser el municipio con mayor extensión territorial tiene una población total de 12,568 habitantes (INEGI, 2017), la principal actividad económica del municipio es el comercio seguida por la ganadería. Al situarse entre dos ciudades principales del estado el comercio de productos gastronómicos locales representa gran relevancia en la economía local ya que genera empleos directos y fomenta una cadena productiva de lecheros, queseros, tortilleros, ganaderos y agricultores de zonas rurales cercanas (Engie México, 2016).

1.2.2 Alcance

Demostrar los beneficios económicos a largo plazo de los PLD como alternativa contra la reconstrucción de la estructura actual mediante el diseño y el análisis del costo del ciclo de vida del tramo carretero Ciudad Juárez -Villa Ahumada. Mediante información recabada de archivos digitales de agencias gubernamentales como la SCT, el SMN, el INEGI y la CONAGUA.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un PLD con los programas IMT-PAVE 3.0, Per Road 4.4, Street Pave 12 y WinPAS 12 para el tramo carretero Ciudad Juárez (de la glorieta del km 20) - Villa Ahumada para comprobar los beneficios económicos a largo plazo, comparados contra el costo de la reconstrucción del tramo por medio de un Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCCA, por sus siglas en inglés).

1.3.2 Objetivos específicos

- Obtener datos necesarios para elaborar el diseño del pavimento, como: volumen, tipo y tasa de crecimiento del tránsito, propiedades mecánicas de los materiales y datos climatológicos de la región donde se ubica el tramo de estudio.
- Generar, evaluar el diseño de PLD con los programas seleccionados y contrastar con las secciones base.
- Realizar el LCCA para comparar costos de tres alternativas: reconstrucción del tramo con pavimento tradicional, reconstrucción con PLD y construcción del PLD sobre la estructura actual.

1.4 Justificación

Una carretera en mal estado genera mayores costos de operación y circulación peligrosa. Las reparaciones suelen ser costosas y toman tiempo, lo que genera congestionamientos y molestias al usuario sobre todo en carreteras con altos volúmenes de tránsito. El análisis LCCA realizado a la autopista México - Cuernavaca comparando la alternativa de un PLD contra un pavimento rígido arroja que, los costos totales son en promedio 24% mayores con la alternativa de pavimento rígido (Moreno Fierros, 2017). De acuerdo con Moreno (2017) las emisiones en la

etapa inicial de construcción de un pavimento rígido son aproximadamente cinco veces mayores que en el PLD, estructura que cumple con parámetros de sustentabilidad al minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente haciendo un mejor uso de los recursos, disminuyendo el consumo de energía y emisiones de CO₂.

El tramo de estudio registró en un TDPA alrededor de 20,000 vehículos durante el 2018, y forma parte de uno de los 15 corredores o ejes de transporte del país, carreteras por las que circula el mayor porcentaje de pasajeros y cargas de acuerdo con estadísticas básicas de la SCT. La publicación técnica no.409 del IMT (en el año 2014) “Matrices origen-destino (O-D) multi-producto para el autotransporte nacional de carga” señala que por el corredor Querétaro – Ciudad Juárez circula el mayor volumen de toneladas con el mayor costo (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, 2014). Considerando la información anterior se propone, en esta investigación, diseñar el tramo de estudio con un pavimento de larga duración que además ofrece la posibilidad de brindar beneficios económicos a las agencias encargadas de la conservación de las carreteras.

2 Marco teórico

En este capítulo se presentarán conceptos relevantes en el desarrollo de esta investigación. Los tipos de pavimento, métodos de diseño y factores de diseño. Así mismo se explicará el concepto de análisis del costo del ciclo de vida y sus etapas.

2.1 Tipos de pavimentos

Un pavimento es una estructura multicapas de materiales seleccionados y procesados que se colocan sobre la subrasante. La función estructural principal de un pavimento es soportar las cargas aplicadas a la superficie y distribuirlas. El término subrasante se aplica normalmente tanto al suelo in situ expuesto por excavación como al suelo agregado que se coloca para formar los tramos superiores de un terraplén (O'Flaherty, 2002).

Una forma de clasificar los pavimentos es: flexibles, rígidos y compuestos. Los pavimentos rígidos son contruidos con concreto y para su diseño sólo se considera el esfuerzo a flexión. Los pavimentos compuestos están formados por mezcla asfáltica como capa superior y el concreto como capa inferior proporciona una base firme; aunque este tipo de pavimentos es considerado costoso y rara vez es contemplado en una construcción nueva ya que, usualmente son producto de la rehabilitación de pavimentos de concreto. Mientras que los pavimentos flexibles son contruidos con materiales granulares y asfalto (Huang, 2004).

2.1.1 Pavimentos de Larga Duración

El concepto de pavimento de larga duración puede variar de país en país, en el documento Long-Life Asphalt Pavements – Technical versión de la EAPA (2007) se hace un interesante análisis

de esta definición. Se menciona que en Estados Unidos los pavimentos perpetuos están asociados a pavimentos asfálticos gruesos compuestos por tres capas de CA con una duración mayor a 50 años, lo que restringe a este tipo de pavimentos a un cierto diseño. Por otro lado, la ELLPAG en su definición trata de evitar especificar un tiempo de vida. Investigadores han identificado componentes cuantitativos importantes para lograr un desempeño a largo plazo, a continuación, se muestra una tabla que resume los prerequisites, componentes y metas de los pavimentos a largo plazo.

Tabla 8. Requisitos, componentes y metas de un pavimento a largo plazo.

Requisitos	Componentes	Metas
	Diseño	
Suficiente financiamiento	- Vida de diseño	
Conocimiento de las condiciones locales	- Criterio de diseño conservadores	Bajos costos de ciclo de vida
	Especificaciones de desempeño	- Pocas actividades de mantenimiento
- Subrasantes	- Capa superior resistente al desgaste	- Bajos costos de demora
- Volúmenes de tránsito	- Capas resistentes a roderas	- Bajos costos ambientales
- Materiales disponibles	- Base resistente a la fatiga	
	Revestimientos periódicos	

FUENTE: (European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2007)

El concepto de PLD consiste en tener una cimentación sólida, una capa flexible resistente a la fatiga, una capa intermedia duradera y resistente a las roderas (deformación permanente) y una superficie renovable y resistente a las roderas (Mazumder, et al., 2015).

El desempeño de un pavimento depende de la interacción entre la resistencia de las diferentes capas y las respuestas del pavimento. La presión de las llantas genera esfuerzos y deformaciones que suelen provocar daños y deformación permanente en las capas de la estructura. La acumulación de los daños eventualmente se refleja en la superficie en forma de roderas, agrietamiento y aumento de la rugosidad de la superficie. Para prevenir dichas fallas estructurales, se utilizan los criterios de agrietamiento por fatiga y deformación permanente junto con el concepto de daño acumulativo, que influyen en la selección de los espesores y los materiales (Von Quintus, 2001).

La última capa de CA, que algunos autores denominan Fatigue Resistant Layer (FRL) o Rich Bottom Layer (RBL), es en donde se considera más importante medir la resistencia a la fatiga. Esta capa puede ser la de mayor espesor o bien puede utilizarse una mezcla asfáltica de alto módulo, aumentar el contenido de asfalto y reducir el porcentaje de vacíos para disminuir el espesor de la capa. Uno de los principales problemas que puede presentar esta capa es la presencia de humedad; lo cual puede reducirse con una mezcla más densa que a su vez se relaciona con la selección apropiada del tamaño máximo nominal del agregado para facilitar la compactación de la capa (Newcomb & Hansen, 2006) (Mazumder, et al., 2015) (Kollaros & Athanaspoulou, 2017).

La capa intermedia está sujeta a mayores esfuerzos que la capa del fondo, pero no está directamente expuesta al tránsito y el clima. Mientras Newcomb, 2006 comentó que es de menor

espesor que la última capa, Mazumder, et. al 2015 comentó que es la capa de mayor espesor sujeta tanto a esfuerzos de compresión como de tensión. Agregados y asfalto son importante para la resistencia al esfuerzo cortante y la formación de roderas. Newcomb, et. al, 2006 recomienda el uso de mezclas de graduación densa en esta capa. Las roderas pueden ser prevenidas seleccionando el grado PG adecuado para el cemento asfáltico, aunque como la capa no está expuesta directamente a la temperatura del medio ambiente los requerimientos de temperatura puede reducirse un grado (Mazumder, et al., 2015).

La primera capa debe ser capaz de resistir los esfuerzos debidos al tránsito y las condiciones ambientales. Las especificaciones para la superficie de rodamiento dependen del volumen y tipo de tránsito, el clima, la experiencia local y factores económicos. Debe ser resistente a las roderas, al agrietamiento, debe tener buena fricción, mitigar salpicaduras de agua y reducir el ruido debido a ello los requisitos funcionales pueden entrar en conflicto. Por ejemplo, la durabilidad de la capa se puede optimizar utilizando materiales de mejor calidad, ya que los altos costos de los materiales se compensarán con los bajos costos de las medidas de tránsito y del usuario (Asphalt Pavement Alliance (APA), 2010).

Los pavimentos perpetuos o PLD son diseñados para resistir esfuerzos estructurales que comúnmente incluyen agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba y deformación permanente en la superficie de la subrasante. Para evitar este tipo de fallas la estructura se diseña para que las deformaciones horizontales por tensión en el fondo de la capa de CA y las deformaciones verticales por compresión en la superficie de la subrasante se mantenga por debajo de los umbrales de diseño establecidos (Tran, et al., 2016). Las propiedades de los materiales son necesarias para determinar la respuesta teórica de las cargas inducidas en la estructura del pavimento, las cuales se basan en funciones de transferencia que dependen de presiones y deformaciones teóricas. Si estos valores son estimados adecuadamente resultará una estructura de pavimento de un espesor óptimo (Tran, et al., 2016). En el 2016 el National Center of Asphalt Technology (NCAT) presentó el reporte 15-05R sobre la investigación de los valores límites para la fatiga y la deformación permanente que ocurren en el fondo de la estructura del pavimento, con el fin de evitar la práctica de aumentar el espesor del pavimento para garantizar que las respuestas críticas estén por debajo de los umbrales de diseño. El documento menciona las investigaciones realizadas en Inglaterra por Nunn y Ferne que reportan un espesor conservador para la capa de asfalto de 15.4 in el cual se conforma por 10.6 in para prevenir el agrietamiento por fatiga, 4 in para mitigar el agrietamiento de arriba-abajo y 0.8 in adicionales para tener en cuenta el aumento del límite de carga legal en Inglaterra (Tran, et al., 2016).

El concepto del diseño de pavimentos perpetuos es mantener la deformación por tensión en el fondo de la capa de concreto asfáltico tan pequeña que la resistencia a la fatiga de la capa base del CA se vuelve prácticamente infinita (Tarefder & Bateman, 2012). De acuerdo con el reporte 15-05R para evitar el inicio del agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba, las deformaciones en el fondo de la estructura de asfalto deben mantenerse por debajo del umbral de deformación de diseño, que frecuentemente es el límite de resistencia a la fatiga de laboratorio (FEL, Fatigue Endurance Limit, por sus siglas en inglés) de la mezcla de asfalto utilizada en la capa base de CA (Tran, et al., 2016).

Para evitar la formación de roderas estructurales, la deformación o tensión vertical en la parte superior de la subrasante se ha utilizado como parámetro límite de diseño. El FEL puede determinarse en laboratorio con la prueba de fatiga en la viga de flexión (BBFT Bending Beam Fatigue Test, por sus siglas en inglés) o con la evaluación en campo. Del estudio se desprende que hay diferencias notables entre las deformaciones en el fondo de la capa de CA medidas en campo y las predichas por un programa de diseño estructural del pavimento. El FEL varía de un valor conservador de 70 $\mu\epsilon$ a uno más recientemente estimado de 200 $\mu\epsilon$. Mientras que limitar a 200 $\mu\epsilon$ el percentil 50 de la deformación por compresión vertical sobre la subrasante ha sido efectivo (Tran, et al., 2016). En la tabla 9 se resumen los FEL utilizados por diversos autores mencionados en el reporte 15-05R.

Tabla 9. Valores del FEL utilizados por diversos autores.

Autor	Valor del FEL	
	(in/in)	$\mu\epsilon$ ($\epsilon \times 10^{-6}$)
Von Quintus	0.000065	65
Monismith	0.000070	70
Thompson y Carpenter	0.000070 - 0.000100	70 - 100
Prowell et. al	0.000075 - 0.000200	75 - 200
University of Illinois	0.000090 - 0.000300	90 - 300
Nishizawa et. al (Japón)	0.002000	200
Kansas	0.000096 - 0.000158	96 - 158
Yang et. al (China)	0.000125	125
NCAT Willis y Tim	> 0.000100	100

FUENTE: (Tran, et al., 2016)

A continuación, se presenta la tabla con el ajuste de la distribución acumulada de la deformación para controlar el agrietamiento por fatiga.

Tabla 10. Distribución limitante refinada y relaciones máximas de fatiga a la deformación por tensión prevista.

Percentil (%)	Distribución limitante de diseño para la deformación predicha	Relación de fatiga máxima para la deformación prevista
1	29	
5	41	
10	48	
15	54	
20	60	
25	66	
30	71	
35	78	
40	84	
45	91	
50	100	
55	110	
60	120	
65	131	
70	143	
75	158	
80	175	0.68
85	194	0.74
		0.81
		0.88
		0.96
		1.06
		1.18
		1.31

90	221	1.49
95	257	1.73
99	326	2.19

FUENTE: (Tran, et al., 2016).

Newcomb y Hansen, de la National Asphalt Pavement Association (NAPA) presentaron el documento Mix Type Selection for Perpetual Pavements (2016), el cual, se basa en la publicación de García et. al, 2001 de la misma agencia, únicamente Newcomb lo adaptó para PLD. De acuerdo con el documento, Estados Unidos e Inglaterra se encuentran desarrollando estándares de diseño, construcción y mantenimiento para los PLD. Un elemento clave en el diseño de PLD son las diferentes capas de CA y la selección de las mezclas adecuadas de acuerdo con su función. La selección de la mezcla influye en la resistencia a la fatiga, la resistencia a las roderas, la seguridad y la reducción de ruido El tipo de mezcla se selecciona en función del volumen de tránsito y la posición de la capa (Newcomb & Hansen, 2006). El espesor de la capa se define en función del tamaño máximo nominal del agregado y los autores lo modificaron de acuerdo con el reporte 531 de la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Se recomienda que el espesor de la capa sea cuatro veces el tamaño máximo si es una mezcla de graduación gruesa y tres veces, para mezclas de graduación fina. En la tabla 11 se muestran las recomendaciones de los autores.

Tabla 11. Recomendaciones de tipos de mezclas para pavimentos de larga duración.

Capa	Mezcla apropiada			Nivel de tránsito (MESAL)		
	Espesor mm	in	TMN mm (in)	Bajo <0.3	Moderado 0.3<10	Alto >10
Superficie	OGFC					
	25-40	1.0-1.5	12.5 (½)			**
	20-25	0.75-1.0	9.5 (¾)			**
	SMA					
	50-60	2.0-2.5	19 (¾)		*	**
	40-50	1.5-2.0	12.5 (½)		*	**
	25-40	1.0-1.5	9.5 (¾)		*	**
	DCG					
	75- 100	3.0-4.0	19 (¾)			**
	50-60	2.0-2.5	12.5 (½)			**
	40-50	1.5-2.0	9.5 (¾)			**
	DFG					
	60-75	2.5-3.0	19 (¾)	**	**	*
	40-60	1.5-2.5	12.5 (½)	**	**	*
	25-40	1.0-1.5	9.5 (¾)	**	**	*
Intermedia	15-20	0.5-0.75	4.75 (¼)	**	**	*
	DCG					
	100-125	4.0-5.0	25 (1)	**	**	**
	75-100	3.0-4.0	19 (¾)	**	**	**
	DFG					
	75-100	3.0-4.0	25 (1)	**	**	**
Fondo	60-75	2.5-3.0	19 (¾)	**	**	**
	ATPB					
	75-100	3.0-4.0	37.5 (1½)			**
	50-100	2.0-4.0	25 (1)			**
	40-75	1.5-3.0	19 (¾)			**
	DCG					

150-190	6.0-7.5	37.5 (1½)	**	**	**
100-125	4.0-5.0	25 (1)	**	**	**
75-100	3.0-4.0	19 (¾)	**	**	**
<i>DFG</i>					
110-150	4.5-6.0	37.5 (1½)	**	**	**
75-100	3.0-4.0	25 (1)	**	**	**
60-75	2.5-3.0	19 (¾)	**	**	**

TMN = Tamaño Máximo Nominal; OGFC = Carpetas de Fricción de Graduación Abierta; SMA = Stone Mastic Asphalt; DCG = Graduación Densa Gruesa; DCF = Graduación Densa Fina; ATPB = Base Asfáltica Tratada; MESAL = Millones de ESAL; ** = Muy recomendado; * = Recomendado
FUENTE: (Newcomb & Hansen, 2006)

2.2 Diseño de pavimentos

El diseño de un pavimento busca la combinación más económica de capas que asegurará que las presiones y las tensiones transmitidas desde la superficie no excedan la capacidad de soporte de cada capa y de la subrasante, durante la vida de diseño de la carretera. Lo cual requiere evaluar varias estrategias de diseño desarrolladas considerando una amplia variedad de factores. Las principales variables que afectan el diseño de un pavimento son:

- el volumen y la composición del tránsito
- las características y la resistencia de la subrasante
- los materiales económicamente disponibles para su uso dentro de las capas del pavimento
- el espesor de cada capa

El diseño básicamente consiste en proteger el pavimento de esfuerzo y deformaciones excesivos algunos de ellos ocasionados por vehículos muy pesados, los cuales, provocan fallas debido a variaciones en número y localización de los ejes, tipo de suspensión, magnitud de las cargas, así como condiciones ambientales que afectan de diferente forma cada una de las capas del pavimento (O'Flaherty, 2002).

De acuerdo con (Huang, 2004) una metodología general para el diseño de un pavimento comienza conociendo las características de los materiales que se utilizarán en la estructura del pavimento y solamente la configuración de este estará sujeta a iteraciones de diseño. Si se requiere cambiar la configuración y aun así no se logra cumplir con los requerimientos de diseño, puede ser necesario cambiar los materiales lo que lleva a iniciar el ciclo del proceso.

2.2.1 Métodos de diseño

Los métodos actuales para diseñar pavimentos se pueden agrupar en dos categorías muy generales: empíricos y analíticos (o mecanicistas). El término analítico incluye el análisis estructural y la predicción del desempeño a partir de los parámetros calculados. El diseño mecanicista busca no exceder el nivel crítico de tensión o deformación durante la vida de diseño del pavimento, requiere conocer las propiedades ingenieriles de los materiales como: el módulo de rigidez, relacionado con la repartición de la carga, la resistencia a la deformación, relacionada con las roderas y la resistencia a la fatiga, relacionada con el agrietamiento. Por otro lado, los métodos empíricos son los que se han desarrollado a partir de la observación del desempeño de

pavimentos experimentales ya sea en caminos públicos sujetos a cargas de tránsito regulares, o bien, en pistas de pruebas donde las cargas son estrictamente controladas (O'Flaherty, 2002).

Por lo general en los modelos mecanicistas:

- 1) El pavimento y la subrasante son modelados como un sistema elástico lineal multicapas y cada capa es definida con el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.
- 2) La carga de tránsito prevista para el período de diseño se cuantifica en términos de espectros de carga.
- 3) Las tensiones y deformaciones se calculan para una combinación particular de materiales en capas y espesores.
- 4) Los tipos de deterioro habitualmente considerados son el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente.
- 5) La geometría del pavimento se ajusta según sea necesario hasta que la predicción de rendimiento coincida con la carga de diseño factores (O'Flaherty, 2002).

Para el diseño empírico mecanicista utilizando la metodología de la MEPDG el diseño de prueba se basa en la acumulación de daños en función del tiempo y del tránsito de camiones y autobuses. Presenta un enfoque de daño incremental, valorando y acopiando el daño para cada intervalo de análisis. El intervalo abarca un mes y es definido como la unidad básica para estimar el daño incremental. La deformación permanente y el daño por fatiga y por agrietamiento térmico se calculan con las respuestas críticas del pavimento. Para estimar las deformaciones horizontales y verticales a profundidades críticas para cada capa se requieren el tránsito, la temperatura media, y el módulo dinámico (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008). En la tabla 12 se muestran los criterios de diseños o los valores umbrales recomendados utilizados para juzgar la aceptabilidad de un diseño de prueba para un pavimento flexible especificados en la MEPDG 2008.

Tabla 12. Criterios de diseño o valores umbral recomendados para juzgar la aceptabilidad de un diseño de prueba de la MEPDG.

Criterio de desempeño	Valor máximo al final de la vida de desempeño
Agrietamiento de abajo hacia arriba (piel de cocodrilo)	Interestatal:10% del área del carril Primaria:20% del área del carril Secundaria:35% del área del carril
Deformación permanente en el camino de las llantas (roderas profundas)	Interestatal:0.40 in Primaria:0.50 in Otras (45mph):0.65 in
Longitud del agrietamiento transversal	Interestatal:500 ft/mi Primaria:700 ft/mi Secundaria: 700 ft/mi
IRI Índice Internacional de Rugosidad	Interestatal:160 in/mi Primaria:200 in/mi Secundaria: 200 in/mi

FUENTE: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

2.3 Factores de diseño

El pavimento es sometido a esfuerzos, deformaciones y deflexiones cuyos efectos acumulados lo deterioran progresivamente, por lo que es importante establecer las causas de estos deterioros. Se han desarrollado modelos analíticos que evalúan una serie de parámetros en diversas condiciones facultando procedimientos de diseño más completos. Dichos parámetros se pueden dividir en cuatro categorías generales: tránsito y cargas, materiales, clima y criterios de falla los cuales se describen a continuación.

2.3.1 Tránsito y cargas

El tránsito es el factor más importante en el diseño de pavimentos su cálculo debe incluir magnitud, frecuencia y configuración de las cargas. Dentro de este factor se incluyen cargas del eje, el número de repeticiones de las cargas, áreas de contacto de las llantas y velocidad de los vehículos. Su caracterización es compleja dado la variedad de vehículos y cargas actuales (Huang, 2004).

En México una práctica común es convertir el tránsito vehicular a un número de ejes equivalentes sencillos duales de 8 ton para el periodo de diseño, lo que representa utilizar factores de equivalencia ya sea en términos de agrietamiento por fatiga o en términos de magnitud de roderas. Por lo anterior el IMT ha propuesto utilizar el concepto de espectro de carga, el cual se calcula a partir del cociente entre el número de un tipo de eje para cierto nivel de carga y el número total de ejes.

Para fines de diseño el número de ejes a considerar se deberá calcular para el carril de diseño, considerando la distribución vehicular por sentido de circulación y carril. También se pueden considerar las distancias entre ejes y entre llantas, la tasa anual de crecimiento, y el valor de la presión de inflado de las llantas (Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2004).

2.3.1.1 Espectros de Carga

El diseño estructural del pavimento requiere cuantificar todas las cargas esperadas durante la vida de diseño. Puede hacerse de dos maneras: por ejes equivalentes o por espectros de carga. Estos últimos se refieren a caracterizar las cargas directamente por número de ejes, configuración y peso sin convertir a valores equivalentes. Ambos métodos utilizan la misma información, salvo que el cálculo de los espectros de carga es más complejo y puede ser más preciso (Pavement Interactive, 2018). Los espectros de carga representan el porcentaje de las aplicaciones totales del eje dentro de cada intervalo de carga para los ejes sencillo, tandem, tridem y cuádruple. Al utilizar los espectros de carga por eje, se pueden analizar los impactos de las diferentes cargas de tráfico en el pavimento y proporcionar un diseño óptimo de la estructura del pavimento (Jiang, et al., 2008).

2.3.1.2 Ejes Equivalentes de Carga

Los ejes equivalentes de carga definen el daño por el paso en un pavimento del eje en cuestión en relación con el daño por el paso de una carga de eje estándar, generalmente la carga de eje simple de 18 kip (80 kN, 8.2 ton). El diseño se basa en el número total de ejes de carga estándar que circulan durante la vida de diseño, definido como el eje equivalente de carga. Los cuales se

calculan en función de un factor (Equivalent Axle Load Factor, EALF) el cual depende del tipo de pavimento, espesor o capacidad estructural y las condiciones terminales en la cuales se considera que el pavimento fallo. Uno de los métodos para calcular los EALF son las ecuaciones empíricas de la AASHTO 1972, aunque también puede determinarse de forma teórica basándose en esfuerzos y deformaciones críticos. En el método mecanicista de diseño los EALF se determinan a partir de criterios de falla, uno es la deformación por tensión en el fondo de la capa asfáltica (agrietamiento por fatiga) y el otro es controlar la deformación permanente limitando la deformación por compresión vertical en la parte superior de la (Huang, 2004).

A continuación, se muestran las ecuaciones para los criterios de falla agrietamiento por fatiga y deformación permanente, respectivamente (Huang, 2004).

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3}$$

En donde:

f_1, f_2, f_3 = constantes determinadas a partir de pruebas de fatiga en el laboratorio, valores del Instituto del Asfalto: $f_1:0.0796, f_2:3.291, f_3:0.854$

ϵ_t = deformación por tensión horizontal en el fondo de la capa de mezcla asfáltica

E_1 = módulo de elasticidad de la capa de mezcla asfáltica

$$N_d = f_4(\epsilon_c)^{-f_5}$$

N_d = es el número de repetición de cargas límite para deformación permanente

ϵ_c = deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante

f_4, f_5 = constantes determinadas a partir de pruebas en el laboratorio o valores de campo, valores del Instituto del Asfalto: $f_4:1.365 \times 10^9, f_5:4.47$

2.3.2 Caracterización de materiales

Las propiedades de los materiales deben especificarse, de modo que se puedan determinar las respuestas del pavimento, como las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos en los componentes críticos. Estas respuestas se utilizan luego con los criterios de falla para predecir si ocurrirán fallas o la probabilidad de que estas se produzcan.

Las capas de base, subbase y subrasante son componentes estructurales que necesitan proveer suficiente fuerza y reducir esfuerzos a niveles que puedan ser soportados por la subrasante, además de proporcionar drenaje interno mientras previene el ingreso de agua a la subrasante. La teoría mecanicista establece que los materiales granulares presentan un comportamiento elasto-plástico como respuesta a la carga y descarga inducida por el tránsito. El comportamiento elástico se refiere a las deformaciones recuperables, mientras el plástico a las deformaciones permanentes (Papagiannakis & Masad, 2008).

2.3.3 Clima

Los pavimentos están expuestos al medio ambiente, el cual tiene un impacto significativo en su desempeño. El agua, en el pavimento y la subrasante, y los cambios de temperatura causan mayor preocupación. El comportamiento estructural de las capas del pavimento es influenciado por un drenaje adecuado y la posibilidad de predecir las temperaturas. Algunos problemas relacionados con el medio ambiente pueden prevenirse con la apropiada selección de los materiales. La temperatura, la humedad, la precipitación y la radiación solar son datos climáticos importantes en el diseño de pavimentos, con los cuales pueden realizarse modelos matemáticos para estimar su influencia en las capas del pavimento. El módulo de la mezcla asfáltica en caliente depende de la temperatura del pavimento, los módulos de la base, subbase y subrasante varían apreciablemente con el contenido de humedad. La fuerza y el módulo de suelos cohesivos (y materiales granulares con alto porcentaje de finos) son muy sensibles a pequeños cambios de contenido de humedad (Huang, 2004).

2.3.4 Criterios de falla

Las fallas se definen como las manifestaciones de defectos de construcción, así como los efectos perjudiciales del tráfico, el entorno y la interacción. Para la mayoría de los métodos analíticos o mecanicistas de diseño de pavimentos las deformaciones que tiene mayor influencia en el desempeño de los pavimentos son: (1) deformación por tensión horizontal en el fondo de la capa asfáltica, (2) deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante. El primero es utilizado para controlar el agrietamiento de la capa asfáltica y el segundo, está destinado a limitar la deformación permanente de la subrasante y, por lo tanto, en la superficie del pavimento (O'Flaherty, 2002).

Las fallas por fractura y desintegración son las que definen las acciones de mantenimiento y rehabilitación para pavimentos flexibles. La información recaba en campo es fundamental ya que contribuye a establecer las prioridades y estrategias de reconstrucción, rehabilitación y mantenimiento además de contribuir en la predicción del desempeño del pavimento (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2014). En la tabla 13 se muestran tres grupos básicos de fallas de pavimentos flexibles.

Tabla 13. Tipos de fallas para pavimentos flexibles.

Grupo de fallas	Tipo de falla	Ejemplos del mecanismo de falla
Fractura	Agrietamiento	Carga excesiva
		Repetición de la carga (fatiga)
		Cambios de temperatura
		Cambios de humedad
		Deslizamiento (fuerzas horizontales)
	Desprendimiento	Contracción
		Carga excesiva
		Repetición de la carga (fatiga)
		Cambios de temperatura
Deformación	Deformación permanente	Cambios de humedad
		Carga excesiva
		Deformación en función del tiempo (fluencia)
		Compactación
		Consolidación
		Hinchamiento

Defectos		Congelamiento Carga excesiva Compactación Consolidación Hinchamiento
Desintegración	Desprendimiento	Adhesión (perdida de ligante) Reacción química Abrasión por tránsito
	Desintegración y desplazamiento	Adhesión (perdida de ligante) Reacción química Abrasión por tránsito Degradación del agregado Durabilidad del ligante

FUENTE: Mc Cullough 1971, citado en (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2014).

2.3.4.1 Agrietamiento

Se manifiesta de diversas formas lo que permite identificar sus causas. Algunas grietas debidas a la acumulación del desgaste por fatiga aparecen longitudinalmente, siguiendo el camino de las llantas formando un patrón poligonal interconectado semejante a la piel de cocodrilo (Papagiannakis & Masad, 2008). Otras grietas longitudinales ocurren a lo largo de la junta entre dos carriles, originadas por escasa compactación de la junta durante la construcción, o en medio del carril, por tensiones térmicas o asentamiento de la subrasante (Papagiannakis & Masad, 2008). El agrietamiento en los bordes está relacionado con el tránsito y es causado debido a la falta de confinamiento de la subrasante. El agrietamiento transversal está asociado a las bajas temperaturas y sobreviene en intervalos regulares derivado de una tensión térmica mayor a la que el CA puede resistir (Papagiannakis & Masad, 2008). El agrietamiento de bloque se relaciona con las temperaturas bajas y se asemeja al de piel de cocodrilo, salvo que los patrones interconectados son más grandes, y las áreas de cobertura rectangulares son mayores a las trayectorias de las llantas. Este tipo de agrietamiento se presentan en carreteras con bajos volúmenes de tránsito debido al endurecimiento del CA (Papagiannakis & Masad, 2008). Algunos de los tipos de grietas descritos se trasfieren a la superficie de la carpeta de CA superpuesta y se les llaman grietas de reflexión. La severidad del agrietamiento se puede cuantificar como:

- Bajo: abertura de las grietas menor a 6 mm
- Moderado: abertura de las grietas entre 6 mm y 9 mm
- Alto: abertura de las grietas mayor a 9 mm (Papagiannakis & Masad, 2008)

2.3.4.2 Deformación de la superficie

Las roderas son definidas como depresiones longitudinales en la trayectoria de las llantas causadas por la compactación o la deformación plástica del concreto asfáltico, las capas granulares y la subrasante bajo la acción de las cargas. Las roderas son medidas utilizando una regla de 1.2 m colocada sobre cada trayectoria de las llantas.

El empuje se define como el desplazamiento longitudinal de un área localizada de la superficie del pavimento causada por las fuerzas de frenado o aceleración de los vehículos, y generalmente se ubica en colinas, curvas o intersecciones (Papagiannakis & Masad, 2008).

2.3.4.3 Defectos de la superficie

El sangrado se define como la migración del aglutinante a la superficie de la capa de CA. Es causado por la acción del tráfico, las malas propiedades volumétricas de la mezcla en el lugar resultan en vacíos de aire por debajo del estándar. Los áridos pulidos son el resultado de la acción abrasiva de los neumáticos en los agregados de la superficie, a menudo ocurren cerca de las intersecciones (Papagiannakis & Masad, 2008).

El arrastre es el desplazamiento y la pérdida de agregados de la superficie del CA, que progresa hacia abajo. Es causado por una mala adherencia entre los agregados y el aglutinante asfáltico debido a las grandes cantidades de finos en las reservas de agregados, el secado deficiente de los agregados en la planta de mezcla en caliente, la segregación y la mala compactación in situ durante la construcción. Una variación de esta falla se denomina extracción, donde la pérdida de enlace entre el agregado y el aglutinante se inicia en la parte inferior del concreto asfáltico y avanza hacia arriba. Su causa es la incompatibilidad química entre aglutinante-agregados y un drenaje inadecuado (Papagiannakis & Masad, 2008).

2.4 Programas de diseño

2.4.1 Programa IMT-PAVE 3.0

Este programa fue desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte y está basado en una metodología empírico-mecanicista, que utiliza el concepto de espectros de carga y el análisis de esfuerzos y deformaciones que pudiera presentar la estructura del pavimento, así como su relación con los daños por fatiga y deformación permanente. Utilizando como datos de entrada: los espesores de cada capa, las propiedades de los materiales y el nivel del tránsito vehicular. El programa tiene cuatro secciones: tránsito, espectros de carga, análisis espectral y análisis probabilista. La figura 3 muestra la pantalla de inicio del programa.



Figura 3. Pantalla de entrada del programa IMT-PAVE 3.0

Los datos de carga se definen con espectros de carga representativos de la red carretera mexicana divididos en cuatro niveles (figura 4): legal, ligera sobrecarga, alta sobrecarga y muy alta sobrecarga, hay una quinta opción que permite elaborar los espectros con información propia.

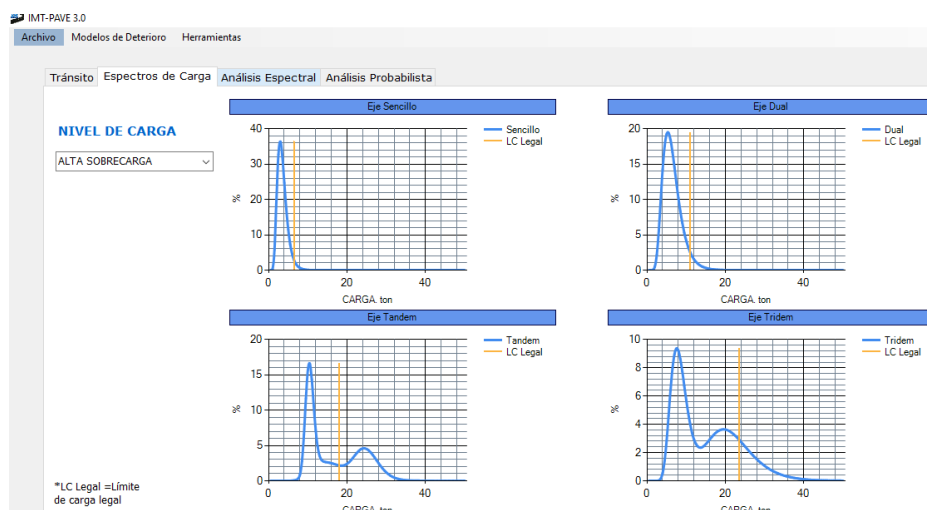


Figura 4. Espectros de carga del programa IMT-PAVE 3.0 con el nivel de alta sobrecarga.

Las respuestas estructurales en el pavimento se calculan considerándolo como un medio multicapas, apoyándose en la teoría de elasticidad, con simplificaciones necesarias para su cálculo eficiente. A partir de esto se busca predecir el desempeño del pavimento basándose en los criterios de falla (Garnica, et al., 2016).

De acuerdo con (Garnica, et al., 2016) la metodología del programa se basa en cuatro postulados: Primero, “la sección estructural del pavimento se considera como un conjunto de capas de diversos materiales y determinado espesor, caracterizadas por un módulo elástico, dinámico o resiliente”; Segundo, “las cargas que transmiten los vehículos se determinan con espectros de carga”; Tercero, “cada tipo de deterioro se presentará cuando el número de repeticiones de carga acumulado iguale al número de repeticiones de carga admisible” y Cuarto, “para que la sección sea adecuada debe cumplir con los criterios de deterioro” (Garnica, et al., 2016).

2.4.2 Programa Per Road 4.0

Fue desarrollado por David Timm en Alabama, Estados Unidos para el National Center for Asphalt Technology (NCAT) de la Universidad de Auburn en conjunto con el Asphalt Pavement Alliance (APA), el National Asphalt Pavement Association (NAPA) y el State Asphalt Pavement Associations (SAPAs). Utiliza el análisis elástico de capas combinado con el análisis estadístico de Monte Carlo para determinar esfuerzos y deformaciones en el pavimento. Incluye dos módulos: el input, que solicita los datos de la estructura y de los espectros de carga y el output, que arroja los resultados. El programa cuenta con la opción de seleccionar la capa y la posición en que se analizaran las deformaciones o los esfuerzos, así como establecer valores umbrales para evaluar el desempeño de la estructura. La figura 5 muestra la pantalla de entrada al programa.



Figura 5. Pantalla para ingresar al programa Per Road 4.0

La capa de concreto asfáltico dispone de la opción para seleccionar el grado PG del asfalto, si se marca la casilla de corrección por temperatura del módulo de la mezcla éste es modificado, de lo contrario, se puede trabajar con un valor propio. Por lo general se agregan criterios para controlar la fatiga y la deformación permanente. Se pueden instaurar los criterios de desempeño por capa, el umbral de falla por fatiga se establece controlando la tensión horizontal en el fondo de la última capa de mezcla asfáltica y el umbral para deformación permanente se controla monitoreando la compresión vertical en la parte superior de la subrasante. Los PLD tienen como objetivo controlar estos dos criterios restringiendo las fallas a la capa superficial del pavimento para prolongar su vida de diseño.

General Traffic Data		% Trucks		% Trucks in Design Lane		% Input Load Spectra by Vehicle Type	
Two-Way AADT	43714	14.7	90				
Axles Groups / Day	6473	3.94	50				

Current Axle Load Distribution	
Axle Wt. kip	% Axles
0-2	0.39
2-4	0.24
4-6	0.13
6-8	0.06
8-10	0.05
10-12	0.04
12-14	0.03
14-16	0.01
16-18	0
18-20	0
20-22	0
22-24	0

Roadway Functional Classification	
Rural Interstate	

Vehicle Classification		% AADTT	
4	23.64		
5	51.36		
6	5.48		
7	0.515		
8	0.515		
9	10.95		
10	5.82		
11	0.515		
12	0.515		
13	0.69		
Total	100		

Average Number of Axles Per Vehicle		
Single	Tandem	Tridem
1.62	0.39	0
2	0	0
1.02	0.99	0
2.38	0.67	0
1.13	1.93	0
1.19	1.09	0.89
4.29	0.26	0.06
3.52	1.14	0.06
2.15	2.13	0.35

Figura 6. Pantallas para ingresar la información del tránsito en el programa Per Road 4.0.

2.4.3 Programa Street Pave 12

Programa desarrollado por la ACPA para el diseño de pavimentos de concreto basado en la metodología de la Portland Cement Association (PCA, por sus siglas en inglés). Ofrece la posibilidad de calcular los espesores requeridos y los costos para pavimentos de concreto y de asfalto y compararlos a través de un LCCA. Los valores de entrada incluyen información del

proyecto, tránsito el cual se divide en categorías en función del tipo de vialidad y brinda la opción de elaborar el espectro de tránsito con datos propios, los parámetros para el diseño incluyen la confiabilidad, el índice de servicio final y el módulo resiliente de la subrasante. La figura 7 muestra el inicio del programa.

The screenshot shows the 'StreetPave 12' application window. It has a menu bar with 'File', 'Units', 'About', and 'Check for Updates'. Below the menu is a 'Project' tab. The main area is divided into two sections: 'Project Information' and 'Software Use'. In the 'Project Information' section, there are input fields for 'Project Name' (containing 'diseño de PLD'), 'Route' (containing 'Ciudad Juárez - Villa Ahumada'), 'Location' (containing 'Chihuahua'), 'Owner / Agency', and 'Design Engineer'. To the right of these fields is a large 'Project Description' text area. The 'Software Use' section contains a dropdown menu labeled 'Select a design or analysis option' with a list of options: 'Design a new jointed plain concrete pavement', 'Design a jointed plain concrete overlay', 'Analyze an existing jointed plain concrete pavement or overlay', and 'Conduct a life cycle cost analysis (LCCA)'.

Figura 7. Pantalla para iniciar con la introducción de datos en el Street Pave.

El programa cuenta con ayuda para obtener los valores del tránsito y los parámetros de diseño. Para el diseño del pavimento flexible tiene tres opciones: concreto asfáltico full depth, concreto asfáltico de 6 pulgadas de espesor sobre una base granular y concreto asfáltico de 12 pulgadas de espesor sobre una base granular. Considera la temperatura media del aire, en la opción de ayuda muestra un mapa de Estados Unidos dividido en tres regiones, cada una con una temperatura promedio. Utiliza un M_R de diseño para la subrasante en función de un coeficiente de variación. El programa proyecta como resultados los espesores óptimos y los ejes equivalentes para cada tipo de pavimento.

2.4.4 Programa WinPAS 12

Este programa está diseñado para analizar sistemas de pavimento utilizando la guía AASHTO 1993. Cuenta con la opción de contrastar alternativas de pavimentos mediante un LCCA además de diseñar y analizar sobre capas de asfalto o concreto. El módulo para estimar los ejes equivalentes permite hacerlo en función del tipo de eje, el tipo de vehículo o la cantidad de camiones y autobuses. El programa cuenta con opciones de ayuda para obtener las variables con su debida justificación; además de la pestaña de ayuda general que brinda acceso al manual del usuario.

El diseño del pavimento flexible requiere los valores de: el índice de servicio final e inicial, la confiabilidad, la desviación estándar y el M_R de la subrasante para calcular el SN empleando el criterio ASSHTO 1993; el cual requiere el espesor, el coeficiente de cada capa y el coeficiente de drenaje. Los coeficientes indican la contribución de las capas a la capacidad estructural del pavimento. Esta opción verifica si los datos colocados cumplen con el SN requerido. El programa permite ajustar el espesor de las capas para optimizar el diseño.

El programa brinda la opción de seleccionar el sistema de unidades (inglés o métrico) con el que se va a trabajar, es importante definirlo antes de iniciar con el diseño. La pantalla inicial expone los módulos que incluye el programa, se siguió el orden de izquierda a derecha para el análisis. El módulo de datos generales del proyecto es opcional (figura 8).

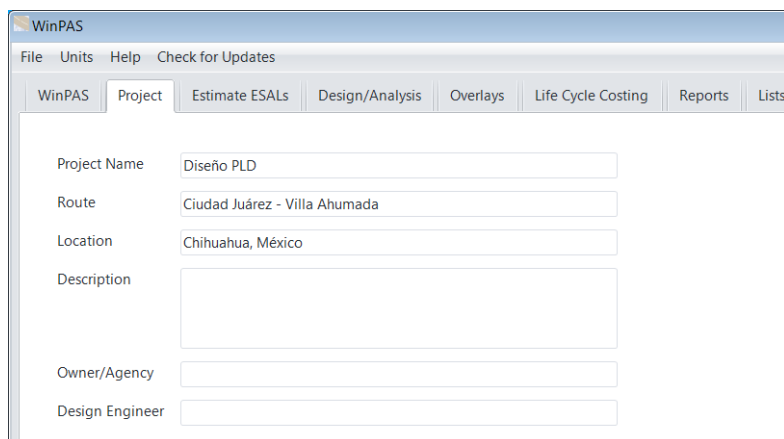
The image shows the WinPAS software interface. At the top is a menu bar with 'File', 'Units', 'Help', and 'Check for Updates'. Below the menu bar is a tabbed interface with tabs for 'WinPAS', 'Project', 'Estimate ESALs', 'Design/Analysis', 'Overlays', 'Life Cycle Costing', 'Reports', and 'Lists'. The 'Project' tab is currently selected. It contains several input fields: 'Project Name' with the text 'Diseño PLD', 'Route' with 'Ciudad Juárez - Villa Ahumada', 'Location' with 'Chihuahua, México', 'Description' (an empty text area), 'Owner/Agency' (an empty text field), and 'Design Engineer' (an empty text field).

Figura 8. Pantalla de inicio del WinPAS

En el módulo para estimar los ESAL (ejes equivalentes) se convierten los datos de tránsito de acuerdo con el método AASHTO. El programa cuenta con la opción de que el diseño se base en el tránsito total o bien en el del carril de diseño; si se selecciona la opción del tránsito total se deben especificar los porcentajes direccional y del carril de diseño, valores que también son basados en el método AASHTO.

El programa también cuenta con la opción de realizar el LCCA, solicita información general como periodo de análisis, tasa de descuento (tasa de interés e inflación), datos de costos iniciales y futuros para la agencia (mantenimiento y operación y conservación y rehabilitación), costos para el usuario. Con los datos capturados el programa calcula el valor de rescate.

2.5 Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCCA)

Las decisiones relacionadas con implementar mejoras en cuestiones de transporte generalmente requieren considerar varias alternativas. Son diversos los factores que contribuyen en la selección de una opción, aunque los costos iniciales del proyecto generalmente son un factor decisivo. El análisis del costo del ciclo de vida (LCCA) es una técnica de evaluación para la toma de decisión de inversión en transporte. Específicamente, cuando se ha decidido que el proyecto será implementado, el LCCA ayudará a determinar la mejor y más económica forma de realizar el proyecto. El enfoque LCCA permite comparar costos totales de alternativas de diseño (o conservación). Todos los costos relevantes que se produzcan a lo largo de la vida de diseño de una alternativa, no simplemente los costos originales, son incluidos. Además, los efectos de las actividades de construcción y mantenimiento en los usuarios, así como los costos directos a la compañía constructora, también son representados.

El LCCA parte del desarrollo de las actividades requeridas para el proyecto. El analista define el calendario de actividades iniciales y futuras involucradas en la implementación de cada alternativa de proyecto de diseño. En seguida, los costos de estas actividades son estimados. El LCCA recomienda no sólo incluir los gastos directos de la compañía (por ejemplo, actividades de construcción o mantenimiento), sino también los costos para los usuarios de las instalaciones producto de la ejecución de dichas actividades. El calendario previsto de actividades y los costos para la compañía y el usuario forman el costo del ciclo de vida del proyecto. Usando una técnica económica conocida como “descuento” estos costos se convierten al valor presente neto y se suman para cada alternativa (Federal Highway Administration, 2002).

No precisamente la opción más baja del LCCA debe ser implementada también se deben considerar los riesgos, el presupuesto disponible y los aspectos políticos y ambientales. El LCCA proporciona información crítica para el proceso de toma de decisiones, pero no es la respuesta final (Federal Highway Administration, 2002).

Etapas del LCCA:

- 1.- Establecer alternativas de diseño
- 2.- Determinar los tiempos de las actividades
- 3.- Estimar costos (compañía y usuarios)
- 4.- Calcular los costos del ciclo de vida
- 5.- Analizar los resultados

La vida útil para el diseño inicial del pavimento y las actividades de rehabilitación posteriores tienen un gran impacto en los resultados de LCCA. La frecuencia con que la agencia interviene en las instalaciones de la carretera afecta directamente en los costos de la agencia y los costos del usuario durante las actividades de mantenimiento. Los requisitos de la zona de trabajo para la construcción inicial, el mantenimiento y la rehabilitación afectan directamente los costos del usuario y deben estimarse junto con el desarrollo de la estrategia del pavimento. La frecuencia, la duración, la gravedad y el requisito de zona de trabajo anual son factores críticos en el desarrollo de los costos del usuario (Federal Highway Administration, 2002).

3 Metodología

Para evaluar los beneficios de un PLD es necesario realizar su diseño. Previo al diseño se investigó el tipo y forma de los datos de entrada requeridos por los programas para pavimentos: IMT-PAVE 3.0, Per Road 4.4, Street Pave y WinPAS, así como el alcance que proveen dichos programas; posteriormente se recopiló la información de entrada necesaria para los diferentes programas considerados a emplearse en el diseño del PLD para el tramo carretero Ciudad Juárez - Villa Ahumada: tránsito, materiales y clima; enseguida, se realizó el diseño del PLD con cada programa y; finalmente, se realizó una comparativa de costos debido a reparaciones y

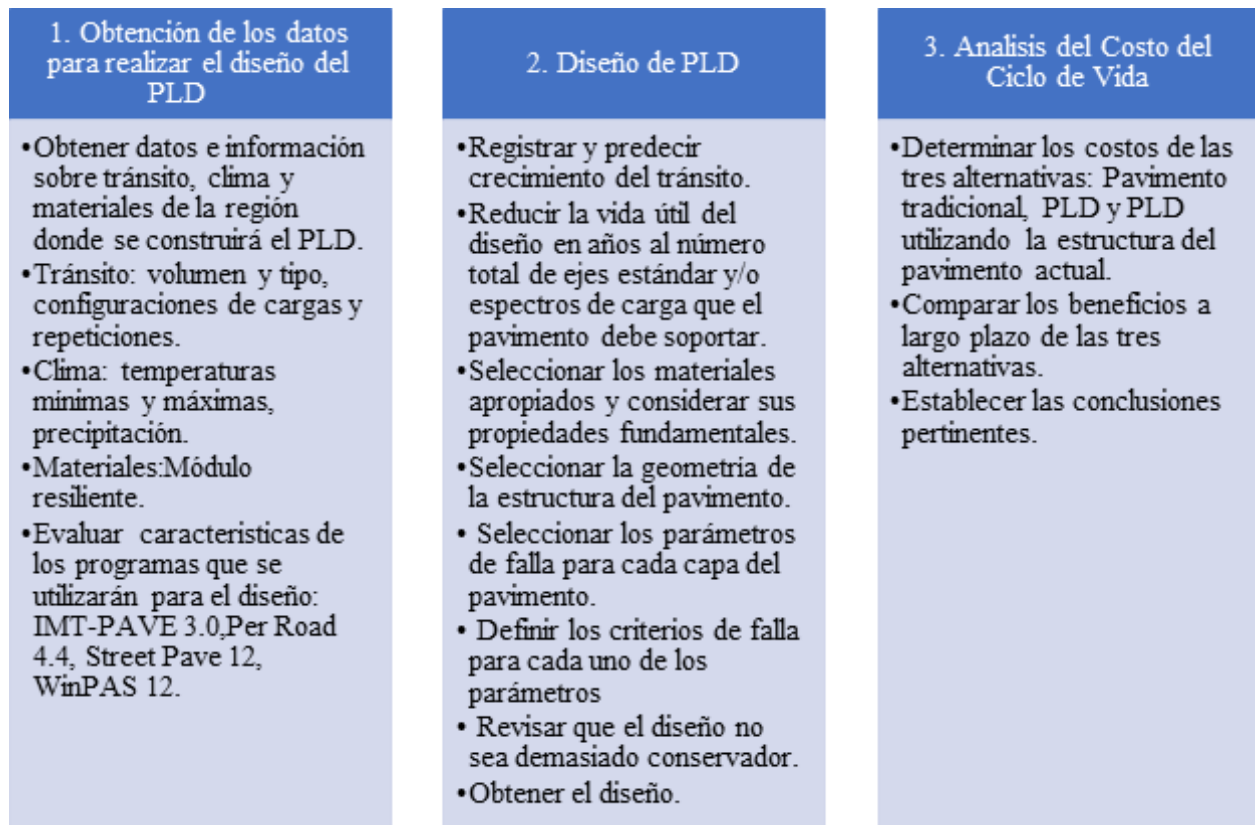


Figura 9. Metodología general

mantenimiento del pavimento tradicional respecto al PLD.

3.1 Obtención de datos necesarios para elaborar el diseño del PLD mediante el uso de varios programas

Para analizar las características de cada programa, se elaboró una tabla con los datos de entrada como: tránsito, cargas, clima, características de los materiales y fallas o deterioros; así como accesibilidad y ventajas y desventajas de cada uno.

Posteriormente, se procedió a la obtención de datos:

1. Tránsito: volumen y tipo.
2. Materiales: propiedades básicas de los materiales: módulo dinámico de la mezcla asfáltica y módulo resiliente de la base y subrasante.
3. Clima: precipitación y temperaturas mínimas y máximas.

3.1.1 Tránsito

Los datos de tránsito (volumen y tipo) se obtuvieron de los archivos digitales de datos viales de la SCT, los cuales están disponibles a partir del año 2003, se dividen por estado y estos a su vez por tramos federales y estatales tanto de cuota como libres. Los datos indican el kilómetro, el tipo de estación, el sentido de circulación, la clasificación vehicular, el factor direccional, el factor K' para determinar el volumen horario de proyecto y las coordenadas donde se ubica el equipo de aforo automático. Considerando datos del 2003 al 2018 se determinó el tránsito para el carril de diseño y la tasa de crecimiento realizando un promedio del porcentaje de crecimiento anual del TDPA de todos los tipos de vehículos durante el periodo de análisis. Los datos del TDPA correspondientes al 2012 se obtuvieron con una regresión lineal debido a que en ese año el aforo fue de velocidad. El programa Per Road requiere la tasa de crecimiento de los autobuses y camiones únicamente, para su cálculo se utilizó la ecuación 1 (método geométrico).

$$r = \left(\frac{TDPA_f}{TDPA_i} \right)^{1/n} - 1 \quad (1)$$

Donde:

r = tasa de crecimiento

$TDPA_f$ = Tránsito Diario Promedio Anual al final del periodo de análisis

$TDPA_i$ = Tránsito Diario Promedio Anual inicial

n = tiempo entre los TDPA analizados

Para obtener el tránsito de los vehículos pesados necesario para dimensionar y definir las características del pavimento se convierte el TDPA a ejes equivalentes para este cálculo se utilizaron las fórmulas del CSEP y la fórmula del método AASHTO 1993 para pavimentos flexibles.

La fórmula del CSEP se define con la ecuación 2, la cual pide un coeficiente de daño en función del tipo de vehículo, para calcular este coeficiente se utilizaron los factores de equivalencia de carga del eje (EALF Equivalent Axle Load Factor) del Instituto del Asfalto.

$$\Sigma EE = TD * Cd * CD * Ci \quad (2)$$

Donde:

ΣEE = Suma de ejes sencillos equivalentes de 8.2 t, esperados en el horizonte de proyecto

TD = Tránsito de diseño

Cd = Coeficiente de daño (en función del tipo de vehículo)

CD = Coeficiente de distribución por carril (en decimales)

Ci = Coeficiente de distribución direccional

El CD está en función del número de carriles en cada sentido. Para el tramo de estudio, se consideró 90% de EE en el carril de diseño de acuerdo con lo estipulado en la metodología de la guía AASHTO 1993. Respecto al coeficiente de distribución direccional, los datos de TDPA están indicados por sentido de circulación el valor del coeficiente para este caso es de uno.

La ecuación para calcular el tránsito de diseño proyectado a futuro es la siguiente:

$$TD = TDPA_{actual} \times CT \quad (3)$$

Donde:

TD = Tránsito de diseño

TDPA_{actual} = Último dato registrado del Tránsito Diario Promedio Anual

CT = Coeficiente de acumulación del tránsito

Para el cálculo del tránsito de diseño se utilizó el coeficiente de acumulación del tránsito el cual, a su vez, utiliza la tasa de crecimiento y el horizonte de proyecto. Para este trabajo se consideraron 40 años para el periodo de diseño del PLD, siguiendo las pautas de la guía AASHTO 93 para carreteras de altos volúmenes.

$$CT = 365 \left[\frac{(1 + TC)^n - 1}{TC} \right] \quad (4)$$

En donde:

TC = Tasa de crecimiento, en decimales

n = Número de años de servicio (horizonte de proyecto)

Para el coeficiente de daño se obtuvo el EALF para cada tipo de eje: sencillo, tandem y tridem. Se hizo una gráfica de regresión lineal de la cual se desprenden las ecuaciones 5, 6 y 7.

$$\text{Eje sencillo : } y = 2x10^{-17}x^{3.912} \quad (5)$$

$$\text{Eje tándem : } y = 8x10^{-19}x^{3.9937} \quad (6)$$

$$\text{Eje trídem : } y = 7x10^{-20}x^{4.0939} \quad (7)$$

Una vez que se adquirió toda la información necesaria se sustituyeron los términos en la ecuación 2 y se realizó el cálculo de los EE.

Con la finalidad de estimar las condiciones actuales y el tránsito que circula por la carretera del tramo de estudio se calcularon los EE con la ecuación AASHTO 1993 (ecuación 8) y el número estructural se obtuvo con la ecuación 9. Se realizó el mismo procedimiento anterior para calcular

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.0 \quad (8)$$

los EE para una sección estructural típica para un pavimento de larga duración en Texas.

Donde:

Z_R = Desviación estándar normal

S_0 = Desviación estándar

SN = Numero estructural

ΔPSI = Diferencia entre el índice de servicio inicial P_o y el índice de servicio final P_t

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (9)$$

M_R = Módulo de resiliencia de la subrasante

Donde:

a = Coeficiente estructural de la capa

D = Espesor de la capa (en pulgadas)

m = Coeficiente de drenaje de la capa

3.1.2 Materiales

Para los modelos estructurales de los materiales se requieren el módulo dinámico (M_D) de la mezcla asfáltica y el módulo resiliente (M_R) de la base y la subrasante, los cuales suelen variar según la temperatura y la humedad. Para obtener el M_R se realizó una correlación con las propiedades índice del material base de la estructura actual, de acuerdo con información del apéndice CC-1 Correlación de los valores de CBR con las propiedades índice del suelo que forma parte del documento Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures de la NCHRP.

De acuerdo con el apéndice CC-1, la información necesaria para correlacionar las propiedades índice del suelo con el CBR, y este a su vez con el M_R , es la distribución granulométrica y los límites de Atterberg para clasificar el material con el método del Sistema Unificado de Calcificación de Suelos (SUCS) o ASSHTO. Las propiedades índice seleccionadas para la correlación son los valores del D_{60} , P_{200} y el Índice de Plasticidad (IP). Para materiales con un $IP > 0$ se utiliza wIP el cual se obtuvo con la ecuación 10.

$$wPI = P_{200} \times IP \quad (10)$$

Donde:

P_{200} = Suelo que pasa la malla 200, en decimales

IP = Índice de plasticidad en porcentaje

La ecuación para correlacionar el CBR depende del tipo de material, el cual se divide en dos grupos:

- a) Materiales gruesos, limpios y sin plasticidad tales como: GW, GP, SW y SP para los cuales $wIP = 0$
- b) Suelo con un contenido de finos mayor de 12% y presenta plasticidad como: GM, GC, SM, SC, ML, MH, CL y CH para los cuales $wIP > 0$

Para el primer tipo de suelos, se correlaciona el CBR con el D_{60} obtenido de la curva granulométrica y se utiliza la ecuación 11

$$CBR = 28.09 (D_{60})^{0.358} \quad (11)$$

D_{60} = de la curva granulométrica diámetro que pasa al 60%, en mm

Esta ecuación está limitada a valores de D_{60} mayores de 0.01 mm y menores de 30 mm. Para D_{60} menores a 0.01 mm el valor recomendado para el CBR es 5. Para valores mayores de 30 mm el valor recomendado para el CBR es 95.

Para el grupo segundo grupo se utilizan el porcentaje de suelo que pasa la malla 200 y el índice de plasticidad, estas propiedades están combinadas en el parámetro wIP y la correlación es presentada en la ecuación 11.

$$CBR = \frac{75}{1 + 0.728(wIP)} \quad (12)$$

La tabla 14 muestra los rangos de valores típicos para CBR y M_R y el valor típico para el M_R de acuerdo con la clasificación SUCS.

Las muestras de carpeta asfáltica y terracería se obtuvieron realizando sondeos en el acotamiento del tramo. Se tomaron núcleos de la carpeta asfáltica y del sondeo, se tomó material de la base hasta una profundidad de 30 cm. La muestra de terreno natural se tomó de un sondeo aparte, aproximadamente a 2 m de distancia del final del acotamiento de la carretera; se efectuó una excavación de 1.5 m de profundidad. Se llevaron las muestras al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) en donde se efectuaron pruebas de granulometría y límites de Atterberg a las muestras de la base y el terreno natural.

De las muestras de carpeta asfáltica se determinó: contenido de asfalto, granulometría y valores de estabilidad y flujo. Para determinar el contenido de asfalto se lavó cada muestra de mezcla asfáltica en una máquina extractora electrónica de velocidad controlada, una vez que el material quedó limpio se colocó en el horno por 24 horas, pasado ese tiempo se pesó el material y por diferencia de pesos se obtuvo el contenido de asfalto. Con el material lavado y seco, se realizó granulometría utilizando las mallas 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200. Primero, se pasó el material a través de las mallas de mayor abertura hasta llegar a las de menor abertura, se obtuvo la masa retenida en cada malla, se calculó su porcentaje respecto al total y se definió el porcentaje que pasó por cada malla.

Tabla 14. Clasificación SUCS.

Clasificación SUCS	Rangos típicos de CBR	Rango de M_R (ksi)	M_R valor típico (ksi)
CH	1-5	2.5-7	4
MH	2-8	4-9.5	6
CL	5-15	7-14	9
ML	8-16	9-15	11
SW	20-40	17-28	21
SP	15-30	14-22	17
SW-SC	10-25	12-20	15
SW-SM	15-30	14-22	17
SP-SC	10-25	12-20	15
SP-SM	15-30	14-22	17
SC	10-20	12-17	14
SM	20-40	17-28	21
GW	60-80	35-42	38
GP	35-60	25-35	29
GW-GC	20-60	17-35	24
GW-GM	35-70	25-38	30
GP-GC	20-50	17-32	23
GP-GM	25-60	20-35	26
GC	15-40	14-28	20
GM	30-80	22-42	30

FUENTE: Apéndice CC-1 Correlación de los valores de CBR con las propiedades índice del suelo, 2001

Para la siguiente prueba, de las muestras de carpeta asfáltica, utilizando un taladro con una broca cilíndrica se obtuvieron pastillas de 10.16 cm de diámetro. Después, se pesaron, se cubrieron con parafina y una vez que se enfriaron, se pesaron nuevamente al aire y sumergidas, para después colocarlas en baño maría por 30 min y pasado ese lapso, se ensayaron para obtener la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica.

3.1.3 Clima

Concerniente a los datos del clima se consultaron las páginas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), CLICOM e INEGI para recabar información sobre temperaturas máximas y mínimas promedio, así como datos de precipitación, procurando que la información fuera actual y cercana al sitio de estudio.

De manera general y de acuerdo con el INEGI, en el estado de Chihuahua hay tres climas predominantes: muy seco (aproximadamente el 40% del territorio estatal), seco y semiseco (33%) y templado subhúmedo (24%). Por lo anterior los datos obtenidos se clasificaron por estación y por tipo de clima con la finalidad de obtener precipitación y temperaturas mínimas y máximas promedio para cada uno.

3.2 Diseño de PDL

Para el diseño con los programas IMT-PAVE 3.0 y Per Road 4.4 se iniciaron las iteraciones con seis estructuras base de pavimento; seis combinaciones de grado PG, cuatro combinaciones de módulos dinámicos del CA y dos opciones de módulo resiliente para la base, los arreglos de las estructuras utilizadas se muestran en la tabla 32. De las iteraciones realizadas con las estructuras base se modificaron los espesores y los módulos buscando la combinación con los menores módulos y un espesor mínimo de CA de 20 cm que cumpliera con los criterios de falla. Se eligieron tres secciones evaluadas con el IMT-PAVE las cuales se corrieron con el programa Per Road y viceversa. Las secciones también se compraron en función de su precio por metro cuadrado para considerar el factor económico en la selección de la estructura. Únicamente la sección elegida para el diseño final se evaluó con los programas Street Pave y WinPAS.

3.2.1 IMT-PAVE 3.0

Primero se trabajó con el programa IMT-PAVE3.0, por ser de libre uso y con el que mejor empataban los datos de tránsito.

Para iniciar se analizaron seis estructuras base; tres de Nuevo México ((Tarefder & Bateman, 2009) y (Tarefder & Bateman, 2012)), dos de Ohio ((Qin, 2010) y (Sargand, et al., 2015)) y una de Texas (Walubita, et al., 2010) que fueron construidas y actualmente es monitoreado su desempeño. Utilizando espesores y módulos utilizados por los autores. Para el módulo de la base y la subrasante se utilizaron los obtenidos con los datos de lugar. Se corrieron iteraciones con dos estructuras propuestas utilizando los valores de los módulos de las estructuras mencionadas y además considerando los módulos de las estructuras de PLD construidas en México.

Finalmente, se ejecutó el análisis utilizando el modelo de deterioro del IMT, que arroja la vida por fatiga y deformación en años las cuales deben ser mayores al horizonte del proyecto. Se

realizaron 215 iteraciones para encontrar el diseño óptimo con la sección de menor número de capas, con el menor espesor y los menores módulos.

3.2.2 Per Road 4.4

El siguiente programa con el que se trabajó fue el Per Road 4.4. Se eligió este como segundo porque es específicamente para el diseño de PLD.

Concerniente a la información del tránsito, se empataron los tipos de vehículos con la clasificación de la Federal Highway Administration (FHWA, por sus siglas en inglés) que es la utilizada por el programa, también se calculó la tasa de crecimiento para los camiones únicamente y se especifica el tipo de carretera que se está diseñando. Los espectros de carga son calculados por el programa en función de los datos de tránsito ingresados.

La primera iteración de prueba se realizó con la sección estructural típica para PLD de Texas, se ajustó el número de capas ya que este programa sólo permite cinco capas en total por lo que, tres capas corresponden a diferentes mezclas asfálticas, una capa corresponde a la base y la última capa a la subrasante. En estructuras con más de cinco capas, se fusionaron las capas con características similares.

El análisis se ejecuta por medio de una simulación Monte Carlo, el programa emplea por default 5000 ciclos que pueden ser modificados. Se realizaron 246 iteraciones con la finalidad de ajustar los materiales, espesores y criterios de desempeño buscando la combinación que resulte en la estructura más esbelta pero que cumpla con las especificaciones de un PLD. Para los criterios de desempeño se seleccionaron la deflexión para la primera capa de concreto asfáltico; la tensión horizontal en el fondo de la última capa de concreto asfáltico, utilizando la distribución propuesta por Tran et. al y la deformación permanente controlada en la superficie de la subrasante utilizando el valor de $200 \mu\epsilon$ de acuerdo con la revisión de literatura.

3.2.3 Street Pave

Al ser distribuidos por la ACPA, los programas Street Pave y WinPAS están principalmente enfocados a pavimentos de concreto, lo que hace que la requisición de datos para pavimentos flexibles sea un poco menos detallada en lo referente a datos estructurales. Para el cálculo de los espectros de carga el programa Street Pave cuenta con la opción de introducir los datos. Se utilizaron los porcentajes de los espectros de carga del programa IMT-PAVE 3.0 representativos de las carreteras mexicanas. Respecto a los datos de entrada solicitados en el diseño, para la temperatura media del aire se seleccionó la correspondiente con la ubicación del tramo de estudio; para el valor de índice de servicio final se utilizó el valor estimado sugerido (para carreteras) por el programa. Para el coeficiente de variación del módulo resiliente (M_R) de la subrasante el programa sugiere un rango entre 0.38 y 0.45, se utilizaron el promedio del rango y el valor menor para verificar su influencia en el espesor del concreto asfáltico y como valor de M_R se utilizó el obtenido de las muestras del terreno natural del tramo.

3.2.4 WinPAS

Con el programa WinPas además de la estructura producto del análisis del programa también se consideraron las estructuras seleccionadas con los programas IMT-PAVE y Per Road, utilizando los datos de tránsito disponibles pero adaptados a las demandas del programa.

Los ESAL pudieron determinarse con: los datos de ejes, los datos de tipo de vehículos o por el factor de camión. En este caso, se probaron las tres configuraciones para cotejar la variación en los resultados de los ESAL y en el diseño.

Con el módulo diseño / evaluación el programa analizó los nuevos diseños valiéndose de las ecuaciones de la guía AASHTO 1993. Una vez calculado el SN, se determinaron los espesores de las capas, otorgando un SN a cada capa, que al sumarlos excedieron o igualaron el valor del SN calculado con la ecuación AASHTO. Se obtuvo un SN para cada estructura.

3.3 Comparativo de costos del PLD y costos de la reconstrucción del tramo mediante el LCCA

Para el análisis de este proyecto se consideró el documento análisis del costo de ciclo de vida de la ACPA, y se utilizaron cinco etapas:

1. Definición del periodo de análisis
2. Selección de la tasa de descuento real
3. Costos para la agencia
4. Costos para el usuario
5. Comparación de las alternativas

El proyecto analiza el tramo carretero Ciudad Juárez – Villa Ahumada, comparando un pavimento flexible tradicional y un pavimento flexible de larga duración, para un periodo de diseño de 40 años. En la primera etapa se definió el periodo de análisis, la ACPA recomienda un periodo de 45 años a 50 años para que al menos una rehabilitación mayor sea considerada para cada alternativa.

Como segunda etapa se calculó la tasa de descuento real con la siguiente ecuación:

$$d = \frac{1 + i_{int}}{1 + i_{inf}} - 1 \quad (13)$$

Donde:

d = tasa de descuento real, %

i_{int} = tasa de interés, %

i_{inf} = tasa de inflación, %

La tercera etapa consistió en estimar los costos iniciales y finales para la agencia, tomando en cuenta que el LCCA únicamente requiere la estimación de los costos que demuestran diferencias entre las alternativas analizadas. Se reunieron datos de costos de las actividades iniciales de construcción, mantenimiento, conservación y demolición en función de precios unitarios de registros recientes de proyectos o información de proveedores y contratistas, que incluyeron materiales, equipos, mano de obra y transporte de materiales.

A la par que se estimaron los costos para mantenimiento (conservación rutinaria) y conservación (conservación periódica), se estableció la frecuencia para dichas actividades, la estimación se basó en los periodos establecidos por la federación para las conservaciones y reconstrucciones (Memoria Documental, SCT 2018).

La siguiente etapa consistió en determinar los costos para el usuario, dentro de estos se encuentran los costos de operación vehicular (COV), costos por demoras y costos por accidentes. La zona de trabajo genera retrasos, esperas y desvíos que influyen en los COV.

Para determinar los COV, se utilizaron los factores del costo de operación base (tabla 15) generados en la publicación técnica 471 del IMT: Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2016, únicamente se actualizaron los costos unitarios. Los tipos de vehículos representativos utilizados en el análisis son: vehículo ligero (A), autobús foráneo (B), camión pesado de tres ejes (C3), un camión mediano de dos ejes (C2), dos camiones articulados con semirremolque (T3-S2 y T-S3) y un camión articulado con semiremolque y remolque (T3-S2-R4) y los estados de la superficie de rodamiento están representados por el Índice de Servicio (IS) y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) mostrados en la tabla 16.

Tabla 15. Factores del Costo de Operación Base para terreno sensiblemente plano.

Tipo de Vehículo	Estado Superficial		
	Muy bueno	Regular	Malo
A	1.04	1.10	1.17
B	1.11	1.16	1.21
C2	1.12	1.24	1.35
C3	1.14	1.23	1.31
T3-S2	1.11	1.2	1.3
T3-S3	1.14	1.23	1.31
T3-S2-R4	1.17	1.26	1.34

FUENTE: IMT, 2016

Tabla 16. Indicadores del estado de la superficie de rodamiento.

Estado de la superficie	IS	IRI
Muy bueno	4.30	2.0
Regular	3.44	4.0

	Malo	2.58	6.0
--	------	------	-----

IS: Índice de Servicio; IRI: Índice Internacional de Rugosidad. FUENTE: IMT, 2016.

Para calcular el costo por operación anual por kilómetro para cada tipo de vehículo, se utiliza la siguiente ecuación (IMT, 2016):

$$COA = F_b \times CB \times TDPA \times 365 \quad (14)$$

Donde:

COA = costo de operación anual por kilómetro, para todos los vehículos de un mismo tipo.

F_b = Factor del Costo de Operación Base

CB = Costo de Operación Base del vehículo

TDPA = Tránsito Diario Promedio Anual del vehículo

Como última etapa se compararon las alternativas analizadas mediante el Valor Presente Neto (VPN), el análisis puede ser de tipo determinista o de tipo probabilístico. Con el análisis determinista los datos son evaluados con base en la experiencia del analista o en evidencia histórica, en cambio para el análisis probabilístico se estiman con una distribución de probabilidad basada en datos reales.

El VPN se utilizó para convertir los costos en un valor económico único utilizando la tasa de descuento calculada en la segunda etapa del LCCA y así poder hacer una comparativa entre las alternativas.

$$\$P = \$F \times \left[\frac{1}{(1 + d)^t} \right] \quad (15)$$

Donde:

$\$P$ = valor actual

$\$F$ = costo futuro

d = tasa de descuento real

t = año en que ocurrió el costo futuro por una sola vez

Finalmente, se compararon los resultados de cada alternativa analizada.

4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos sobre los datos de tránsito, materiales y clima necesarios para realizar el diseño. Se muestran las iteraciones realizadas para determinar el diseño final del PLD con los programas: IMT-PAVE 3.0, Per Road 4.4, Street Pave 12 y WinPAS 12, así mismo los resultados del LCCA.

4.1 Datos para el diseño

La tabla 17 muestra los datos requeridos por cada programa. Se indica su accesibilidad, así como características del tránsito, de los materiales, del clima y de las fallas o deterioros. La tabla 18 hace referencia a ventajas y desventajas de cada programa utilizado.

Tabla 17. Datos de entrada y de accesibilidad para cada programa de diseño de pavimentos.

Datos de entrada necesarios								
Nombre del programa	Accesibilidad	Tránsito	Cargas	Mezcla	Características de Base/ Subbase	Subrasante	Clima	Fallas o deterioros
IMT-PAVE 3.0	Versión gratuita	Tránsito Diario Promedio, distribución por sentido, distribución por carril, años de vida, tasa de crecimiento, clasificación vehicular	Espectros de carga: nivel de carga	Número de capas y estructura del pavimento. Modulo dinámico	Módulo de resiliencia (M _R)	Módulo de resiliencia (M _R)	Temperatura	Fatiga y deformación permanente
Per Road 4.4	Versión gratuita	TDPA en ambos sentidos, grupos de eje/día, %camiones, %crecimiento camiones, %camiones en el carril de diseño, distribución direccional	Distribución actual de la carga del eje, Configuración de la carga: sencillo, tandem, trídem, entrada de espectros de carga por vehículo	Tipo de material: CA u otro; Grado PG, módulo (el programa trae un rango mínimo y uno máximo), coeficiente de Poisson (también con mínimo y máximo), espesor	Tipo de material: Suelo, CA, CCP, Base granular, roca, otros; Grado PG, módulo (el programa trae un rango mínimo y uno máximo), coeficiente de Poisson (también con mínimo y máximo), espesor	Tipo de material: Suelo, CA, CCP, Base granular, roca, otros; Grado PG, módulo (el programa trae un rango mínimo y uno máximo), coeficiente de Poisson (también con mínimo y máximo), espesor	Estación y su duración en semanas, temperatura media del aire (°F)	Esfuerzos, deformaciones, deflexiones por cada capa
Street Pave 12	Versión gratuita por 30 días	Tránsito de camiones durante la vida de diseño: camiones por día, tasa de crecimiento del tránsito, vida de diseño, distribución direccional, distribución de carril de diseño	Cuatro típicos espectros de tránsito y espectros de tránsito ACI 330	Capacidad de servicio y confiabilidad. Tres tipos de diseño de espesores: asfalto full depth, asfalto sobre base granular no estabilizada de 6 in, asfalto sobre base granular no estabilizada de 12 in		Valor k, módulo de resiliencia de la subrasante relacionado con el CBR o dato propio. Subbase cuando se prevea la circulación de vehículos pesados	Temperatura media anual del aire	NA
WinPAS 12	Versión gratuita por 30 días	ESALs: General, información de eje, tipo de vehículo, factor de camión. Espesor, numero estructural, índice de servicio, vida de diseño, tasa crecimiento del tránsito, tránsito anual, mensual diario, carril de diseño	Pueden estimarse por ESALs (sencillo, tandem, trídem, rígido o flexibles). Por tipo de vehículo y eje	Datos generales: ESALs flexibles, desviación estándar índice de servicio inicial y final		Valor k, módulo de resiliencia de la subrasante relacionado con el CBR o dato propio. Subbase cuando se prevea la circulación de vehículos pesados	NA	NA

TDPA: Tránsito Diario Promedio Anual; ESAL: Equivalent Single Axle Load; CBR: California Bearing Ratio; CA: Concreto Asfáltico; PG: Grado de desempeño; CCP: Concreto de Cemento Portland; NA: No Aplica.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de los programas utilizados para el diseño del PLD.

Programa	Ventajas	Desventajas
IMT-PAVE 3.0	Metodología empírico-mecanicista.	Características de los materiales muy generales.
	Utiliza espectros de carga.	Se requieren módulos mayores a 3500 MPa y espesores altos para cumplir con vidas de diseño mayores de 20 años.
	Análisis de esfuerzos y deformaciones relacionado con fatiga y deformación permanente.	Considerar el nivel de alta sobrecarga para el diseño demanda aumentar espesores y módulos.
	Los datos de tránsito empatan fácilmente al ser un programa mexicano.	El uso de bases estabilizadas para cumplir con la vida de diseño implica aumento del costo de la estructura.
	Número de capas ilimitado	El análisis probabilístico solicita espesores mayores para cumplir con ambos criterios de falla.
PER ROAD 4.0	Cuenta con herramienta para calcular los módulos dinámico y resiliente	
	Tiene dos opciones de análisis: espectral y probabilístico.	
	Metodología empírico-mecanicista	Número de capas limitado a cinco
	Utiliza espectros de carga	Características de los materiales muy generales.
	Considera la influencia de la temperatura en los módulos dinámico y resiliente.	Requiere calibración de los valores umbrales y de las funciones de transferencia utilizados para establecer los criterios de diseño.
STREET PAVE 12	Permite definir los criterios de rendimiento para cada capa.	Los parámetros de su base de datos son de Estados Unidos.
	Realiza un pequeño análisis de costos.	
	Metodología empírico-mecanicista.	Fue desarrollado para pavimentos de concreto principalmente.
	Se pueden comprar diseños de concreto vs asfalto.	Características de los materiales asfálticos muy generales.
	Incluye el LCCA.	Resultado del diseño para pavimento flexible se limita al espesor total de concreto asfáltico.
WinPAS 12	Utiliza espectros de carga.	Los espectros de carga proporcionados por el programa sólo incluyen datos de los ejes sencillo y tandem y se basan en datos de Estados Unidos.
	Considera la temperatura media del aire en el análisis del M_R de la subrasante.	No considera criterios de falla para pavimentos flexibles.
	Cuenta con ayudas prácticas para estimar parámetros.	
	Considera pavimentos flexibles: full depth y de 12 in de espesor los cuales están relacionados con PLD.	Utiliza un coeficiente que reduce el valor del módulo resiliente de la subrasante.
	Incluye cuadros de ayuda con las especificaciones del método AASHTO 93.	Esta más enfocado a pavimentos de concreto.
	Brinda tres opciones para obtener los	Metodología mayormente empírica.

ejes equivalentes para el diseño: por eje, por vehículo y por factor de camión.	No incluye criterios de falla.
Incluye el LCCA.	Los parámetros de su base de datos son de Estados Unidos.
Se pueden ajustar los espesores de las capas en la opción de calcular el SN.	Los ejes equivalentes obtenidos varían dependiendo de la opción que se utilice para calcularlos.
Es sencillo de utilizar al estar basado en el método AASHTO 93.	El resultados se limita al SN, utilizando la ecuación de la AASHTO 93.

4.1.1 Tránsito

Con los datos de tránsito se realizó la tabla 19 con el propósito de calcular la tasa de crecimiento. La tasa de crecimiento determinada mediante los promedios del periodo de análisis (2003-2018) fue 2.05% (tabla 20). Por otro lado, para el cálculo de la tasa de crecimiento de los vehículos tipo B y C se consideró el tránsito del año 2003 al año 2018 debido a que las curvas de TDPA son más uniformes en comparación con la curva de los vehículos tipo A, exceptuando el valor del año 2006, como se muestra en la figura 10. La tasa de crecimiento para los vehículos tipo B y C se obtuvo con la ecuación 1, siendo igual a 3.94%. La figura 11 muestra el comportamiento del TDPA del periodo 2006 -2011.

Tabla 19. TDPA del tramo de estudio de los años 2003 al 2018.

Año	TDPA	Clasificación por tipo de vehículo		
		A	B	C
2003	5874	4112	587	1175
2004	6075	4253	608	1215
2005	6104	4395	549	1160
2006	12583	8934	1132	2517
2007	5548	3939	405	1204
2008	5750	4922	0	828
2009	5989	4594	90	1306
2010	6244	4477	87	1680
2011	16690	13719	467	2504
*2012	16419	13579	581	2258
2013	18743	15500	600	2643
2014	19862	16426	636	2801
2015	21077	17578	632	2866
2016	23090	19788	485	2817
2017	23370	20098	771	2501
2018	22487	19339	765	2384

$$r = \left(\frac{3148}{1762} \right)^{1/2018-2003} - 1 = .0394 \times 100 = 3.94\%$$

Tabla 20. Cálculo de la tasa de crecimiento (%) por promedios.

Año	TDPA	Porcentaje de variación anual
2003	5874	
2004	6075	3,31
2005	6104	0,48
2006	12583	51,49
2007	5548	-126,80
2008	5750	3,51
2009	5989	3,99
2010	6244	4,08
2011	16690	62,59
2012	16419	-1,65
2013	18743	12,40
2014	19862	5,63
2015	21077	5,76
2016	23090	8,72
2017	23370	1,20
2018	22487	-3,93
r = Promedio		2,05

r=tasa de crecimiento para el periodo 2003-2018

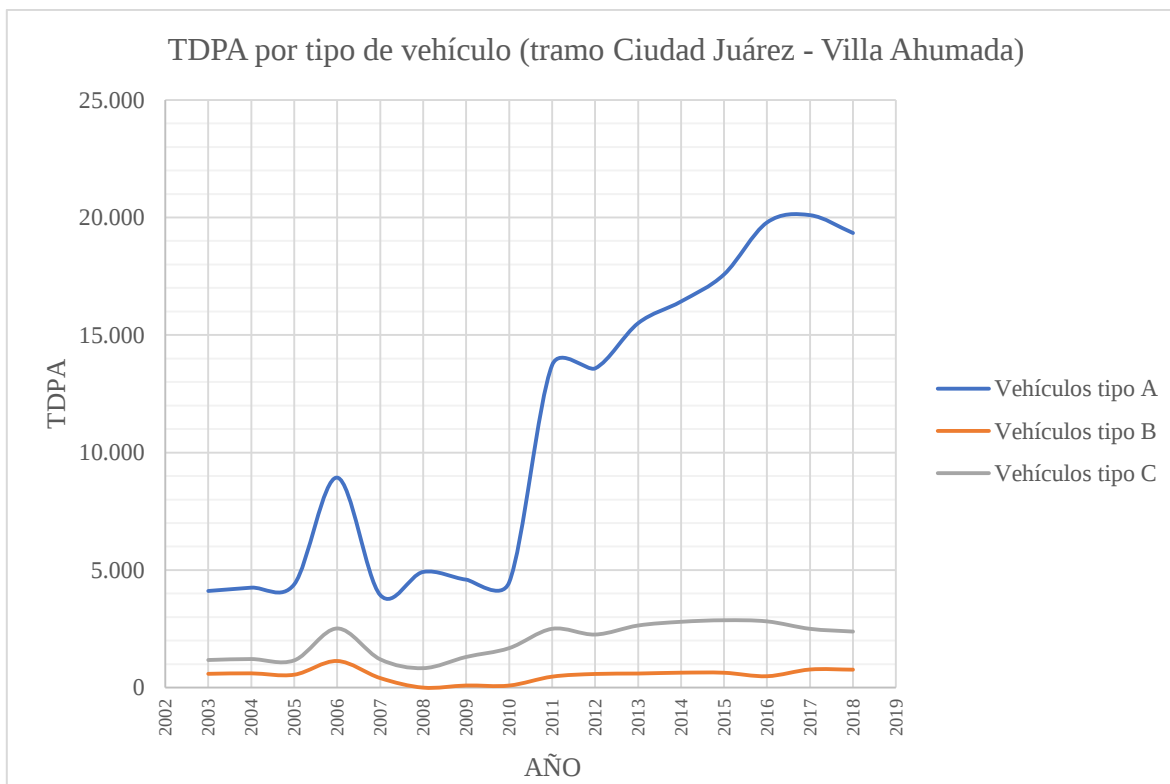


Figura 10. TDPA por tipo de vehículo.

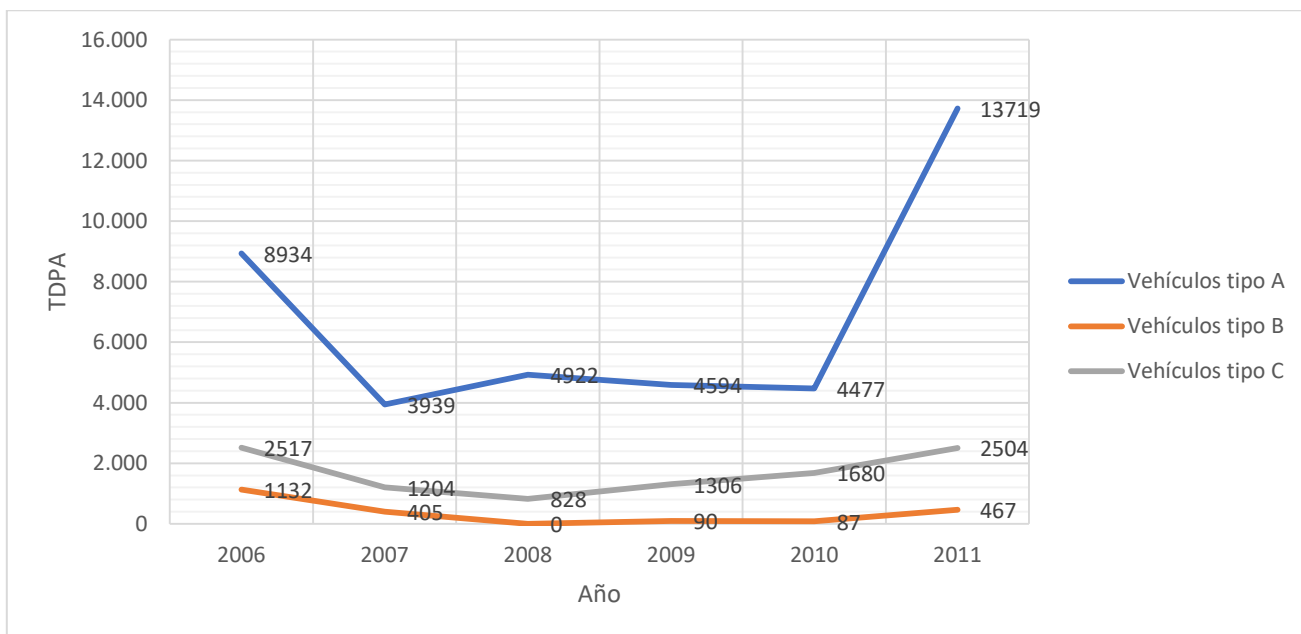


Figura 11. Gráfica con los TDPA por tipo de vehículo del año 2006 al 2011.

En la figura 12 se muestran las gráficas de regresión lineal y las ecuaciones para obtener los datos del TDPA correspondientes al 2012.

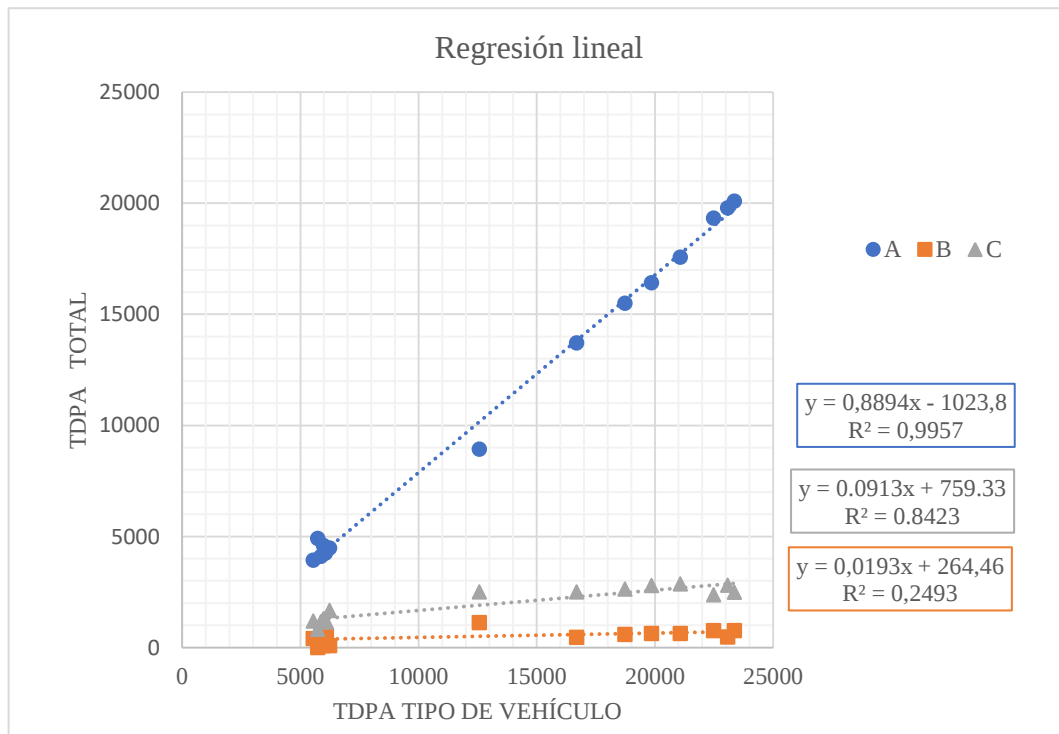


Figura 12. Modelos de regresión para los datos faltantes del año 2012.

El cálculo del tránsito de diseño depende del coeficiente de acumulación del tránsito (CT) el cual, a su vez, está relacionado con la tasa de crecimiento (2.05%) y el horizonte de proyecto (40 años).

$$CT = 365 \left[\frac{(1 + 0.0205)^{40} - 1}{0.0205} \right] = 22287.27$$

El coeficiente de daño se calculó a partir de los factores de equivalencia de carga propuestos por el Instituto del Asfalto. Se realizó una gráfica de regresión lineal, la cual se muestra en la figura 13, de dicha gráfica se desprenden las ecuaciones 5, 6 y 7 para cada tipo de eje. Con los datos de peso por eje, obtenidos de la norma NOM-012-SCT-2-2017 se elaboró la tabla 21 la cual muestra los valores de EALF para cada tipo de eje y su respectivo peso máximo.

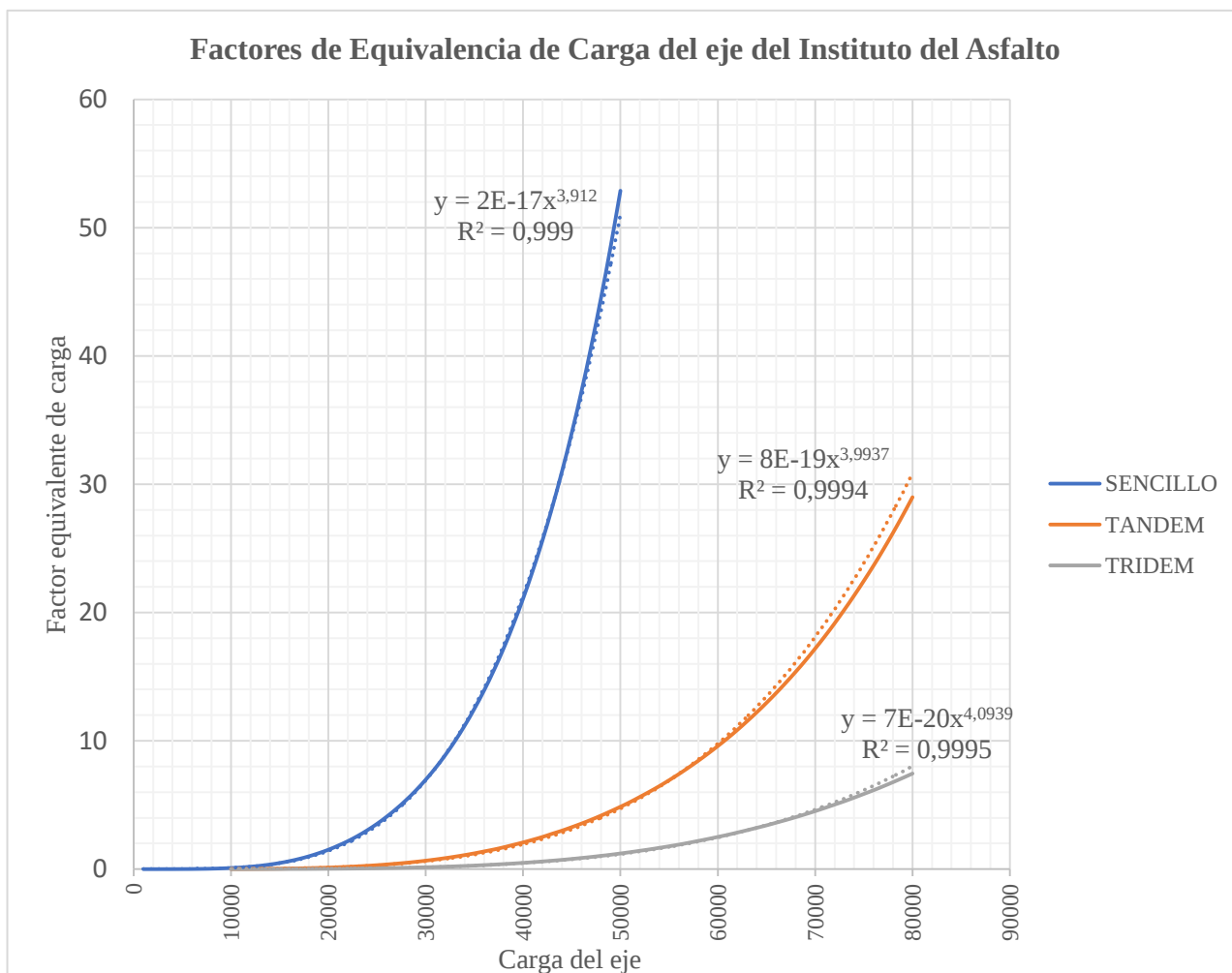


Figura 13. Modelos de regresión lineal para los factores de equivalencia de carga del eje con valores del Instituto del Asfalto.

Tabla 21. Factores de equivalencia de carga del eje (EALF).

Eje	Ton	lb	EALF
Sencillo	6.5	14330.0	0.3633
	12.5	27557.8	4.6910
	17	37478.5	1.4771
	17.5	38580.9	1.6584
Tándem	18	39683.2	1.8559
	19	41887.8	2.3031
	21	46297.0	3.4349
Trídem	26.5	58422.4	2.2856

Una vez que se determinó toda la información, se sustituyeron los términos en la ecuación 2 y se realizó el cálculo de ΣEE , que se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Cálculo de ejes equivalentes para el proyecto.

Vehículo	TDPA _{actual}	Cd	CT	CD	Ci	TD	ΣEE
B	765	3.7982	22287.27	0.9	1	17,039,913	58,248,341
C2	1597	5.0543	22287.27	0.9	1	35,583,349	161,863,469
C3	180	3.7982	22287.27	0.9	1	4,009,391	13,705,492
T3-S2	337	6.1013	22287.27	0.9	1	7,517,609	41,280,488
T3- S3	180	6.0838	22287.27	0.9	1	4,009,391	21,952,935
T3-S2-R4	22	6.6504	22287.27	0.9	1	501,174	2,999,713
						EE totales	300,050,438

Se estimaron los EE a partir de la ecuación AASHTO 1993 con las condiciones actuales de la estructura del pavimento. Las cuales se muestran en la tabla 23, para lo cual el espesor debe expresarse en pulgadas, el coeficiente de drenaje se obtuvo de la tabla de valores recomendados para capas no tratadas de base o subbase por la guía AASHTO 93. Sustituyendo los términos en la ecuación 8 da un valor de ESAL en ambas direcciones de $W_{18} = 30, 449,870$ para el tramo de carretera analizado.

Tabla 23. Condiciones actuales del pavimento, de acuerdo con lo estipulado en la metodología de la guía AASHTO 1993 (niveles de humedad cercanos a la saturación entre 1% y 5%, confiabilidad R = 90%, desviación estándar normal Zr de -1.28 y una desviación estándar S_0 de 0.45, valor recomendado para pavimentos flexibles).

Capas	Espesor en pulgadas (D)	Coeficiente de drenaje (m_n) (%)	Coeficiente estructural (a)	Número estructural (SN)
Carpeta	3.15	1.15	0.42	1.52
Base	5.91	1.15	0.140	0.95
Subbase	7.87	1.15	0.125	1.13
				3.60

Utilizando nuevamente las ecuaciones 8 y 9, ahora con una sección estructural típica para un PLD en Texas y con los datos que se muestran en la tabla 24, se obtuvo un valor de $W_{18} = 39, 856, 391,648$.

Tabla 24. Condiciones basadas en una estructura típica de Texas para PLD, de acuerdo con lo estipulado en la metodología de la guía AASHTO 1993 (niveles de humedad cercanos a la saturación entre 1% y 5%, confiabilidad R = 90%, desviación estándar normal Zr de -1.28 y una desviación estándar S₀ de 0.45, valor recomendado para pavimentos flexibles).

Capas	Espesor en pulgadas (D)	M _R ksi p/sección típica de un PLD en Texas	CBR	Coefficiente de drenaje (%)	Coefficiente estructural (a)	Número estructural (SN)
capa1	1.25	350		1.15	0.38	0.54625
capa2	2.50	650		1.15	0.50	1.4375
capa3	2.50	800		1.15	0.50	1.4375
capa4	8.00	1000		1.15	0.50	4.6
capa5	3.00	500		1.15	0.45	1.5525
Base	7.00	45	90	1.15	0.17	1.3685
						10.94

4.1.2 Materiales

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas para obtener las propiedades índice de la base y el terreno natural: D₆₀, P₂₀₀ y el Índice de Plasticidad (IP). De la curva granulométrica se determinó el D₆₀, que se utilizó en la ecuación 11 para calcular el CBR de la base. En la tabla 25 se observan los datos de la granulometría, mientras que las figuras 14 y 15 presentan las curvas granulométricas de las muestras 1 y 2 respectivamente. En las gráficas de las curvas granulométricas se aprecian las zonas granulométricas recomendables para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa conforme la norma N-CMT-4-02-002/04.

Tabla 25. Granulometría de las muestras 1 y 2 y límites de Atterberg de la muestra 2(base).

Malla	Material (% Pasa)		Límites de Atterberg % (Muestra 2)	
	Muestra 1	Muestra 2		
3"	100.0	100	LL	30.43
2"	100.0	100	LP	20.29
1 1/2"	100.0	99.4	IP	10.14
1"	98.2	97.4	CL	2.5
3/4"	96.4	94.9		
1/2"	85.8	80		
3/8"	77.3	69.7		
1/4"	62.5	53.9		
No. 4	55.2	47		
No. 10	35.9	27.1		
No. 20	23.0	17.7		
No. 40	16.8	14.2		
No. 60	13.2	12.3		
No. 100	10.1	10.6		
No. 200	7.1	8.1		

LL= Límite Líquido LP = Límite Plástico IP Índice de Plasticidad CL= Contracción Lineal

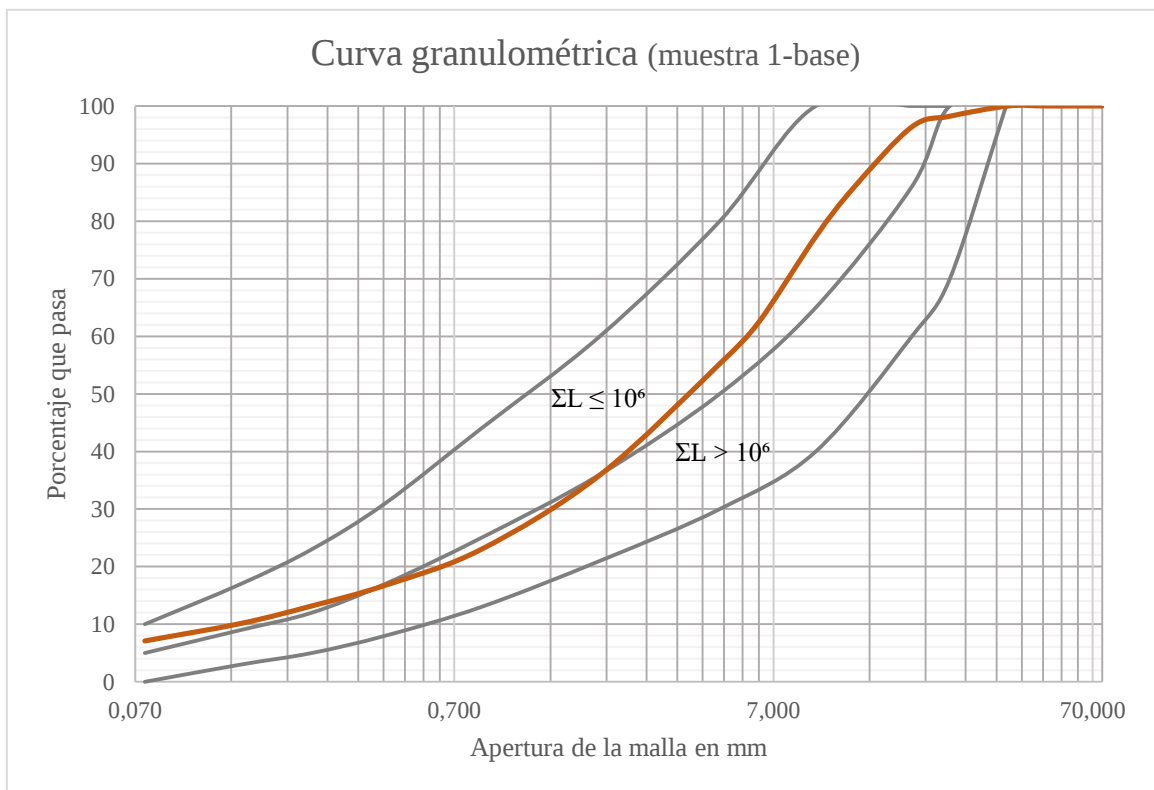


Figura 14. Curva granulométrica de la muestra 1 de la base de la estructura actual del pavimento.

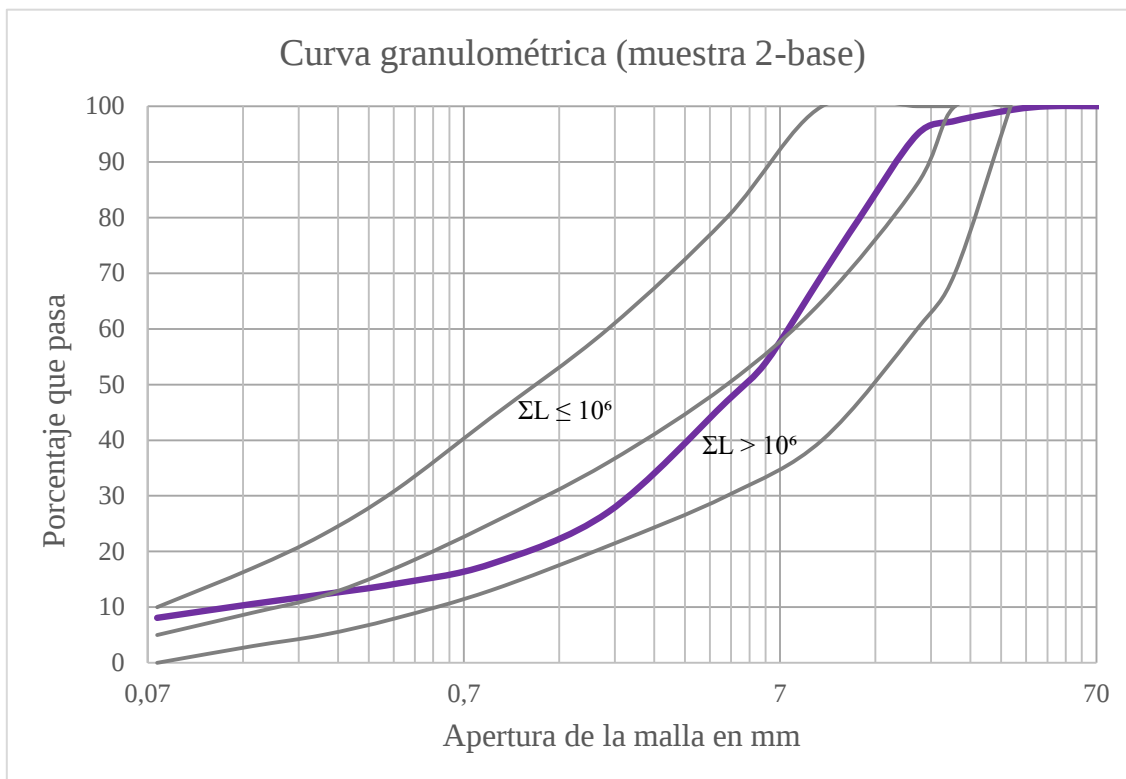


Figura 15. Curva granulométrica de la muestra 2 de la base de la estructura actual del pavimento.

La tabla 26 presenta las propiedades índice con la granulometría y los límites de Atterberg, que a la vez sirven para clasificar el suelo por medio de SUCS, de las dos muestras de terreno natural analizadas. En la tabla 27 se resumen la clasificación SUCS, el valor del CBR calculado con las ecuaciones 11 y 12 del Apéndice CC-1 y el valor del módulo de resiliencia correlacionado con el CBR.

Tabla 26. Granulometría y límites de Atterberg de la muestra 1 y 2 (terreno natural).

Malla	Material (% Pasa)		Límites de Atterberg % (Muestra 1)	
	Muestra 1	Muestra 2		
No. 10	99.27	99.05	LL	23.57
No. 20	99.16	98.30	LP	20.34
No. 40	98.70	96.60	IP	3.23
No. 60	94.83	87.80	CL	0.6
No. 100	73.95	57.30		
No. 200	36.49	18.45		

LL= Límite Líquido LP = Límite Plástico IP Índice de Plasticidad CL= Contracción Lineal

Tabla 27. Clasificación SUCS, CBR y M_R de las cuatro muestras.

Muestra	SUCS	% CBR	M_R ksi	M_R MPa
Base 1	SW-SM	53.03	17	117
Base 2	GP-GC	57.51	26	179
Terreno Natural 1	SM	40.37	21	145
Terreno Natural 2	SM	27.25	21	145

En la tabla 28 se presentan los resultados de flujo y estabilidad de los núcleos de la carpeta asfáltica del acotamiento. Mientras que la tabla 29 muestra la composición granulométrica de las muestras de mezcla asfáltica 1 y 2 y; en las figuras 16 y 17 se presenta el gráfico de estas composiciones.

Tabla 28. Resultados de la prueba de resistencia de la mezcla asfáltica con el método Marshall (pastillas de 101 mm de diámetro).

Muestra	Diámetro mm	Espesor mm	Factor de corrección	Peso g	Densidad de mezcla Kg/m ³	Estabilidad kN	Flujo mm	Rigidez kN/mm	Estabilidad corregida kN
S1-1	101.6	57.8	1.19	1026.0	2189	5.10	16.93	0.30	6.07
S1-2	101.6	57.8	1.19	1025.0	2187	5.18	14.71	0.35	6.16
S1-3	101.6	57.5	1.19	1024.0	2197	5.33	15.09	0.35	6.34
S1-4	101.6	58.2	1.19	1014.0	2150	5.16	18.15	0.28	6.14
Promedio									6.18
S2-1	101.6	50.1	1.56	827.6	2038	2.80	8.06	0.35	4.36
S2-2	101.6	57.1	1.25	920.8	1989	3.83	8.80	0.44	4.78
S2-3	101.6	50.2	1.56	821.2	2018	2.75	15.16	0.18	4.28
S2-4	101.6	59.0	1.14	934.7	1954	3.50	18.23	0.19	3.99
Promedio									4.35

Tabla 29. Composición granulométrica de las muestras de mezcla asfáltica 1 y 2.

Malla	Tamaño máximo: ¾" (19 mm) % Pasa	
	Muestra 1	Muestra 2
1"	100	100
¾"	100	96
½"	77.12	81.06
⅜"	64.70	65.60
¼"	51.28	50.26
No. 4	45.04	45.30
No.10	28.36	27.72
No. 20	19.36	17.20
No. 40	15.20	12.00
No. 60	12.84	9.10
No.100	10.88	7.08
No.200	8.46	4.92

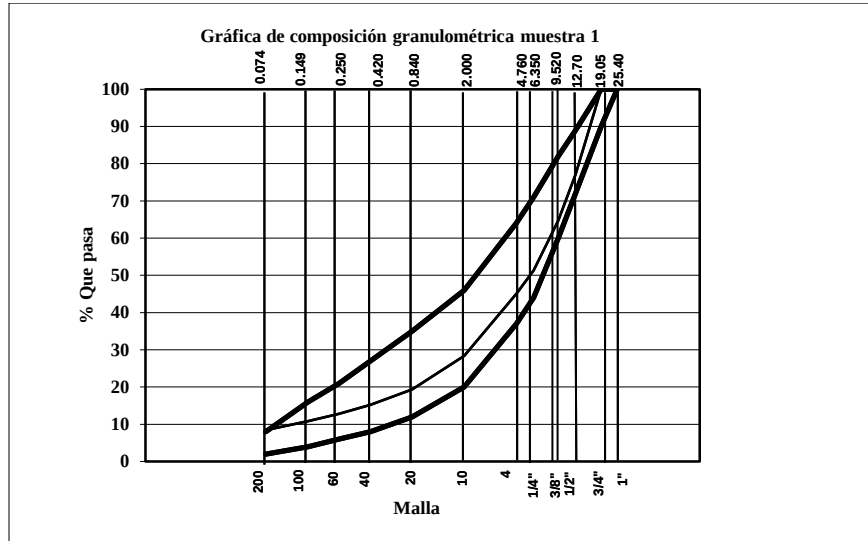


Figura 16. Curva granulométrica de la muestra 1 de mezcla asfáltica de la estructura actual del pavimento, que muestra los límites granulométricos para mezclas asfálticas de granulometría densa establecidos en la norma N-CMT-4-04/17.

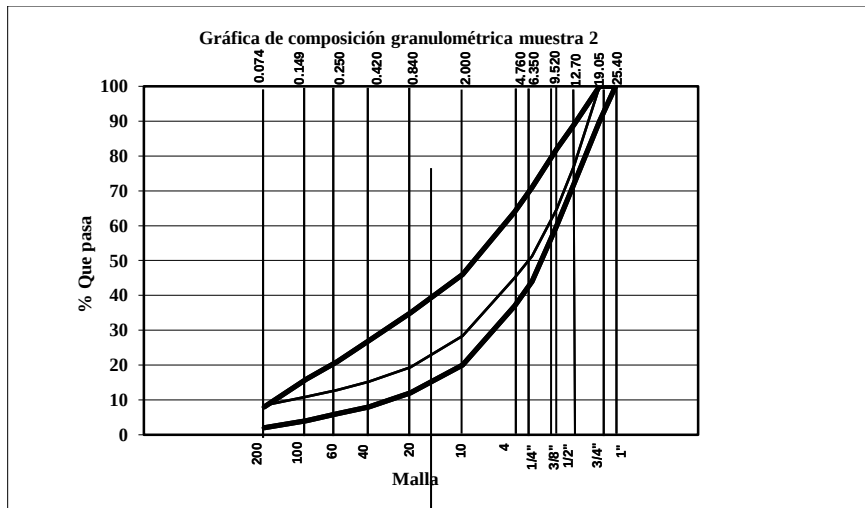


Figura 17. Curva granulométrica de la muestra 2 de mezcla asfáltica de la estructura actual del pavimento, que muestra los límites granulométricos para mezclas asfálticas de granulometría densa establecidos en la norma N-CMT-4-04/17.

4.1.3 Clima

Se elaboró la tabla 30 de temperaturas máximas y mínimas mensuales del periodo del año 1981 al año 2010 así como datos de precipitación máxima mensual con datos de estaciones meteorológicas de Juárez, Villa Ahumada y Samalayuca, las cuales están ubicadas dentro del tramo de estudio. Debido a que el programa Per Road 4.4 solicita datos de temperatura media por estación del año se presenta la tabla 31.

Tabla 30. Datos de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y precipitación para Ciudad Juárez, Samalayuca y Villa Ahumada.

Estación	Elementos\ mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Juárez 8213 ubicación: 31°44'11" N 106°26'11" W Periodo: 1981 -2010	Temperatura máxima normal	17.3	19.3	23.4	26.9	32.4	36.6	36.3	35	32.1	26.8	20.9	16.5	27
	Máxima mensual	20.6	24.3	27.2	30.4	35.3	40.9	38.9	38.7	36.2	29.6	24.0	20.1	
	Temperatura media normal	9.2	11.7	15.2	18.8	24.5	28.7	29	27.9	24.8	18.8	12.7	9.3	19.2
	Temperatura mínima normal	1.2	4.1	6.9	10.6	16.7	20.7	21.8	20.9	17.6	10.8	4.2	1.9	11.5
	Mínima mensual	-0.9	0.2	2.6	5.2	11.1	14.4	15.0	14.3	10.1	5.3	-0.4	-2.6	
	Precipitación normal	9.3	8.2	1.6	2.8	6.8	14.2	29.1	26.0	18.6	12.80	8.1	5.4	142.9
Villa Ahumada 8155 ubicación: 30°37'07" N 106°30'44" W Periodo: 1981 -2010	Precipitación Máxima mensual	62	56	21	52	56	91.3	155	166	112	63	54	23	
	Temperatura máxima normal	14.9	18	22.1	26.9	30.8	34.6	33.9	32.5	31	26.4	19.7	15.7	25.5
	Máxima mensual	18.3	20.1	24.2	29.4	33.3	37.5	36.5	34.3	33	29	23.9	20.3	
	Temperatura media normal	6.9	9.7	13.3	17.8	21.6	25.8	26.3	25.4	23.3	18.1	11.1	7.4	17.2
	Temperatura mínima normal	-1.1	1.4	4.4	8.6	12.4	16.9	18.6	18.3	15.7	9.8	2.6	-0.8	8.9
	Mínima mensual	-3.6	-2.1	2	5.2	10	14.9	16.7	17.4	14.3	8.7	1.1	-3.7	
Samalayuca 8121 ubicación: 31°20'33" N 106°28'35" W Periodo: 1981 -2010	Precipitación normal	11.9	10.8	10.4	12.4	13.9	20	87.3	86.9	45.5	31.3	10.7	21	362.1
	Máxima mensual	42	25	24	56	101.5	103	207.2	158	106.6	86	24.3	54	
	Temperatura máxima normal	14.8	18.6	23.1	27.8	32.7	36.7	36	34.3	32.2	27.2	20.6	15.1	26.6
	Máxima mensual	18.3	21.4	27.2	32.8	36.9	40.7	38.5	38.7	34.9	31.4	26.6	20.6	
	Temperatura media normal	6.7	9.8	13.7	17.9	22.4	26.8	27.5	26.4	23.7	18	11.7	7	17.6
	Temperatura mínima normal	-1.4	1	4.3	7.9	12.1	16.9	19	18.5	15.2	8.9	2.7	-1	8.7
Periodo: 1981 -2010	Mínima mensual	-3.5	-4.2	1.8	2.4	7.5	12.1	16.4	16.1	11.4	5.1	0.3	-3.2	
	Precipitación normal	13.3	10.9	9.1	5.6	14.2	22.8	54.8	63.8	34.8	19.7	13	39.4	301.4
	Máxima mensual	50	45	33.5	19	75.5	70	138	156.5	84.5	98	33	330	

FUENTE: SMN, Información climatológica por estado periodo (1981- 2010).

Tabla 31. Datos de temperaturas promedio por estación del año para Ciudad Juárez, Samalayuca y Villa Ahumada.

Lugar	Temperatura media general		Estación (meses)	Duración en semanas	Temperatura promedio de la estación	
	°C	°F			°C	°F
Juárez	19.2	66.6	Invierno (diciembre, enero, febrero)	12	10.0	50.0
			Primavera (marzo, abril)	6	17.0	62.6
			Verano (mayo, junio, julio, agosto, septiembre)	26	27.0	80.6
			Otoño (octubre, noviembre)	8	15.7	60.3
			Invierno (diciembre, enero, febrero)	12	8.0	46.4
Villa Ahumada	17.2	63.0	Primavera (marzo, abril)	6	15.6	60.1
			Verano (mayo, junio, julio, agosto, septiembre)	26	24.5	76.1
			Otoño (octubre, noviembre)	8	14.6	58.3
			Invierno (diciembre, enero, febrero)	12	7.8	46.0
			Primavera (marzo, abril)	6	15.8	60.4
Samalayuca	17.6	63.7	Verano (mayo, junio, julio, agosto, septiembre)	26	25.4	77.7
			Otoño (octubre, noviembre)	8	14.9	58.8

4.2Diseño del PLD

A continuación, se muestra la tabla 32 con las seis estructuras base, que se analizaron como punto de partida más dos estructuras propuestas. La tabla incluye los espesores de cada capa, el grado PG de los asfaltos empleados en la región, los módulos dinámicos utilizados en México, Texas, Nuevo México y Ohio y los módulos resilientes para la base y subrasante. Para estos últimos se utilizaron los datos obtenidos de las muestras de campo, también se incluyó la opción de base estabilizada para el programa IMT-PAVE. Con las estructuras base se inició con 60 iteraciones con el programa IMT-PAVE y 112 con el programa Per Road. La diferencia se debe a que el primero no considera el grado PG en el análisis. La tabla incluye dos estructuras propuestas con las que se utilizaron los valores de los módulos de las estructuras base.

Tabla 32. Estructuras base y propuestas utilizadas como punto de partida para las iteraciones del diseño del PLD.

Estructura		Capa	Espesor		Grado PG del asfalto						Módulos para el CA							
			in	cm	1	2	3	4	5	6	México		Texas		Nuevo México		Ohio	
											MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
1	Mejor desempeño por AF Tarefder 2012	CA 1	3	7.5	76-22	70-22	76-22	70-22	70-22	70-22	3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
		CA 2	4	10.0	76-22	70-22	70-22	64-22	64-22	70-22	10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		CA 3	3	7.5	64-22	64-22	64-22	64-22	70-22	70-22	3400	500	3400	500	6700	980	5500	800
		BG	6	15.0							207	30	207	30	207	30	207	30
		BE									2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR									145	21	145	21	145	21	145	21
2	Sin la capa RBL Tarefder 2012	CA 1	3	7.5	76-22	70-22	76-22	70-22			3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
		CA 2	7	18.0	76-22	70-22	70-22	64-22			10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		BG	6	15.0							207	30	207	30	207	30	207	30
		BE									2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR									145	21	145	21	145	21	145	21
3	Basada en estructura de Nuevo México Tarefder 2009	CA 1	2.5	6.0	76-22	70-22	76-22	70-22	70-22	70-22	3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
		CA 2	4	10.0	76-22	70-22	70-22	64-22	64-22	70-22	10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		CA 3	2.5	6.0	64-22	64-22	64-22	64-22	70-22	70-22	3400	500	3400	500	6700	980	5500	800
		BG	6	15.0							207	30	207	30	207	30	207	30
		BE									2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR									145	21	145	21	145	21	145	21
4	Basada en estructura de Ohio Sargand 2015	CA 1	2	5.0	76-22	70-22	76-22	70-22	70-22	70-22	3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
		CA 2	8	20.0	76-22	70-22	70-22	64-22	64-22	70-22	10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		CA 3	4	10.0	64-22	64-22	64-22	64-22	70-22	70-22	3400	500	3400	500	6700	980	5500	800

Estructura		Capa	Espesor		Grado PG del asfalto					Módulos para el CA							
5	Basada en estructura de Ohio Qin 2010	BG	6	15.0						207	30	207	30	207	30	207	30
		BE								2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR								145	21	145	21	145	21	145	21
		CA 1	1.75	4.5	76-22	70-22	76-22	70-22	70-22	3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
		CA 2	9	23.0	76-22	70-22	70-22	64-22	64-22	10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		CA 3	4	10.0	64-22	64-22	64-22	64-22	70-22	3400	500	3400	500	6700	980	5500	800
		BG	6	15.0						207	30	207	30	207	30	207	30
		BE								2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR								145	21	145	21	145	21	145	21
		CA 1	2	5.0	76-22	70-22	76-22	70-22	70-22	3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
6	Basada en estructura de Texas Walubita 2010	CA 2	8	20.0	76-22	70-22	70-22	64-22	64-22	10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		CA 3	3	7.5	64-22	64-22	64-22	64-22	70-22	3400	500	3400	500	6700	980	5500	800
		BG	8	20.0						207	30	207	30	207	30	207	30
		BE								2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR								145	21	145	21	145	21	145	21
		CA 1	2	5.0	76-22	70-22	76-22	70-22	70-22	3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
7	Propuesta 1	CA 2	4	10.0	76-22	70-22	70-22	64-22	64-22	10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		CA 3	2	5.0	64-22	64-22	64-22	64-22	70-22	3400	500	3400	500	6700	980	5500	800
		BG	8	20.0						207	30	207	30	207	30	207	30
		BE								2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		SR								145	21	145	21	145	21	145	21
		CA 1	2	5.0	76-22	70-22	76-22	70-22		3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500
8	Propuesta 2	CA 2	6	15.0	76-22	70-22	70-22	64-22		10000	1500	6800	1000	6000	870	8200	1200
		BE	8	20.0						2900	421	2900	421	2900	421	2900	421
		BG	6	15.0						207	30	207	30	207	30	207	30
		SR								145	21	145	21	145	21	145	21
		CA 1	2	5.0	76-22	70-22	76-22	70-22		3400	500	2400	350	4400	650	10000	1500

AF= Agrietamiento por Fatiga; CA = Concreto Asfáltico; BG = Base Granular; BE = Base Estabilizada; SR = Subrasante

4.2.1 IMT-PAVE 3.0

Enseguida se muestran pantallas del programa IMT-PAVE 3.0 (figuras 18 y 19); así como algunas de las iteraciones del diseño con cada programa, indicando las capas, espesores, materiales, nivel de los espectros de carga y criterios de falla (tabla 33). En la tabla 34 se muestran las estructuras que cumplen con ambos criterios. En el anexo A se muestran todas las iteraciones realizadas con los ajustes de espesores y módulos buscando cumplir con los criterios de falla y de la estructura con los espesores menores.

Clasificación Vehicular:

Clase	Porcentaje (%)	Icono
A	85.9	Carro
B2	0	Autobús
B3	3.4	Autobús
C2	7.2	Camión
C3	0.8	Camión
T3-S2	1.5	Camión
T3-S3	0.8	Camión
T3-S2-R4	0.1	Camión
Otros	0.3	
SUMA	100.0	

Volumen de tránsito para el horizonte de proyecto

Tipo de Eje	%	# Repeticiones
Sencillo	45.70	1,542,166.0
Dual	23.84	804,608.4
Tandem	27.81	938,709.8
Tridem	2.65	89,400.9

Figura 18. Pantalla de entrada de datos de tránsito para el programa IMT-PAVE 3.0.

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	6	3400
2	Carpeta asfáltica	8	2400
3	Carpeta asfáltica	14	3400
4	Base Granular	25	2900
5	Capa semi-infinita		145

RESULTADOS

Vida por fatiga (años) > 40

Vida por deformación (años) > 40

Figura 19. Pantalla del análisis espectral del programa IMT-PAVE 3.0

Tabla 33. Iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0 para una de las estructuras base con los niveles legal y alta sobrecarga de los espectros de carga.

Estructura	Nivel de carga legal														Nivel de alta sobrecarga													
	Espesor de la capa (cm)				Espesor total (cm)		Módulo de la capa (MPa)				Falla (años)				Espesor de la capa (cm)				Espesor total (cm)		Módulo de la capa (MPa)				Falla (años)			
	Iteración	CA 1	CA 2	CA 3	Base	CA	Pavimento	CA 1	CA 2	CA 3	Base	SR	Fatiga	Deformación	Iteración	CA 1	CA 2	CA 3	Base	CA	Pavimento	CA 1	CA 2	CA 3	Base	SR	Fatiga	Deformación
Mejor desempeño por AF Tarefder 2012	1	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	207	145	>40	4.3	1	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	207	145	>40	1.5
	2	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	207	145	>40	2.9	2	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	207	145	>40	1
	3	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	207	145	>40	4.9	3	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	207	145	>40	1.3
	4	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	207	145	>40	7.8	4	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	207	145	>40	2.7
	5	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	2900	145	>40	26.7	5	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	2900	145	>40	8.9
	6	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	2900	145	>40	19.2	6	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	2900	145	>40	6.5
	7	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	2900	145	>40	29.5	7	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	2900	145	>40	9.8
	8	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40	8	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	2900	145	>40	14.2

CA= Concreto Asfáltico; SR = Subrasante; AF= Agrietamiento por fatiga; RBL = Rich Binder Layer (capa con alto contenido de asfalto)

Tabla 34. Iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0 con el nivel de alta sobrecarga que cumplen ambos criterios de falla y utilizan módulos menores a 10000 MPa, en orden ascendente en función del espesor total del concreto asfáltico.

	Iteración	Espesor de la capa en cm				Espesor total cm		Módulo de la capa (MPa)				Falla (años)			
		1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	Deformación	
1	152	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	2900	145	>40	>40	
2	151	5	9	15	22	29	51	4400	3400	4400	2900	145	>40	>40	
3	81	4	19	7	20	30	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40	
4	148	5	10	15	22	30	52	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40	
5	150	5	15	10	24	30	54	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40	
6	153	5	15	10	25	30	55	3400	2400	3400	2900	145	>40	>40	
7	79	4	20	7	20	31	51	4400	6800	3400	2900	145	>40	>40	
8	63	4	5	23	15	32	47	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40	
9	78	5	20	7	20	32	52	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40	
10	77	5	20	7.5	20	32.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40	
11	80	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40	
12	149	6	12	15	20	33	53	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40	
13	46	5	10	20	15	35	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40	
14	59	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40	
15	62	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40	
16	60	4	5	29	15	38	53	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40	
17	154	8	15	25	20	48	68	2400	5000	3400	207	145	>40	>40	
18	155	7	15	25	20	47	67	2400	5000	3400	207	145	>40	>40	

CA=Concreto Asfáltico; SR=Subrasante; sombreado en verde se ajustó el módulo; resaltado en rojo se ajustó el espesor

4.2.2 Per Road 4.4

A continuación, se muestran pantallas con los datos estructurales requeridos por el programa Per Road 4.0 y con los datos de salida (figuras 20 y 21, respectivamente); así como algunas de las iteraciones realizadas indicando las capas, espesores, materiales, grado PG y criterios de falla (Tabla 35). En el anexo A se muestran todas las iteraciones realizadas con este programa. La tabla 36 muestra la distribución horizontal de la deformación por tensión (HSD) que emplea el programa Per Road por default con base a los resultados obtenidos en el Reporte 15-05 de la NCAT (Tran, et. al, 2016).

Structural and Seasonal Information (F1 for Help)

of Layers: ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5

Seasonal Information:

Season: ☒ Summer ☒ Fall ☒ Winter ☒ Spring ☐ Spring2 Current Season: Summer

Duration (weeks): Summer: 26, Fall: 8, Winter: 12, Spring: 6, Spring2: 0

Mean Air Temperature, F: Summer: 80.6, Fall: 60.3, Winter: 50, Spring: 62.6, Spring2: 70

Temperature Correction: ☒

Layer Information:

Layer	Material Type	PG Grade	Min Modulus (psi)	Modulus (psi)	Max Modulus (psi)	Poisson's Ratio	Min - Max	Thickness (in)
Layer 1	AC	70 -22	50000	350000	4000000	0.35	0.15 - 0.4	2
Layer 2	AC	70 -22	50000	500000	4000000	0.35	0.15 - 0.4	4
Layer 3	Cracked AC		50000	420000	500000	0.35	0.15 - 0.4	2
Layer 4	Gran Base		5000	30000	50000	0.4	0.35 - 0.45	6
Layer 5	Soil		3000	21000	40000	0.45	0.2 - 0.5	Infinite

Buttons: Variability, Performance Criteria (for each layer)

Figura 20. Pantalla de entrada de datos estructurales del programa Per Road 4.0

Thick Design

Number of Pavement Layers: 5

Material: Layer 1: AC, Layer 2: AC, Layer 3: AC, Layer 4: GB, Layer 5: Soil

Thickness, in: Layer 1: 1, Layer 2: 3, Layer 3: 2, Layer 4: 6, Layer 5: Infinite

Reliability Analysis

Set Monte Carlo Cycles

Perform Analysis

Perpetual Pavement Design Results: Conventional Design with Transfer Functions

Layer	Location	Criteria	Threshold	Units	Percent Below Critical	Damage/Million Axle	Years to D=0.1	Years to D=1.0
1	Top	Vertical Defl...	20	mill-in	50	90.72	Pass	
2	Bottom	Horizontal Str...	-50	micr...	50	61.86	Pass	
3	Bottom	Tensile Strain	-257	micr...	85	94.08	Fail	
			-194		85	84.32	Fail	
			-158		75	74.08	Fail	
			-131		65	63.54	Fail	
			-110		55	53.04	Fail	
5	Top	Vertical Strain	200	micr...	50	100	Pass	

Perpetual Pavement Design Results: Percentile Responses

Layer	Location	Criteria	Units	Target Value	Target Percentile	Actual Percentile	Pass/Fail?
1	Top	Vertical Defl...	mill-in	20	50	90.72	Pass
2	Bottom	Horizontal Str...	micr...	-50	50	61.86	Pass
3	Bottom	Tensile Strain	micr...	-257	85	94.08	Fail
				-194	85	84.32	Fail
				-158	75	74.08	Fail
				-131	65	63.54	Fail
				-110	55	53.04	Fail
5	Top	Vertical Strain	micr...	200	50	100	Pass

Disclaimer Cost Analysis Export Formatted Data to EXCEL Leave Module

Figura 21. Pantalla de salida de datos del programa Per Road 4.0

Tabla 35. Iteraciones realizadas con una de las estructuras base en el programa Per Road 4.4

Estructura	Umbral y ubicación de falla																	
	Espesor de la capa (in)				Espesor total (in)		Módulo de la capa (ksi)				Grado PG			Deflexión CA 1		Fatiga CA 3		Deformación SR
	Iteración	CA 1	CA 2	CA 3	Base	CA	Pavimento	CA 1	CA 2	CA 3	Base	SR	CA 1	CA 2	CA 3	20 milli-inch Arriba	HSD Fondo	200 µε Arriba
Mejor desempeño por AF Tarefder 2012	1	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	26	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	2	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	26	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	3	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	26	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	4	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	26	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	5	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	26	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	6	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	26	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	7	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	26	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	8	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	26	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	9	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	26	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	10	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	26	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	11	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	26	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	12	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	26	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	13	3	4	3	6	10	16	650	870	980	26	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	14	3	4	3	6	10	16	650	870	980	26	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	15	3	4	3	6	10	16	650	870	980	26	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	16	3	4	3	6	10	16	650	870	980	26	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	17	3	4	3	6	10	16	650	870	980	26	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	18	3	4	3	6	10	16	650	870	980	26	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	19	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	26	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	20	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	26	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	21	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	26	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	22	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	26	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	23	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	26	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	24	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	26	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓

CA = Concreto Asfáltico; SR = Subrasante, PG = Performance Grade (grado de desempeño); HSD = Horizontal Strain Distribution (distribución de la deformación horizontal)

Tabla 36. Distribución horizontal de la deformación por tensión en el fondo de la capa de concreto asfáltico utilizada para la evaluación por fatiga en el programa Per Road 4.4

Distribución horizontal de la deformación por tensión (HSD)	
Percentil	Deformación µε
95	-257
85	-194
75	-158
65	-131
55	-110

4.2.3 Street Pave 12

Respecto al programa Street Pave en las figuras 22 y 23 se muestran las pantallas con los datos de tránsito y con los resultados respectivamente. El Street Pave proporciona el espesor total requerido del concreto asfáltico. La tabla 37 muestra un resumen de los datos obtenidos con este programa.

The screenshot shows the StreetPave 12 software interface. The 'Traffic' tab is selected, and the 'Traffic Category / Load Spectrum' section is active. Under 'Typical Traffic Spectrums', 'Major Arterial' is selected. Under 'ACI 330 Traffic Spectrums', 'Category A' is selected. The 'Truck Traffic over the Pavement Design Life' section shows input values: Trucks per Day (two-way, at time of construction) = 43,714, Traffic Growth Rate = 2.05 % per year, Design Life = 40 years, Directional Distribution = 50 %, and Design Lane Distribution = 90 %. The calculated results are: Average Trucks per Day in Design Lane over the Design Life = 30,029 and Total Trucks in Design Lane over the Design Life = 1,201,150. On the right, there are two tables: 'Single Axles' and 'Tandem Axles', both showing axle load (kips) and axles per 1000 trucks. The 'Single Axles' table lists values from 34 to 16 kips, and the 'Tandem Axles' table lists values from 60 to 24 kips. A 'Next' button is visible at the top right of the right-hand panel.

Traffic Category: Major Arterial	
Axle load, kips	Axles / 1000 trucks
34	0.19
32	0.54
30	0.63
28	1.78
26	3.52
24	4.16
22	9.69
20	41.82
18	68.27
16	57.07

Tandem Axles	
Axle load, kips	Axles / 1000 trucks
60	0.57
56	1.07
52	1.79
48	3.03
44	3.52
40	20.31
36	78.19
32	109.54
28	95.79
24	71.16

Tridem Axles (User Defined Only)	
Axle load, kips	Axles / 1000 trucks
78	0.4
72	0.78
66	1.2
60	1.5
54	2.8
48	3.6
42	3.58
36	2.4
30	2.2
24	4.8

Figura 22. Pantalla con los datos de tránsito solicitados por el programa Street Pave.

Tabla 37. Espesores para el concreto asfáltico obtenidos con el programa Street Pave.

ESALs flexibles	271,753,853	
M_R de la subrasante calculado	21,000 psi	
Tipo de diseño del asfalto¹	Coefficiente de variación de la subrasante²	
	38%	42%
	M_R de la subrasante de diseño	
	10,773 psi	9,697 psi
	Espesor total requerido (in)	Espesor total requerido (in)
Full – depth	24.46	24.77
CA de 6in de espesor sobre base granular	21.68	21.82
CA de 12 in de espesor sobre base granular	20.91	21.09

¹ basado en el documento MS-1 Thickness Design-Highways and Streets del Instituto del Asfalto.

² el rango para carreteras sugerido por el programa es de 0.38 a 0.45.

M_R = Módulo resiliente CA = Concreto Asfáltico

4.2.4 WinPas 12

El programa WinPAS permite calcular el SN. La tabla 38 sintetiza los números estructurales calculados con el WinPAS; el SN obtenido a partir de la estructura seleccionada del IMT-PAVE, el SN calculado para la estructura seleccionada con el Per Road y el SN sugerido por el WinPAS en función de los datos de entrada del tránsito. En

CONCRETE PAVEMENT DESIGN

Rigid ESALs = 145,449,039
Composite Modulus of Subgrade Reaction (Static k-Value) = 361 psi/in.

Sensitivity Analysis of Concrete Pavement Design

☒ k-value ☐ Reliability
☐ Concrete Strength ☐ % Slabs Cracked
☐ Design Life

	Min. Required Thickness in.	Design Thickness in.	Max Joint Spacing ft	Failure Controlled By
Doweled	8.14	8.50	14.88	Faulting
Undoweled	10.67	11.00	15	Faulting

ASPHALT PAVEMENT DESIGN

Resilient Modulus of the Subgrade: Subbase Selected = Full Depth
Calculated/Inpitted = 21,000 psi Flexible ESALs = 72,170,263
Used in Design = 11,859 psi Required Asphalt Thickness = 18.82 in.

Figura 23. Pantalla con los datos de salida después de correr el diseño con el programa Street Pave.

las figuras 24 y 25 se muestran pantallas de salida del programa.

Tabla 38. Números estructurales (SN) calculados con el programa WinPAS.

Material de	Coefficiente de la	Coefficiente de	Espesor de la	Número estructural de
-------------	--------------------	-----------------	---------------	-----------------------

la capa	capa (a)	drenaje (m)	capa (in)	la capa (SN _i)
IMT-PAVE 3.0				
CA	0.46	1.15	2.36	1.25
CA	0.38	1.15	3.15	1.38
CA	0.46	1.15	5.51	2.92
BE	0.42	1.15	9.84	4.75
			SN	10.30
Per Road 4.0				
CA	0.38	1.15	2.00	0.87
CA	0.46	1.15	4.00	2.12
BE	0.42	1.15	2.00	0.97
BG	0.14	1.15	6.00	0.97
			SN	4.92
WinPAS 12				
CA	0.46	1.15	2.76	1.46
BG	0.14	1.15	5.91	0.95
			SN	2.41

CA=Concreto Asfáltico; BE=Base Estabilizada; BG=Base Granular

Total ESALs by Vehicle Type

Estimated Rigid Thickness **4.00** Design Life **40** years
Estimated Asphalt SN **8.00** Annual Growth Rate **2.05** %
Terminal Serviceability **2.50** Traffic Input By (M/D/Y) **Year**

Vehicle Load and Volume Data

Vehicle	Axle Load kips	Axle Type	Number	Vehicle	Axle Load kips	Axle Type	Number
P	7.7	Single		SU3	14.3	Single	
	0	Single			27.6	Single	
	0	Single	19,136		46.3	Tandem	67
SU	14.3	Single		WB-50	14.3	Single	
	27.6	Single			46.3	Tandem	
	0	Single	1,597		41.9	Tandem	337
BUS, SU2	14.3	Single		WB-60	14.3	Single	
	38.6	Tandem			39.7	Tandem	
	0	Single	944		37.5	Tandem	
					46.3	Tandem	
					58.4	Tridem	202

Total Rigid ESALs **1,508,168** Total Flexible ESALs **1,153,646**

Figura 24. Pantalla con los datos del tránsito del programa WinPAS.

Asphalt Design Inputs

Asphalt Pavement Design/Analysis Inputs

Asphalt Structural Number 4.93

Calculate Asphalt Structural Number

Total Flexible ESALs 104,634,400

Reliability 90 %

Overall Standard Deviation 0.45

Subgrade Resilient Modulus 21,000.0 psi

Initial Serviceability 4.20

Terminal Serviceability 2.50

Save and Close

Help

Asphalt Pavement Design/Analysis

Asphalt Structural Number: 4.93 Solve For

Figura 25. Pantalla con los datos de salida arrojados por el programa WinPAS.

Dentro del proceso de selección de la estructura final del pavimento se eligieron tres combinaciones que cumplen con los criterios de falla con los menores valores del módulo dinámico con el programa IMT-PAVE 3.0. De las cuales, una representa el menor espesor de concreto asfáltico, otra no utiliza base estabilizada y la tercera sólo tiene dos capas de concreto asfáltico (tabla 39). Además, se realizó un comparativa de precios por metro cuadrado de las tres opciones considerando los tipos de mezcla sugeridos por (Newcomb & Hansen, 2006) y por (García & Hansen, 2001) (Tabla 40). En la comparación también se contempló la opción de utilizar mezcla tipo SMA para la superficie de rodadura.

Tabla 39. Estructuras consideradas para el diseño final, seleccionadas de las iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0.

Capa\Iteración	152	Módulo MPa	155	Módulo MPa	147	Módulo MPa
CA	6	3400	7	2400	5	2400
CA	8	2400	15	5000	15	10000
CA	14	3400	25	3400	-	-
BE	25	2900	-		25	2900
BG	-		20	207	20	207
Espesor total	53		67		65	

CA=Concreto asfáltico; BE=Base Estabilizada; BG=Base Granular

Tabla 40. Comparativa de precio por m² de las tres opciones seleccionadas de las iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE 3.0.

Capa	Espesor cm	Mezcla TMN (mm)	Opción 1			Espesor cm	Mezcla TMN (mm)	Opción 2			Espesor cm	Mezcla TMN (mm)	Opción 3		
			Precio/m²	Mezcla TMN (mm)	Precio/m²			Precio/m²	Mezcla TMN (mm)	Precio/m²			Mezcla TMN (mm)	Precio/m²	
CA Superficie	6	DCG 12.5	\$ 194.03	SMA 19	\$ 195.64	5	DCF 12.5	\$ 161.69	SMA 19	\$ 163.03	7	DCF 19	\$ 226.37	SMA 19	\$ 228.25
CA Intermedia	8	DCG 19	\$ 258.71	DCG 19	\$ 258.71	15	DCG 37.5	\$ 727.62	DCG 37.5	\$ 727.62	15	DCG 37.5	\$ 485.08	DCG 37.5	\$ 485.08
CA Fondo	14	DCF 37.5	\$ 452.74	DCF 37.5	\$ 452.74						25	DCG 37.5	\$ 808.47	DCG 37.5	\$ 808.47
BE	25		\$ 178.80		\$ 178.80	25		\$ 178.80		\$ 178.80					
BG						20		\$ 98.47		\$ 98.47	20		\$ 98.47		\$ 98.47
Precio Total/m²			\$1,084.28		\$ 1,085.89			\$ 1,166.58		\$ 1,167.92			\$1,618.38		\$ 1,620.26

CA=Concreto asfáltico; TMN=Tamaño máximo nominal; BE=Base Estabilizada; BG=Base Granular

La estructura para PLD seleccionada es la opción 1, quedando de la siguiente manera: la superficie de rodadura consiste en una mezcla superpave de granulometría densa de graduación gruesa con un tamaño máximo nominal de 12.5 mm (½ in) con asfalto grado PG 70-22 o 76-22 modificado con polímero. La capa intermedia está compuesta por una mezcla superpave de granulometría densa de graduación gruesa con una tamaño máximo de 19 mm (¾ in) con asfalto grado PG 70-22 modificado con polímero. La tercera capa formada por mezcla asfáltica de granulometría densa de graduación fina con un tamaño máximo nominal de 37.5 mm (1½ in) con asfalto AC-20 grado PG 64-22. Por último, la capa de base estabilizada la cual debe tener un módulo mínimo de 2900 MPa.

4.3 Comparativo de costos del PLD y costos de la reconstrucción del tramo mediante el LCCA

Los resultados del LCCA, por etapa, para el tramo de estudio, considerando un periodo de diseño de 40 años y una tasa de crecimiento del 2.05%, se muestran a continuación.

Datos generales del proyecto

Carretera: Ciudad Juárez – Villa Ahumada

TDPA en ambos sentidos: 43714 vehículos

Porcentaje de camiones: 14.7%

Longitud del tramo de estudio: 111 km

Longitud del tramo de prueba para el LCCA: 400 m

No. de carriles: 2 carriles en ambos sentidos

Velocidad límite: 90 km/h

Alternativas de diseño:

1) Reconstruir el tramo con pavimento tradicional (PT).

2) Reconstruir el tramo con PLD demoliendo la estructura actual.

3) Reconstruir el tramo con PLD utilizando la estructura actual como capa base.

1. Definición del periodo de análisis

Periodo de análisis: 50 años

2. Selección de la tasa de descuento real

Para calcularla tasa de descuento real se utilizaron los valores de la tasa de interés = 7.96% y la tasa de inflación = 3.78% obtenidos del sistema de información económica del Banco de México y se aplicó la ecuación 13.

$$d = \frac{1 + 0.0796}{1 + 0.0378} - 1$$

d = 4.03 %

3. Costos para la agencia

La tabla 41 muestra una comparativa de los costos iniciales estimados para cada una de las alternativas. En la reconstrucción de tramo se incluyeron la construcción de la subrasante y de la capa de base hidráulica, mientras que para la construcción del PLD totalmente nuevo se incluyó la demolición del concreto asfáltico, además de la construcción de la subrasante y la capa base. La tercera alternativa incluyó el bacheo profundo aislado y fresado de la superficie.

En la tabla 42 se presentan las actividades consideradas para las conservaciones rutinaria y periódica. En la tabla 43 los costos estimados por reconstrucción y conservación rutinaria y periódica. En la conservación rutinaria para el PT se incluyeron sellado de grietas, bacheo y limpieza mientras que para las alternativas con PLD únicamente se consideró la limpieza general anual. Para la conservación periódica se establecieron periodos de 5 años para el mantenimiento de la capa de rodadura para todas las alternativas. Para la estimación de costos se consideró un tramo de prueba con una longitud de 400 m (conforme la norma N-CTR-CAR-1-04-006/14) por 20 m de ancho.

Tabla 41. Costos estimados para la construcción inicial del PT, PLD nuevo y para PLD sobre pavimento actual.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
PT				
Construcción de terraplenes utilizando materiales compactables procedentes de cortes, en la capa subrasante compactado al 100% conforme lo indicado en el proyecto, incluye: carga a unidades de transporte, p.u.o.t.	m³	5600	\$108.91	\$609,896.00
Conformación y compactación de la capa subrasante al 100% Proctor con motoconformadora y compactador de tambor liso, incluye: tendido de material y suministro e incorporación de agua	m³	2800	\$110.26	\$308,728.00
Subbase hidráulica, con materiales pétreos procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 100% conforme lo indica el proyecto, p.u.o.t. Incluye: carga de material a unidades de transporte	m³	1120	\$463.70	\$519,344.00
Construcción de base hidráulica compactada para la reconstrucción de pavimentos, conforme lo indicado en el proyecto, p.u.o.t. incluye: carga de material a unidades de transporte	m³	840	\$492.34	\$413,565.60
Riego de impregnación con emulsiones asfálticas de rompimiento especial, p.u.o.t.	m²	5600	\$17.63	\$98,728.00
Arena para proteger el riego de impregnación, p.u.o.t.	m²	5600	\$479.68	\$2,686,208.00
Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, p.u.o.t.	m²	5600	\$16.18	\$90,608.00
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero, p.u.o.t.	m³	672	\$3,233.86	\$2,173,153.92
			Total	\$6,900,231.52
PLD				
Construcción de terraplenes utilizando materiales compactables procedentes de cortes, en la capa subrasante compactado al 100% conforme lo indicado en el proyecto, incluye: carga a unidades de transporte, p.u.o.t.	m³	5600	\$108.91	\$609,896.00
Conformación y compactación de la capa subrasante al 100% Proctor con motoconformadora y compactador de tambor liso, incluye: tendido de material y suministro e incorporación de agua	m³	2800	\$110.26	\$308,728.00
Construcción de base estabilizada con cemento compactado con rodillos, para la reconstrucción de pavimentos, conforme lo indicado en el proyecto, p.u.o.t. incluye: carga de material a unidades de transporte	m³	1400	\$715.19	\$1,001,266.00
Riego de impregnación con emulsiones asfálticas de rompimiento especial, p.u.o.t.	m²	5600	\$17.63	\$98,728.00
Arena para proteger el riego de impregnación, p.u.o.t.	m³	5600	\$479.68	\$2,686,208.00
Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, p.u.o.t.	m³	5600	\$16.18	\$181,216.00
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero, p.u.o.t.	m³	448	\$3,233.86	\$1,448,769.28
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, p.u.o.t.	m³	784	\$1,931.36	\$1,514,186.24
Capa de rodadura con mezcla asfáltica en caliente con material modificado de granulometría discontinua tipo SMA, con material procedente de bancos que elija el contratista, p.u.o.t.	m³	336	\$3,260.65	\$1,095,578.40
Demoliciones, por unidad de obra terminada: de carpeta asfáltica. Incluye: maquinaria, herramienta, mano de obra, acarreos, retiro del escombros fuera de la obra y todo lo necesario para su correcta ejecución.	m³	3080	\$243.15	\$748,902.00
			Total	\$9,693,477.92
PLD sobre estructura existente				
Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, p.u.o.t.	m³	5600	\$16.18	\$181,216.00

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero, p.u.o.t.	m³	448	\$3,233.86	\$1,448,769.28
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, p.u.o.t.	m³	784	\$1,931.36	\$1,514,186.24
Capa de rodadura con mezcla asfáltica en caliente con material modificado de granulometría discontinua tipo SMA, con material procedente de bancos que elija el contratista, p.u.o.t.	m³	336	\$3,260.65	\$1,095,578.40
Fresado de pavimento de concreto asfáltico con maquina perfiladora, incluye: materiales de consumo, agua, carga a camión de volteo, mano de obra, maquinaria, equipo y herramienta necesarios p.u.o.t.	m³	840	\$119.44	\$100,329.60
Barrido de la superficie por tratar	m²	5600	\$1.82	\$10,192.00
Bacheo profundo aislado. Reposición de las capas subyacentes a la carpeta asfáltica (base y subrasante), según su tipo y grado de compactación, p.u.o.t. Incluye: carga de material a unidades de transporte.	m³	1960	\$589.11	\$1,154,655.60
Bacheo profundo aislado. Reposición de la carpeta asfáltica, con mezcla asfáltica en frio, p.u.o.t.	m³	560	\$2,889.38	\$1,618,052.80
			Total	\$7,122,979.92

Los precios unitarios se obtuvieron del Tabulador de precios referenciales a costo directo para construcción, modernización y conservación de obras de infraestructura carretera 2018

Fuente: (Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018).

Tabla 42. Actividades consideradas para las conservaciones rutinaria, periódica y reconstrucción.

Clave	Norma	Actividad
CR1	N-CSV-CAR-2-02-001/10	Limpieza general de la superficie de rodamiento y de los acotamientos.
CR2	N-CSV-CAR-2-02-001/00	Sellado de grietas asiladas en carpetas asfálticas con cemento asfáltico hasta de un centímetro de abertura, para cualquier profundidad.
CR3	N-CSV-CAR-2-02-004/03	Bacheo profundo aislado. Reposición de las capas subyacentes a la carpeta asfáltica (base y subrasante). Bacheo profundo aislado. Reposición de la carpeta asfáltica, con mezcla asfáltica en frío.
CP1	N-CSV-CAR-3-02-001/15	Renivelaciones de la superficie de rodamiento.
CP2	N-CSV-CAR-3-02-005/14	Capas asfáltica de granulometría densa.
CP3	N-CSV-CAR-3-02-006/10	Fresado de pavimento de concreto asfáltico con maquina perfiladora.
CP4	N-CSV-CAR-3-02-014/15	Capas de rodadura de granulometría discontinua tipo SMA.
R1	N-CSV-CAR-4-02-001/03	Recuperación en frío de pavimentos asfálticos.
R2	N-CSV-CAR-3-02-007/10	Recorte de carpetas asfálticas.
R3	N-CSV-CAR-4-02-006/03	Construcción de base estabilizada con cemento compactad con rodillos, para la reconstrucción de pavimentos.
R4	N-CSV-CAR4-02-004/03	Construcción de base hidráulica compactada para la reconstrucción de pavimentos.
R5	N-CTR-CAR-1-04-010/09	Capa de rodadura con mezcla asfáltica en caliente con material modificado de granulometría discontinua tipo SMA, con material procedente de bancos que elija el contratista.
R6	N-CTR-CAR-1-04-006/14	Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con cemento asfáltico AC-20.
R7	N-CTR-CAR-1-04-006/15	Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero.
R8	N-CTR-CAR-1-04-004/15	Riego de impregnación con emulsiones asfálticas de rompimiento especial.
	N-CTR-CAR-1-04-004/15	Arena para proteger el riego de impregnación.
R9	N-CTR-CAR-1-04-005/15	Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido.

CR=Conservación Rutinaria; CP=Conservación Periódica; R= Reconstrucción

Fuente: (Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018).

Tabla 43. Costos futuros estimados a partir de las actividades de conservación rutinaria, conservación periódica y reconstrucción para ambas estructuras (PT y PLD).

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Conservación rutinaria PT y PLD				
Limpieza general de la superficie de rodamiento y de los acotamientos, p.u.o.t.	ha	0,8	\$ 19,182.64	\$ 15,346.11
Sellado de grietas asiladas en carpetas asfálticas con cemento asfáltico hasta de un centímetro de abertura, para cualquier profundidad, p.u.o.t.	m	100	\$ 75.77	\$ 7,577.00
Bacheo profundo aislado. Reposición de las capas subyacentes a la carpeta asfáltica (base y subrasante), según su tipo y grado de compactación, p.u.o.t. incluye: carga de material a unidades de transporte.	m³	7	\$ 589.11	\$ 4,123.77
Bacheo profundo aislado. Reposición de la carpeta asfáltica, con mezcla asfáltica en frio, p.u.o.t..	m³	7	\$ 2,889.38	\$ 20,225.66
Conservación Periódica PT				
Renivelaciones de la superficie de rodamiento, p.u.o.t.	m³	696	\$ 2,552.06	\$ 1,776,233.76
Capas de rodadura de granulometría densa, p.u.o.t.	m³	696	\$ 1,912.42	\$ 1,331,044.32
Fresado de pavimento de concreto asfáltico con maquina perfiladora, p.u.o.t.	m³	696	\$ 119.44	\$ 83,130.24
Conservación Periódica PLD				
Fresado de pavimento de concreto asfáltico con maquina perfiladora, p.u.o.t.	m³	348	\$ 119.44	\$ 41,565.12
Capas de rodadura de granulometría discontinua tipo SMA, p.u.o.t.	m³	348	\$ 2,453.21	\$ 853,717.08
Reconstrucción PT				
Recorte de carpetas asfálticas, p.u.o.t.	m³	696	\$ 97.30	\$ 67,720.80
Recuperación en frio de pavimentos asfálticos, conforme lo indicado en el proyecto, p.u.o.t.	m³	696	\$ 1,581.38	\$ 1,100,640.48
Construcción de base hidráulica compactada para la reconstrucción de pavimentos, conforme lo indicado en el proyecto, p.u.o.t. incluye: carga de material a unidades de transporte	m³	870	\$ 501.22	\$ 436,061.40
Riego de impregnación con emulsiones asfálticas de rompimiento especial, p.u.o.t.	m²	5800	\$ 17.63	\$ 102,254.00
Arena para proteger el riego de impregnación, p.u.o.t..	m²	5800	\$ 479.68	\$ 2,782,144.00
Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, p.u.o.t.	m²	5800	\$ 16.18	\$ 93,844.00
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero, p.u.o.t.	m³	696	\$ 3,233.86	\$ 2,250,766.56
Reconstrucción PLD				
Recuperación en frio de pavimentos asfálticos, conforme lo indicado en el proyecto, p.u.o.t.	m³	1624	\$ 1,581.38	\$ 2,568,161.12
Recorte de carpetas asfálticas, p.u.o.t.	m³	1624	\$ 97.30	\$ 158,015.20
Construcción de base estabilizada con cemento compactad con rodillos, para la reconstrucción de pavimentos, conforme lo indicado en el proyecto, p.u.o.t. incluye: carga de material a unidades de transporte	m³	1450	\$ 715.19	\$ 1,037,025.50
Capa de rodadura con mezcla asfáltica en caliente con material modificado de granulometría discontinua tipo SMA, con material procedente de bancos que elija el contratista, p.u.o.t.	m³	348	\$3,260.65	\$ 1,134,706.20
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero, p.u.o.t.	m³	464	\$ 3,233.86	\$ 1,500,511.04
Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, p.u.o.t.	m³	812	\$ 1,931.36	\$ 1,568,264.32

Fuente: (Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018).

4. Costos para el usuario.

Por lo general los costos para el usuario se omiten por considerarse iguales para todas las alternativas que se analizan. Para este estudio se obtuvieron los costos de operación por tipo de vehículo para la estimación de los costos para el usuario, en las tablas 44, 45 y 46 se resumen los datos obtenidos del cálculo de los costos de operación para condiciones muy buenas, regulares y malas de la superficie de rodamiento de acuerdo con los parámetros de IRI e IS mostrados en la tabla 16. Los cálculos completos se muestran en tablas en el Anexo B.

Tabla 44. Costo de operación base (\$/veh-km) para cada tipo de vehículo.

Tipo de Vehículo	Costo de operación base (\$/veh-km)
A	2.27
B	6.99
C2	4.45
C3	6.22
T3-S2	8.52
T3-S3	9.93
T3-S2-R4	12.15

Tabla 45. Costo de operación base (\$/veh-km) considerando el factor de costo base (F_b) para el estado de la superficie de rodadura muy bueno, regular y malo.

Tipo de Vehículo	Estado Superficial		
	Muy bueno	Regular	Malo
A	2.36	2.49	2.65
B	7.76	8.10	8.45
C2	4.98	5.51	6.00
C3	7.09	7.65	8.15
T3-S2	9.46	10.23	11.08
T3-S3	11.32	12.21	13.00
T3-S2-R4	14.21	15.30	16.27

Tabla 46. Costos de operación del tránsito anual (millones de pesos/km) utilizando el TDPA del tramo de estudio en el año 2018.

Tipo de Vehículo	Estado Superficial		
	Muy bueno	Regular	Malo
A	16.46	17.41	18.52
B	2.16	2.26	2.36
C2	2.90	3.21	3.50
C3	0.47	0.50	0.53
T3-S2	1.16	1.26	1.36
T3-S3	0.74	0.80	0.85
T3-S2-R4	0.12	0.13	0.13

5. Evaluación de las alternativas

En la tabla 48 se presenta el cálculo del VPN y en la tabla 47 los componentes del VPN para las tres alternativas y el VPN cuando se consideran los costos de los usuarios. En la figura 26, la gráfica muestra la diferencia entre el VPN (sin considerar los costos para el usuario) de una estructura de pavimento tradicional contra una de larga duración. Por otro lado, en la figura 27 se observa el VPN cuando se incluyen los costos para el usuario.

Tabla 47. Valor Presente Neto (VPN) de las tres alternativas analizadas.

Costos estimados		PT		PLD		PLD sobre estructura existente
Usuarios	\$	6,051,819.88	\$	5,938,304.32	\$	5,938,304.32
Iniciales	\$	6,900,231.52	\$	9,693,477.92	\$	7,122,979.92
Futuros	\$	16,410,247.42	\$	5,407,248.63	\$	5,407,248.63
VPN	\$	29,362,298.82	\$	21,039,030.87	\$	18,468,532.87
VPN sin usuarios	\$	23,310,478.94	\$	15,100,726.55	\$	12,530,228.55

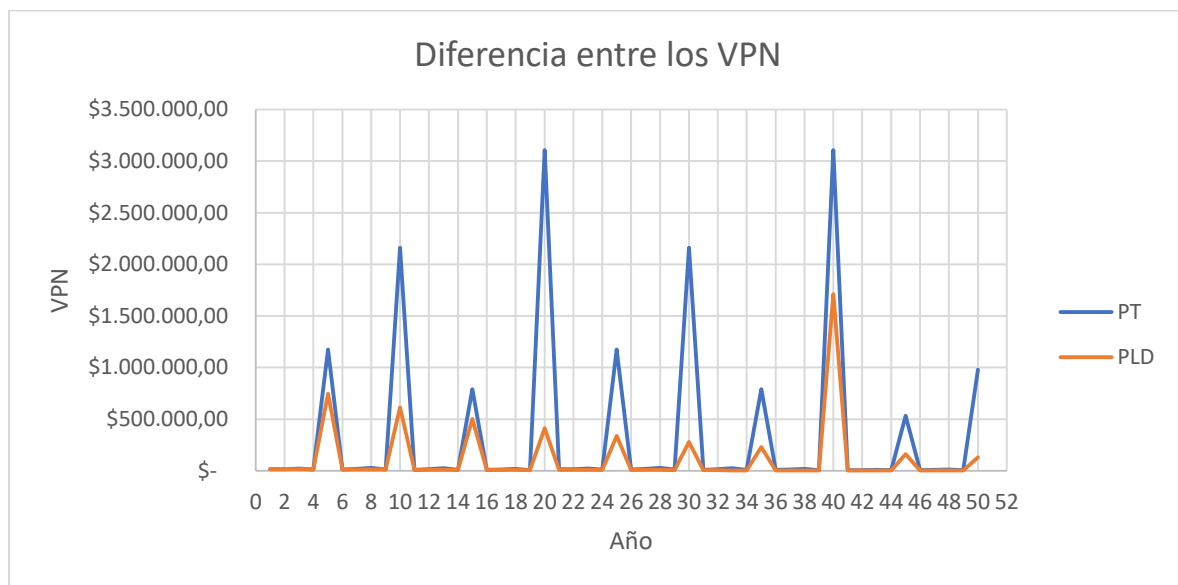


Figura 26. Gráfica comparativa de los VPN únicamente considerando los costos para la agencia

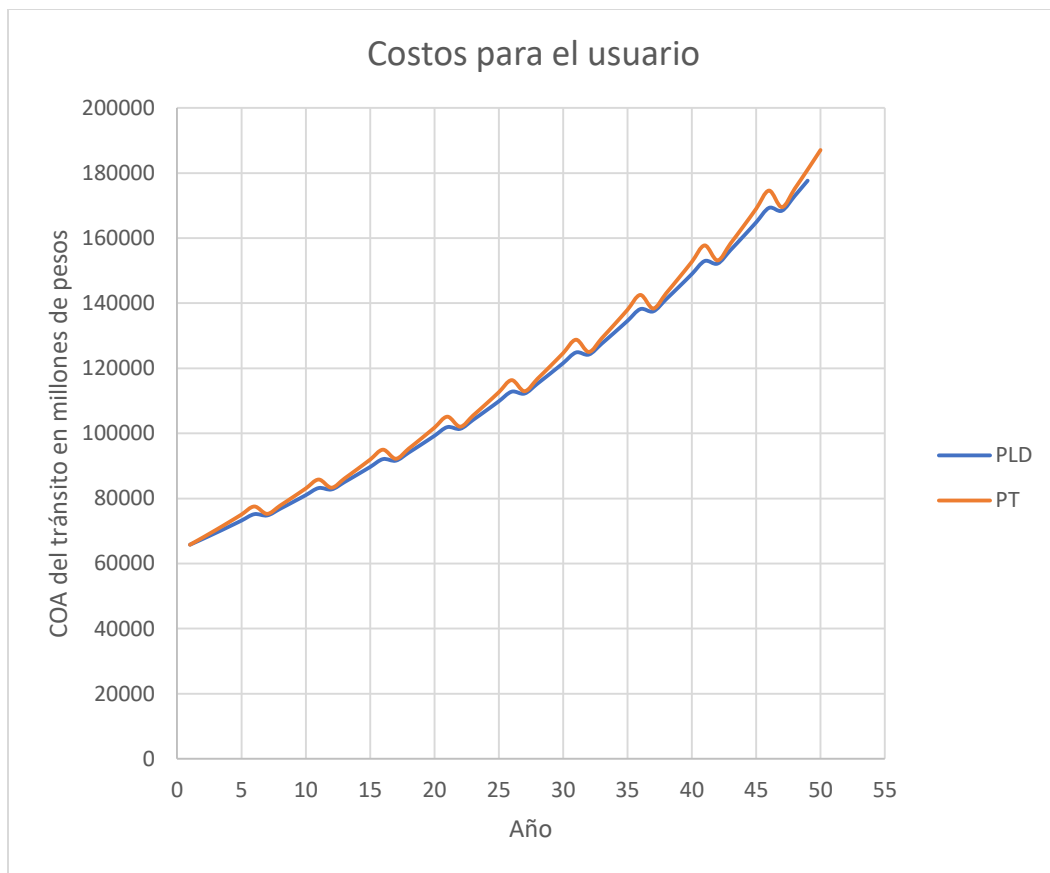


Figura 27. Grafica comparativa del VPN incluyendo los costos para el usuario

Tabla 48. Cálculo del Valor Presente Neto (VPN) de las actividades de conservación y reconstrucción de las dos estructuras de pavimento (PT y PLD).

Año	Clave	PT	VPN	Clave	PLD	VPN	
1	CR1	\$ 15,346.11	\$ 14,751.62	CR1	\$ 15,346.11	\$ 14,751.62	
2	CR1	\$ 15,346.11	\$ 14,180.16	CR1	\$ 15,346.11	\$ 14,180.16	
3	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 20,360.94	CR1	\$ 15,346.11	\$ 13,630.84	
4	CR1	\$ 15,346.11	\$ 13,102.80	CR1	\$ 15,346.11	\$ 13,102.80	
5	CP2, CP3 y CR1	\$ 1,429,520.67	\$ 1,173,268.60	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 747,391.50	
6	CR1	\$ 15,346.11	\$ 12,107.29	CR1	\$ 15,346.11	\$ 12,107.29	
7	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 17,384.55	CR1	\$ 15,346.11	\$ 11,638.26	
8	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 28,938.30	CR1	\$ 15,346.11	\$ 11,187.41	
9	CR1	\$ 15,346.11	\$ 10,754.02	CR1	\$ 15,346.11	\$ 10,754.02	
10	CP1, CP2, CP3 y CR1	\$ 3,205,754.43	\$ 2,159,455.54	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 613,416.09	
11	CR1	\$ 15,346.11	\$ 9,936.97	CR1	\$ 15,346.11	\$ 9,936.97	
12	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 14,268.24	CR1	\$ 15,346.11	\$ 9,552.02	
13	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 23,750.89	CR1	\$ 15,346.11	\$ 9,181.99	
14	CR1	\$ 15,346.11	\$ 8,826.29	CR1	\$ 15,346.11	\$ 8,826.29	
15	CP2, CP3 y CR1	\$ 1,429,520.67	\$ 790,335.45	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 503,456.75	
16	CR1	\$ 15,346.11	\$ 8,155.69	CR1	\$ 15,346.11	\$ 8,155.69	
17	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 11,710.55	CR1	\$ 15,346.11	\$ 7,839.75	
18	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 19,493.37	CR1	\$ 15,346.11	\$ 7,536.05	
19	CR1	\$ 15,346.11	\$ 7,244.11	CR1	\$ 15,346.11	\$ 7,244.11	
20	R2, R4, R6, R8, R9 y CR1 `	\$ 6,848,777.35	\$ 3,107,714.24	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 413,208.44	
21	CR1	\$ 15,346.11	\$ 14,751.62	CR1	\$ 22,923.11	\$ 9,998.69	
22	CR1	\$ 15,346.11	\$ 14,180.16	CR1	\$ 22,923.11	\$ 9,611.35	
23	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 20,360.94	CR1	\$ 22,923.11	\$ 9,239.02	
24	CR1	\$ 15,346.11	\$ 13,102.80	CR1	\$ 22,923.11	\$ 8,881.11	
25	CP2, CP3 y CR1	\$ 1,429,520.67	\$ 1,173,268.60	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 339,137.79	
26	CR1	\$ 15,346.11	\$ 12,107.29	CR1	\$ 22,923.11	\$ 8,206.35	
27	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 17,384.55	CR1	\$ 22,923.11	\$ 7,888.45	
28	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 28,938.30	CR1	\$ 22,923.11	\$ 7,582.86	
29	CR1	\$ 15,346.11	\$ 10,754.02	CR1	\$ 22,923.11	\$ 7,289.11	
30	CP1, CP2, CP3 y CR1	\$ 3,205,754.43	\$ 2,159,455.54	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 278,344.85	
31	CR1	\$ 15,346.11	\$ 9,936.97	CR1	\$ 15,346.11	\$ 4,509.02	
32	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 14,268.24	CR1	\$ 15,346.11	\$ 4,334.34	
33	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 23,750.89	CR1	\$ 15,346.11	\$ 4,166.44	
34	CR1	\$ 15,346.11	\$ 8,826.29	CR1	\$ 15,346.11	\$ 4,005.03	
35	CP2, CP3 y CR1	\$ 1,429,520.67	\$ 790,335.45	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 228,449.49	
36	CR1	\$ 15,346.11	\$ 8,155.69	CR1	\$ 15,346.11	\$ 3,700.74	
37	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 11,710.55	CR1	\$ 15,346.11	\$ 3,557.38	
38	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 19,493.37	CR1	\$ 15,346.11	\$ 3,419.57	
39	CR1	\$ 15,346.11	\$ 7,244.11	CR1	\$ 15,346.11	\$ 3,287.10	
40	R2, R4, R6, R8, R9 y CR1 `	\$ 6,848,777.35	\$ 3,107,714.24	R2, R3, R5, R6, R7 y CR1	\$ 7,982,029.49	\$ 1,709,731.79	
41	CR1	\$ 15,346.11	\$ 6,693.72	CR1	\$ 15,346.11	\$ 3,159.76	
42	CR1	\$ 15,346.11	\$ 6,434.42	CR1	\$ 15,346.11	\$ 3,037.36	
43	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 9,239.02	CR1	\$ 15,346.11	\$ 2,919.69	
44	CR1	\$ 15,346.11	\$ 5,945.55	CR1	\$ 15,346.11	\$ 2,806.59	
45	CP2, CP3 y CR1	\$ 1,429,520.67	\$ 532,384.59	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 160,089.49	
46	CR1	\$ 15,346.11	\$ 5,493.82	CR1	\$ 15,346.11	\$ 2,593.35	
47	CR1 y CR2	\$ 22,923.11	\$ 7,888.45	CR1	\$ 15,346.11	\$ 2,492.89	
48	CR1 y CR3	\$ 39,695.54	\$ 13,131.10	CR1	\$ 15,346.11	\$ 2,396.32	
49	CR1	\$ 15,346.11	\$ 4,879.77	CR1	\$ 15,346.11	\$ 2,303.49	
50	CP1, CP2, CP3 y CR1	\$ 3,205,754.43	\$ 979,878.65	CP3, CP4 y CR1	\$ 910,628.31	\$ 131,392.27	
		VPN_{PT} Total	\$ 16,503,448.30			VPN_{PLD} Total	\$ 5,415,629.71

PT=Pavimento Tradicional; PLD=Pavimento de Larga Duración; VPN=Valor Presente Neto; CR=Conservación Rutinaria; CP=Conservación Periódica; R=Reconstrucción

5 Discusiones

En seguida se presentan las discusiones de los resultados para los datos de diseño: tránsito, materiales y clima, los programas utilizados y el análisis del costo del ciclo de vida de las tres alternativas propuestas.

5.1 Datos para el diseño

De acuerdo con la MEPDG (Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecanicista, por sus siglas en inglés) hay tres niveles jerárquicos para la confiabilidad de los datos requeridos para el diseño, ponderando la información obtenida se considera que se encuentra en el nivel 3, ya que los valores de entrada son estimados o están basados en datos de lugares con características regionales similares.

En cuanto ventajas y desventajas (tabla 18) en función de las características de los programas el IMT-PAVE y el Per Road disponen de la ventaja de analizar cada capa por separado (módulo y espesor) y contemplar los criterios de falla comúnmente establecidos para el diseño de PLD: agrietamiento por fatiga y deformación permanente. Mientras que el Street Pave y el WinPas examinan una sola capa de concreto asfáltico sin considerar la relación del módulo dinámico con el espesor de la capa de CA. Los espesores de CA obtenidos con el Street Pave representan una desventaja al estar arriba del doble del espesor mínimo para un PLD. Una ventaja del WinPas es que permite ajustar los espesores de las capas en función del número estructural. Adaptar los datos de tránsito en los programas Street Pave y WinPas es complicado. En el Street Pave el espacio para colocar los rangos está limitado a diez valores. Si bien, el Per Road utiliza la distribución de vehículos de la FHWA, los datos mexicanos de tránsito pueden adaptarse con más facilidad que con la distribución utilizada en el WinPas. Al basarse mayormente en la metodología AASHTO 93 el WinPAS es relativamente sencillo de utilizar. Otra ventaja del IMT-PAVE y del Per Road es que son gratuitos, por el momento. No obstante, los cuatro programas brindan opciones de ayuda para la introducción de los datos, únicamente de los programas WinPas e IMT-PAVE se puede encontrar la guía del usuario en internet.

5.1.1 Tránsito

Se observó que el TDPA del 2005 al 2006 aumentó 48.5% y para el año 2007 desciende más del 50% en los tres tipos de vehículos. El año 2008 fue el año más crítico para autobuses y camiones. Situación que coincide con la temporada de violencia en Ciudad Juárez y el país (Cal y Mayor y Asociados, 2011). Se extendió hasta el año 2010, año en que el aumento del volumen de vehículos fue menor, en comparación con los registrados a partir del año 2011 cuando el TDPA aumentó un poco más de 2.5 veces respecto al 2010 (tabla 19 y figura 11).

El tránsito de camiones en el año 2008 registro la menor cantidad de vehículos aforados, 828, en el periodo 2003-2018 (tabla 19) aumentando el 57.7% para el año 2009. En cambio, el aforo de autobuses en el año 2008 indica cero (tabla 19) y los dos años subsecuentes los aforos indican

menos de 100 autobuses. Recuperándose hasta el año 2011 con un aumento del 400%. En el año 2012 los aforos fueron de velocidad por lo que se empleó una regresión lineal para obtener los datos de TDPA.

Los ESAL o EE se calcularon de dos maneras: con las ecuaciones del CSEP y con la ecuación AASHTO 93 para contrastar los resultados obtenidos manualmente con los adquiridos con los programas Street Pave y WinPAS que utilizan ESAL. Para hacer este cálculo es necesario disponer del TDPA actual correspondiente al año 2018.

El kilómetro donde se registró mayor TDPA es el 201.35 que corresponde a Ciudad Juárez en el sentido sur a norte con 22487 vehículos, de los cuales el 3148 (14%) corresponden a autobuses y transporte de carga. Tránsito que se utiliza para el diseño, debido a que el daño que causa una camioneta cargada que pese 6.5 ton sólo genera aproximadamente 0.0003 EE mientras que, un tracto camión articulado completamente cargado puede generar hasta 6 EE aproximadamente.

Para convertir a EE los datos vehiculares fue necesario calcular el ELAF. Se utilizó la tabla del Instituto del Asfalto (Anexo C) la cual se basa en los factores equivalentes de la guía AASHTO 93 $SN = 5$ y $p_t = 2.5$. De acuerdo con la guía estos datos proporcionan suficiente precisión para fines de diseño. Se calcularon los SN para una estructura tradicional y para una de larga duración, de esta última el SN fue 10.94, mientras que para la estructura tradicional el SN fue 3.6. Lo anterior confirma el hecho de que los PLD deben ser diseñados por métodos mecanicistas ya que sobre pasan los requerimientos estructurales utilizados por los métodos empíricos.

Debido a la transición de ESAL a espectros de carga para el análisis del tránsito, los programas utilizados tienen la opción de convertir la información, de no contar con datos de estaciones de pesaje. En particular el IMT-PAVE 3.0, programa desarrollado por el IMT en México, busca reflejar de manera representativa las características de la carga que circula por las carreteras del país al incluir las opciones: legal, ligera sobre carga, alta sobrecarga y muy alta sobre carga. En la guía rápida de usuario IMT- PAVE 3.0 se recomienda utilizar el nivel de alta sobrecarga para el diseño de carreteras de altas especificaciones conforme las cargas de tránsito que circulan por las carreteras del país. El diseño se realizó considerando primero la opción legal para después contrastar con la opción de alta sobrecarga. Observándose que es necesario ajustar los espesores de dos últimas capas de CA y el espesor de la base para cumplir con la vida de diseño para ambos criterios de falla (fatiga y deformación) cuando se utiliza el nivel de alta sobrecarga, lo que aumenta considerablemente el espesor total del pavimento. Otra opción es utilizar una base estabilizada.

Para el programa Per Road se adaptaron los datos de tránsito. Per Road emplea diez categorías en total (basadas en la clasificación de la FHWA): nueve para camiones y una para autobuses. Mientras que el IMT-PAVE utiliza dos clasificaciones de autobuses, cinco para camiones e incluye autos. Los valores de los espectros de carga en el Per Road se calculan a partir del tipo de camino y los porcentajes asignados a cada clasificación vehicular. El resultado arroja la distribución de la carga por eje, expresada en porcentaje y en rangos de 2 kip. Los espectros de carga en los programas IMT-PAVE y Per Road se calculan en función a datos estadísticos de carreteras en México y Estados Unidos respectivamente.

5.1.2 Materiales

En correspondencia con la norma M-MMP-1-02/03 de la SCT y basándose en la clasificación SUCS, la muestra 1 de la base se clasificó en función de: 55.2% pasó la malla no. 4 lo que indica que es una arena, el 7.1% paso la malla 200 y no presentó plasticidad. Al tener un coeficiente de uniformidad (C_u) de 39 y un coeficiente de curvatura (C_c) de 2.5 se clasifica como arena bien graduada. El porcentaje de finos se encuentra entre el 5% y el 12% y al no exhibir plasticidad corresponden a un limo, consecuentemente se clasificó como arena bien graduada limosa SW-SM. Siguiendo el mismo procedimiento con la muestra 2. El 47% pasó la malla no. 4 lo cual denota que es una grava y al tener un C_c de 5 se clasificó como mal graduada. El 8.1 % pasó la malla 200 combinado con los resultados de plasticidad corresponden a una arcilla de baja compresibilidad al tener un LL de 30.4 y un IP de 10.1 (tabla 25), se clasificó como grava mal graduada arcillosa GP-GC.

Respecto al terreno natural en ambas muestras (tabla 26) más del 50% pasó la malla no.4 y menos del 50% paso la malla 200 lo que demuestra que es una arena. Sin embargo, en la muestra 1 el 36.49% pasó la malla 200 mientras que, para la muestra 2 sólo el 18.45% ambas tienen finos limosos; el LL y el IP de la muestra 1 son de 23.57% y 3.23% respectivamente, por consiguiente, se clasificaron como arenas limosas SM.

Las figuras 14 y 15 despliegan la curva granulométrica de las muestras del material de la capa base, se observa que la curva de la muestra 1 queda mayormente en la zona menor a un millón de ejes equivalentes ($\Sigma L \leq 10^6$). En cambio, la parte media de la curva de la muestra 2 se encuentra en la zona mayor a un millón de eje equivalentes ($\Sigma L > 10^6$). Cabe destacar que al ser parte de una estructura que tiene más de 20 años en servicio las cargas y el tránsito tienden a triturar las partículas lo que provoca una reducción en sus tamaños hecho que influye en los análisis granulométricos.

De acuerdo con la norma N-CMT-4-05-003/16 una mezcla asfáltica de granulometría densa, diseñada mediante el método Marshall y con un número de ejes equivalentes de diseño $10^6 < \Sigma L \leq 107$ el valor de la estabilidad debe ser como mínimo de 8000 N y un valor de flujo entre 2 mm y 3.5 mm. Para la muestra 1 el valor promedio de la estabilidad fue de 6180 N y para la muestra 2 fue de 4350 N. mientras que los valores de estabilidad en ambas muestras son 4.5 veces mayores que los valores rango de la norma. Respecto a los agregados, la mezcla cumple con los requisitos de calidad referente a la granulometría especificados en la norma N-CMT-4-04/17 para material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa con un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " (19 mm). En la siguiente tabla se muestran los rangos de granulometría establecidos en la norma.

Tabla 49. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa y tamaño nominal de ¾" (19mm).

Malla	Tamaño nominal ¾"	
	% Pasa	
1	100	100
¾	90	100
½	72	89
⅜	60	82
¼	44	71
No. 4	37	64
No. 10	20	46
No. 20	12	35
No. 40	8	27
No. 60	6	21
No. 100	4	16
No. 200	2	8

5.1.3 Clima

Las temperaturas máxima, mínima y media anuales registradas en las tres estaciones son similares y concuerdan con la distribución climática del estado; el tipo de clima muy seco se encuentra al norte, noreste y este del estado mientras que, en el centro y sur el tipo de clima es seco, por tal motivo conforme se avanza más al sur del estado la temperatura disminuye y las precipitaciones aumentan (tabla 30).

Per Road 4.4 brinda la opción de considerar la rigidez del asfalto en función de la temperatura. El programa solicita repartir las 52 semanas del año en las cuatro estaciones (primavera, verano, otoño e invierno) e indicar una temperatura media. Debido a que, el comportamiento de la temperatura entre las tres estaciones climatológicas es muy similar se asignó el mismo número de semanas para cada estación del año (tabla 31). Ciudad Juárez es en donde se registran las temperaturas más altas en verano y las más bajas en invierno, aunque las variaciones respecto a los otros dos puntos son entre 1 y 2 °C. La temperatura influye en la selección del grado PG del ligante asfáltico, se investigó que el asfalto utilizado en la región es 76-22 y 70-22 AC-20 los cuales se modifican con polímero, aunque también se utiliza el 64-22 sin modificar. En teoría, incrementar la rigidez del ligante asfáltico hace menos susceptible la mezcla a las roderas, pero aumenta la susceptibilidad al agrietamiento.

Para calcular el espesor del concreto asfáltico el programa Street Pave requiere el dato de la temperatura media del aire. En la opción de ayuda, despliega un mapa que muestra la imagen de Estados Unidos dividido en tres regiones con un valor de temperatura media cada una. Se seleccionó la opción de 15.6°C (60°F) la cual corresponde a la región más cercana al punto de estudio.

5.2 Diseño final del PLD

Se eligieron las estructuras base de Texas y Nuevo México debido a que el grado PG de los asfaltos es similar al utilizado en el área de estudio además de que se brindaban los valores del módulo dinámico utilizado en las mezclas de concreto asfáltico. El arreglo de los módulos dinámicos para las capas y las especificaciones de las mezclas utilizadas para la estructura de PLD también se consideraron en la selección.

El programa IMT-PAVE 3.0 no permite capas con espesores menores a 4 cm. Para cumplir con los criterios de falla, la vida útil a la fatiga y a la deformación permanente deben ser mayores al horizonte de proyecto. Para cumplir ambos requisitos es necesario emplear una base estabilizada, en especial si se recurre al nivel de alta sobrecarga en los espectros de carga. Si se requiere utilizar una base granular, se debe aumentar el espesor de las capas asfálticas o modificar el módulo, pero en primera instancia debe realizarse el ajuste de espesores.

De las muestras base corridas en el IMT-PAVE 3.0 con la opción de carga legal 26 cumplen ambos criterios mientras que con la opción de alta sobrecarga sólo nueve cumplen y todas utilizan base estabilizada. Una corresponde a la estructura base 4 de Ohio utilizando los valores de los módulos de Ohio. Cuatro corresponden a la estructura base 5, también de Ohio y es la estructura de mayor espesor. Las últimas cuatro pertenecen a la estructura base 6 de Texas. La estructura seleccionada para el diseño final es la del programa IMT. No obstante, la estructura del programa Per Road es de menor espesor, al correrla en el programa IMT-PAVE no cumple con ambos criterios. En la tabla 50 se despliegan el espesor del concreto asfáltico y el espesor total de las seis estructuras base y de las estructuras finales de los programas IMT-PAVE y Per Road. De las estructuras base la número 3 (Nuevo México) es la de menor espesor de CA y menor espesor total. La estructura del IMT-PAVE tiene un espesor de CA de 28 cm el cual cumple con el rango para un PLD. Nunn y Ferne, 2001 sugieren un espesor del concreto asfáltico entre 20 cm y 39 cm; Walubita et al., 2010 propone un rango entre 30 cm a 35 cm y Sargand et al., 2015 y Tran et. al, 2016 proponen mantenerlo entre 20 cm y 40 cm.

Tabla 50. Espesores totales y del concreto asfáltico de las seis estructuras base y de las estructuras seleccionadas de los programas IMT-PAVE y Per Road.

Estructura		Espesor (cm)	
		CA	Total
1	Nuevo México	25	40
2		25.5	40.5
3		22	37
4	Ohio	35	50
5		37.5	52.5
6	Texas	32.5	52.5
Final	IMT-PAVE	28	53
	Per Road	15.24	33.02

Para el nivel de alta sobrecarga de los espectros de carga del programa IMT-PAVE se corrieron 155 iteraciones, de las cuales, únicamente 55 cumplieron con ambos criterios de falla. De esas 55 estructuras, 12 tuvieron espesores de concreto asfáltico menores a 25 cm y espesores totales entre 47 cm y 50 cm, con módulos dinámicos entre 3400 MPa y 10000 MPa. Por otro lado 18

estructuras cumplieron ambos criterios con valores del módulo dinámico menores a 10,000 MPa, pero espesores de concreto asfáltico de 28 cm a 47 cm y espesores totales de 47 cm a 67 cm. Otro factor por considerar es el espesor de la base que varía de 15 cm a 25 cm. Recurrir a una base estabilizada con un M_R de 2900 MPa influyó para cumplir con los criterios de falla sin modificar los espesores de las estructuras base cuando los módulos de las capas estaban entre 3400 MPa y 10000 MPa. Para reducir espesores de las capas de concreto asfáltico se resolvió aumentar el espesor de la base considerando que una base estabilizada con cemento representa el 37% del precio de una mezcla asfáltica de granulometría densa con AC-20 sin modificar.

Per Road es el programa que utiliza más datos para el análisis de la estructura propuesta para diseño. Para validar el diseño efectuado con el Per Road 4.4 se establecieron como criterios de falla: la deformación por tensión en el fondo de la capa de concreto asfáltico y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante, si uno de los dos criterios no se cumple el diseño no pasa y deben ajustarse los espesores de las capas de CA. Para establecer los valores de los umbrales de falla, Tran et. al, 2016 sugiere una distribución de las deformaciones horizontales por tensión (HSD) en el fondo de la última capa de CA, la otra opción recomendada es utilizar el valor conservador de 70 $\mu\epsilon$. Para este estudio se optó por utilizar la HSD como umbral.

En el 2001, Von Quintus comentó que hay un límite para el cual el número de repeticiones de carga se vuelve demasiado grande que las pruebas de laboratorio confirman que la resistencia a la fatiga de la mezcla se vuelve poco práctica. Además de que los valores de 65 $\mu\epsilon$ y 70 $\mu\epsilon$ se consideran muy conservadores; de acuerdo con Tran, et al. 2016, quien también comenta que, para aprobar el diseño la distribución acumulativa de la deformación por tensión en el fondo de la capa de CA se evalúa con la distribución de deformación limitante listada en la tabla 10, la cual fue elaborada con datos de mediciones en campo. Según Tran, et al. 2016, un valor único para el umbral de deformación de diseño no representa adecuadamente la resistencia al agrietamiento del fondo hacia arriba debido a la fatiga.

Para cumplir con el criterio de falla por deformación, el 50% de la distribución de la deformación vertical en la superficie de la subrasante debe ser menor a 200 $\mu\epsilon$ la literatura comenta que el valor es conservador, pero ha funcionado por lo que es el valor utilizado actualmente y el aplicado en este estudio.

De las 246 iteraciones realizadas con el Per Road, 25 no cumplieron con los criterios de falla establecidos. Que el 90 % de las iteraciones corridas con el programa Per Road 4.4 cumplan con los criterios de falla indica que los valores umbrales definidos para el análisis del desempeño de la estructura son conservadores. En las 25 iteraciones que no cumplieron con los valores umbrales se redujo el espesor de las capas de concreto asfáltico al 50% respecto a las estructuras base y se utilizaron valores para los módulos dinámicos de 2400 MPa, 3400 MPa y 4400 MPa. El espesor total de las estructuras fue de 25.4 cm y 30.48 cm. Cuando se aumentó el valor de los módulos del CA y se utilizó un grado PG 76-22 en la capa de la superficie la combinación de la estructura cumplió con los criterios de falla (iteración 232, anexo A).

Los espesores de los diseños base cumplieron en el programa Per Road, mientras que el IMT-PAVE requirió aumentar los espesores y utilizar una base estabilizada para cumplir con el criterio de deformación. La estructura final seleccionada con el Per Road, se probó con el IMT-

PAVE y no pasó el análisis espectral en cambio, el diseño final seleccionado con el IMT-PAVE, si aprobó el análisis realizado con el Per Road motivo por el que la estructura final del IMT-PAVE fue seleccionada como diseño final.

5.3 Comparativo de costos del PLD y costos de las reparaciones del tramo mediante el LCCA

Las tablas 51 y 52 muestran el resumen del LCCA del proyecto, comparando el VPN de un pavimento flexible tradicional y un pavimento flexible de larga duración, para un periodo de 50 años, una tasa de descuento real del 4.03%, y tres alternativas de diseño:

- 1) Reconstruir el tramo con pavimento tradicional (reconstrucción de la subrasante y de la capa de base hidráulica).
- 2) Reconstruir el tramo con PLD demoliendo la estructura actual (demolición de la estructura de pavimento actual, construcción de la subrasante, la capa base y del PLD).
- 3) Reconstruir el tramo con PLD utilizando la estructura actual como capa base (bacheo profundo aislado del concreto asfáltico y fresado de la superficie).

Tabla 51. Porcentaje del VPN de las tres alternativas de pavimento sin considerar los costos para el usuario.

	Pavimento Tradicional	PLD	PLD sobre estructura existente
%VPN	100%	65%	54%

Tabla 52. Porcentaje del VPN incluyendo los costos para el usuario de las tres alternativas de pavimento

	Pavimento Tradicional	PLD	PLD sobre estructura existente
%VPN	100%	72%	63%

Los resultados muestran que las alternativas de PLD representan el 65% y el 54% de reducción en los costos totales a largo plazo cuando los costos para el usuario se asumen iguales para ambas alternativas. En cambio, si se contemplan los costos para el usuario la reducción hasta el 37% y 28%. Considerando que el usuario asumirá el costo de la alternativa que se le presente, en cambio la compañía constructora, y en este caso el gobierno, es el que lidiará con los gatos de construcción, estos son los que deben regir en la selección de la alternativa. Por lo anterior, se propone considerar los costos para el usuario de manera independiente a los de la agencia.

Se pudo observar que la programación y la estimación de los costos de las actividades tienen un impacto significativo en los resultados del LCCA. En México, los periodos para la conservación rutinaria son anuales y para la conservación periódica de 3 a 6 años mientras que los trabajos de reconstrucción son cada 10 años, o bien, se realizan contratos plurianuales que integran todo lo anterior y tienen una duración de 7 años, aunque desde la administración pasada se comenzó con el esquema de Asociación Público-Privada (APP) el cual tiene como objetivos: elevar la calidad

del servicio, uniformar los estándares en los tramos y disminuir los COV (Memoria Documental, SCT 2018).

Realizar el mantenimiento de la superficie de rodamiento cada cinco años, disminuye los costos futuros de las opciones con PLD, en comparación con el pavimento tradicional que además deberá ser reconstruido a la mitad del tiempo que el PLD. En la gráfica mostrada en la figura 27, a partir del quinto año la diferencia del VPN entre los dos tipos de estructuras analizadas es notoria.

6 Conclusiones

La calidad del diseño depende de la precisión de los datos de entrada. Materiales de buena calidad, una mezcla asfáltica adecuada, un diseño óptimo ajustado a las especificaciones y sin sobredimensionamiento además de un control de calidad riguroso durante el proceso de construcción pueden ayudar a lograr con éxito la implementación de un PLD. Combinar la metodología empírica con la analítica, resulta muy favorable para el estudio de pavimentos debido a que, las condiciones controladas de laboratorio no son totalmente representadas en campo.

6.1 Conclusiones del proyecto

- Actualmente México se encuentra en un periodo de transición del sistema tradicional de diseño a las nuevas metodologías, las cuales no pueden avalarse completamente ya que aún mantienen como teóricos los resultados de los análisis mecanistas realizados, sobre todo al utilizar datos estimados o estadísticos de regiones con características similares de tránsito y clima.
- Conocer las características mecánicas de los elementos disponibles para la construcción de pavimento influye en la durabilidad, calidad y costo de este. Invertir en estudios de los materiales beneficia en una mayor precisión de los espesores de las capas y en la selección del material adecuado para las condiciones bajo las cuales se desempeñará el pavimento.
- Es necesario contar con datos de pesaje para la elaboración de espectros de carga específicos para el tramo de estudio.
- Se requiere de información accesible para el desarrollo de modelos climáticos apegados a las condiciones de la región en donde se construirá el pavimento.
- Un nivel más alto de certeza en el diseño requiere una mayor cantidad de recursos que muchas compañías no están dispuestas a invertir, ya que consideran que la observación y experiencia en campo son herramientas suficientes.
- Un valor de SN mayor que seis confirma que los PLD deben ser diseñados por métodos mecanistas ya que sobrepasan los requerimientos estructurales utilizados por los métodos empíricos.
- Las pruebas de laboratorio para determinar el módulo resiliente no son habituales aún se utilizan los valores establecidos por la guía AASHTO 1993.
- Establecer los límites para los criterios de falla representa un reto puesto que deben calibrarse específicamente para la región en donde se van a utilizar. Lo que implica realizar pruebas de laboratorio y campo que avalen estadísticamente los resultados.
- El costo inicial de un PLD es 30% mayor que el de un pavimento tradicional, sin embargo, el costo de las actividades de conservación representa el 30% de las de un pavimento tradicional.
- La selección de la alternativa a construir debe ser en función a los costos para la agencia, debido a que para el usuario la diferencia es mínima. Al incluir los costos para el usuario la diferencia entre el VPN de la estructura tradicional y el PLD se reduce a 3% contra el 56% que representa únicamente considerando los costos para la agencia.

- La alternativa de construir el PLD sobre la estructura actual resultó ser la más económica.
- La programación de las actividades de conservación influye considerablemente en el cálculo del VPN.

6.2 Trabajo futuro

- Se sugiere obtener los espectros de carga del tramo de estudio en particular. Y en general de las carreteras de altas especificaciones, que son por las que circulan los vehículos con las máximas dimensiones y carga (NOM-012-SCT-2-2017).
- Calibrar las funciones de transferencia para el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente con datos de concretos asfálticos utilizados en la región del tramo de estudio, para lograr diseños más apegados a las condiciones locales.
- Considerar en el diseño y en las actividades de conservación rutinaria utilizar concreto asfáltico reciclado (RAP, por sus siglas en inglés), lo que conllevaría a realizar pruebas a la mezcla para encontrar la cantidad máxima de RAP apropiada para el tramo de estudio o diseño.
- Realizar un estudio para valorar estructuras de pavimento flexible en servicio con el potencial de convertirse en PLD, incluyendo en los mecanismos de falla el agrietamiento reflectivo y el envejecimiento de la mezcla asfáltica.

Referencias bibliográficas

Asphalt Pavement Alliance (APA), 2010. *Asphalt Pavment Alliance*. [Online] Available at: http://www.asphaltrroads.org/assets/_control/content/files/Perpetual_Pavement_Synthesis.pdf [Accessed 9 mayo 2018].

Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2018. *sct.gob.mx*. [Online] Available at: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Tabulador/Tabulador_SCT_2018.pdf [Accessed 19 febrero 2019].

American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008. [Online] Available at: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712666/AASHTO08.pdf> [Accessed 24 mayo 2018].

American Concrete Pavement Association (ACPA), 2012. <http://www.acpa.org>. [Online] Available at: <http://www.acpa.org/wp-content/uploads/2014/07/EB011-An%C3%A1lisis-del-Costo-del-Ciclo-de-Vida.pdf> [Accessed 11 octubre 2018].

Arévalo Maldonado, D. F., 2015. *UTPL Univeridad Técnica Particular de Loja*. [Online] Available at: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/13172/1/AREVALO%20MALDONADO%20DIEGO%20FERNANDO.pdf> [Accessed 8 marzo 2019].

Australian Asphalt Pavements Association(AAPA), 2015. aapa.asn.au. [Online] Available at: <https://www.aapa.asn.au/wp-content/uploads/2017/09/Technical-Background-to-the-Development-of-the-AAPA-Long-Life-Asphalt-Pavement-Design-Procedure-.pdf> [Accessed 7 octubre 2019].

Babashami, P., Yusoff, N. I. M. & Ceylan, H., 2016. *science direct*. [Online] Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004> [Accessed 25 mayo 2018].

Behbahani, H., Khaki, A. M. & Amini, A., 2009. *Research Gate*. [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/281446891_Assessment_of_Perpetual_Pavement_Performance_using_Mechanistic-Empirical_Pavement_Design_Guide_M-E_PDG_and_PerRoad_Software_Models [Accessed 20 octubre 2019].

Braham, A., 2017. *Fundamentals of Sustainability in Civil Engineering*. Boca Raton: CRC Press by Taylor and Francis Group , LLC.

Cal y Mayor y Asociados, 2011. *calymayor.com.mx*. [Online] Available at: <https://www.calymayor.com.mx/es/documentos/Presentacion%20PIBvsAforos%20Jun%202011.pdf> [Accessed 20 septiembre 2019].

Dirección General de Autotransporte Federal, Subsecretaría de Transporte, 2019. *sct.gob.mx*. [Online] Available at: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASICA/EST_BASICA_2018/_Estad%C3%ADstica_B%C3%A1sica_del_Autotransporte_Federal_2018.pdf [Accessed 1 junio 2019].

Engie México, 2016. *bnbahumada*. [Online] Available at: <https://bnbahumada.com/pdf/evaluacion-bnb.pdf> [Accessed 23 septiembre 2019].

Espinosa Arreola, J. d. J., 2017. *cmicveracruz.org*. [Online] Available at: http://www.cmicveracruz.org/filesWeb/Pavimentos_de_Larga_Duracio%CC%81n_CMIC2017.pdf [Accessed 10 agosto 2018].

European Asphalt Pavement Association (EAPA) and National Asphalt Pavement Association (NAPA), 2011. *EAPA*. [Online] Available at: <http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/GL101-2nd-Edition.pdf> [Accessed 25 mayo 2018].

European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2007. *EAPA*. [Online] Available at: http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/llp_technical2007.pdf [Accessed 25 mayo 2018].

Federal Highway Administration (FHA), 2015. *FHWA*. [Online] Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/15049/15049.pdf> [Accessed 25 mayo 2018].

Federal Highway Administration, 2002. *fhwa.dot.gob*. [Online] Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/asset/lcca/010621.pdf> [Accessed 11 noviembre 2018].

Flintsch, G. & Fernández-Gómez, W., 2015. Costo del Ciclo de Vida de Tres Alternativas de Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos. *Vial*, Issue 106, pp. 84-90.

Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), 2004. *Research Gate*. [Online]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/37463724_ELLPAG_Phase_1_A_Guide_to_the_Use_of_Long-Life_Fully-Flexible_Pavements
[Accessed 25 mayo 2018].

Garber, N. J. & Hoel, L. A., 2005. *Ingeniería de tránsito y carreteras*. 3a ed. Mexico: Thomson.

García, J. & Hansen, K., 2001. *Guía para seleccionar el tipo de mezcla asfáltica en caliente para pavimentos*. Washington, DC: National Asphalt Pavement Association y Federal Highway Administration.

Garnica, P., Hernández, R. & Castellanos, A., 2016. *Notas-Instituto Mexicano del Transporte*. [Online]
Available at: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=427&IdBoletin=159>
[Accessed 15 enero 2019].

Gómez Martínez, R., Cruz Vargas, J., Dávalos Arriaga, D. & Arenas García, L., 2017. *www.gob.mx/cenapred*. [Online]
Available at:
<http://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/15a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/Vulnerabilidad%20de%20estructuras%20puentes/00%20ACTIVIDAD%201/Actividad%201.%20Recopilacion1.pdf>
[Accessed 4 julio 2019].

Huang, Y. H., 2004. *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

INAFED Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2010. *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. [Online]
Available at: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM08chihuahua/index.html>
[Accessed 18 septiembre 2019].

Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2018. *imip.org.mx*. [Online]
Available at: <http://imip.org.mx/descargas/Radiografia2019.pdf>
[Accessed 23 septiembre 2019].

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017. *INEGI*. [Online]
Available at: <http://www.inegi.org.mx>
[Accessed 24 febrero 2019].

Jiang, Y., Li, S., Nantung, T. & Chen, H., 2008. *Analysis and Determination of Axle Load Spectra and Traffic Input for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, West Lafayette: s.n.

Kollaros, G. & Athanasopoulou, A. y. K. A., 2017. *Research gate*. [Online]
Available at:

<https://www.researchgate.net/publication/318857804> Perpetual flexible pavement design life [Accessed 25 mayo 2018].

Kraemer, C. & al., e., 2003. *Ingeniería de Carreteras Volumen I*. Madrid: Mc Graw Hill.

Limón Garduño, L. & Espinoza Arreola, J. d. J., 2017. AMAAC. [Online] Available at: [http://www.amaac.org.mx/archivos/5 la importancia de la conservacion en mexico jjea.pdf](http://www.amaac.org.mx/archivos/5%20la%20importancia%20de%20la%20conservacion%20en%20mexico%20jjea.pdf) [Accessed 8 mayo 2018].

Martin, T. & Choummanivong, L., 2016. *Science Direct*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516303179> [Accessed 25 mayo 2018].

Mazumder, M., Kim, H. & Lee, S.-J., 2015. *Research gate*. [Online] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/311735063> Perpetual Pavement Future Pavement Network

Moreno Fierros, F. J., 2017. AMAAC. [En línea] Available at: [http://www.amaac.org.mx/archivos/19 disen0 estructural y de mezclas asfalticas de alto desempeño para pavimentos de larga duracion fjmf.pdf](http://www.amaac.org.mx/archivos/19%20diseno%20estructural%20y%20de%20mezclas%20asfalticas%20de%20alto%20desempeno%20para%20pavimentos%20de%20larga%20duracion%20fjmf.pdf) [Último acceso: 7 mayo 2017].

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2010. *The National Academies Press*. [Online] Available at: <http://nap.edu/14360> [Accessed 9 septiembre 2019].

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2014. *Using Existing Pavement in Place and Achieving Long Life*, Washington, D.C: The National Academy Press.

National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2001. *tbr.org*. [Online] Available at: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices cc.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_cc.pdf) [Accessed 6 febrero 2019].

Newcomb, D. & Hansen, K., 2006. *Reseach Gate*. [Online] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/237802061> [Accessed 5 abril 2019].

Nunn, M. & Ferne, B., 2001. *www.asphaltroads.org*. [Online] Available at: [http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20on%20Perpetual %20Pavements%20 503 974913343 112006174022%281%29.pdf](http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20on%20Perpetual%20Pavements%20503%20974913343%20112006174022%281%29.pdf) [Accessed 6 junio 2018].

O'Flaherty, C. e. a., 2002. *Highways The location, design, construction and maintenance of road pavements*. Malta: Butterworth-Heinemann.

Palacios Carbajal, C. E., 2017. *Repositorio Instucional Universidad Saleciana*. [Online] Available at: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14296> [Accessed 27 marzo 2019].

Papagiannakis, A. & Masad, E., 2008. *Pavement Design and Materials*. New Jersey: Wiley.

Qin, J., 2010. *Semantic Scholar*. [Online] Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Predicting-Flexible-Pavement-Structural-Response-Qin/74a4cf35c1da50b00a09de185440f6e1d18fb5ba> [Accessed 19 octubre 2019].

Reyes Valle, B., 2006. *Aplicación metodológica en el diseño de pavimentos flexibles en carreteras de altas especificaciones y avances tecnológicos*. [Online] Available at: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1645> [Accessed 8 abril 2019].

Sanchez Miranda, N., 2016. [Online] Available at: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/jspui/bitstream/123456789/123456789/1/tesis.pdf> [Accessed 13 septiembre 2019].

Sargand, S. et al., 2015. *Implementation and Thickness Optimization of Perpetual Pavements in Ohio*. [Online] Available at: https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=ohiou1275612839&disposition=attachment [Accessed 16 octubre 2019].

Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT) Dirección General de Servicios Técnicos, 2012. *SCT*. [Online] Available at: <http://www.sct.gob.mx/normatecaNew/conceptos-que-conforman-el-proyecto-ejecutivo-de-carreteras/> [Accessed 5 mayo 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) e Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2002. *SCT*. [Online] Available at: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt197.pdf> [Accessed 10 octubre 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) Instituto Mexicano del Transporte(IMT), 2004. *www.imt.mx*. [Online] Available at: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt258.pdf> [Accessed 04 junio 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1998. *www.imt.mx*. [Online]

Available at: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>
[Accessed 18 septiembre 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2004. *SCT*. [Online]

Available at: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt245.pdf>
[Accessed 4 junio 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, 2014. *imt.mx*. [Online]

Available at: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt409.pdf>
[Accessed 23 noviembre 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT, 2018. *SCT Transparencia*. [Online]

Available at: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/Transparencia/rendicion-de-cuentas/MD/40_MD.pdf

[Accessed 29 septiembre 2019].

Secretaria de Comunicaciones y Transporte, 2016. *www.gob.mx/sct*. [Online]

Available at: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>
[Accessed 30 noviembre 2018].

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Dirección General de Servicios Técnicos, 2013. *www.sct.gob.mx*. [Online]

Available at: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Catalogo_Pavimentos/Catalogo.pdf

[Accessed 25 abril 2018].

Secretaria de Comunicaciones y Trasportes (SCT) Dirección General de Servicios Técnicos, 2014. *SCT*. [Online]

Available at: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf>

[Accessed 8 mayo 2018].

Secretaría de Gobernación, Diario Oficial de la Federación, 2006. *diario oficial de la federación*. [Online]

Available at: <https://canacar.com.mx/app/uploads/2016/02/3.-Sobre-el-Peso-y-Capacidad-de-los-Vehiculos-de-AurotTransistanCPJurisdFed.pdf>

[Accessed 20 agosto 2018].

Soto Espitia, R., Cincire, V. & Vázquez, J. R., 2013. *AMAAC*. [Online]

Available at: www.amaac.org.mx/archivos/eventos/8cma.../estructuracion06.pdf

[Accessed 22 mayo 2018].

Sultan, S. A. & Guo, Z., 2017. *sciencedirect.com*. [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016300351#!>

[Accessed 10 octubre 2019].

Tarefder, R. & Bateman, D., 2009. *Future Design of Perpetual Pavements for New Mexico*, Albuquerque: NMDOT Research Bureau.

Tarefder, R. & Bateman, D., 2012. *asce library*. [Online] Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000259> [Accessed 3 mayo 2019].

Torres, G., Hernández, S., González, A. & Arroyo, A., 2019. *imt.mx*. [Online] Available at: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=478&IdBoletin=176> [Accessed 30 septiembre 2019].

Tran, N. et al., 2016. *Auburn University*. [Online] Available at: <http://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep15-05.pdf> [Accessed 20 Septiembre 2019].

Von Quintus, H. L., 2001. *tbr.org*. [Online] Available at: [http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20on%20Perpetual%20Pavements%20503 974913343 112006174022%281%29.pdf](http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20on%20Perpetual%20Pavements%20503%20974913343%20112006174022%281%29.pdf) [Accessed 6 junio 2018].

Walubita, L., Liu, W. & Scullion, T., 2010. *The Texas Perpetual Pavements: Experience Overview and the way forward*. [Online] Available at: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-4822-3.pdf> [Accessed 7 febrero 2019].

Anexo A. Iteraciones realizadas con los programas IMT-PAVE 3.0 y Per Road 4.4

Tabla 53. Iteraciones realizadas con el nivel de carga legal del programa IMT-PAVE 3.0 con las seis estructuras base y las dos estructuras propuestas.

Estructura	Iteración	Nivel de carga legal													
		Espesor de la capa (cm)				Espesor total (cm)			Módulo de la capa (MPa)					Falla (años)	
		1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	Deformación	
Mejor desempeño por AF Tarefder 2012	1	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	207	145	>40	4.3	
	2	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	207	145	>40	2.9	
	3	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	207	145	>40	4.9	
	4	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	207	145	>40	7.8	
	5	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	2900	145	>40	26.7	
	6	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	2900	145	>40	19.2	
	7	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	2900	145	>40	29.5	
	8	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40	
Sin la capa RBL Tarefder 2012	9	7.5	18	-	15	25.5	40.5	3400	10000	-	207	145	>40	19.1	
	10	7.5	18	-	15	25.5	40.5	2400	6800	-	207	145	>40	9.7	
	11	7.5	18	-	15	25.5	40.5	4400	6000	-	207	145	>40	10.8	
	12	7.5	18	-	15	25.5	40.5	10000	8200	-	207	145	>40	24.7	
	13	7.5	18	-	15	25.5	40.5	3400	10000	-	2900	145	>40	>40	
	14	7.5	18	-	15	25.5	40.5	2400	6800	-	2900	145	>40	>40	
	15	7.5	18	-	15	25.5	40.5	4400	6000	-	2900	145	>40	>40	
	16	7.5	18	-	15	25.5	40.5	10000	8200	-	2900	145	>40	>40	
Basada en estructura de Nuevo México Tarefder 2009	17	6	10	6	15	22	37	3400	10000	3400	207	145	>40	2.5	
	18	6	10	6	15	22	37	2400	6800	3400	207	145	>40	2.1	
	19	6	10	6	15	22	37	4400	6000	6700	207	145	>40	2.6	
	20	6	10	6	15	22	37	10000	8200	5500	207	145	>40	4.0	

	21	6	10	6	15	22	37	3400	10000	3400	2900	145	>40	17.2
	22	6	10	6	15	22	37	2400	6800	3400	2900	145	>40	12.4
	23	6	10	6	15	22	37	4400	6000	6700	2900	145	>40	17.4
	24	6	10	6	15	22	37	10000	8200	5500	2900	145	>40	25.4
Basada en estructura de Ohio Sargand 2015	25	5	10	20	15	35	50	3400	10000	3400	207	145	>40	27.1
	26	5	10	20	15	35	50	2400	6800	3400	207	145	>40	20.2
	27	5	10	20	15	35	50	4400	6000	6700	207	145	>40	>40
	28	5	10	20	15	35	50	10000	8200	5500	207	145	>40	>40
	29	5	10	20	15	35	50	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
	30	5	10	20	15	35	50	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
	31	5	10	20	15	35	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
	32	5	10	20	15	35	50	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
Basada en estructura de Ohio Qin 2010	33	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	207	145	>40	>40
	34	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	6800	3400	207	145	>40	31.3
	35	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6000	6700	207	145	>40	>40
	36	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	207	145	>40	>40
	37	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
	38	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
	39	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
	40	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
Basada en estructura de Texas Walubita 2010	41	5	20	7.5	20	32.5	52.5	3400	10000	3400	179	145	>40	33.8
	42	5	20	7.5	20	32.5	52.5	2400	6800	3400	179	145	>40	20.3
	43	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6000	6700	179	145	>40	27.5
	44	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	8200	5500	179	145	>40	40
	45	5	20	7.5	20	32.5	52.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
	46	5	20	7.5	20	32.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
	47	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
	48	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40

Propuesta 1	49	5	10	5	20	20	40	3400	10000	3400	207	145	>40	2.9
	50	5	10	5	20	20	40	2400	6800	3400	207	145	>40	2
	51	5	10	5	20	20	40	4400	6000	6700	207	145	>40	2.8
	52	5	10	5	20	20	40	10000	8200	5500	207	145	>40	4.1
	53	5	10	5	20	20	40	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
	54	5	10	5	20	20	40	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
	55	5	10	5	20	20	40	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
	56	5	10	5	20	20	40	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
Propuesta 2	57	5	15	20	15	40	55	3400	10000	2900	207	145	>40	>40
	58	5	15	20	15	40	55	2400	6800	2900	207	145	>40	38
	59	5	15	20	15	40	55	4400	6000	2900	207	145	>40	39
	60	5	15	20	15	40	55	10000	8200	2900	207	145	>40	>40

CA=Concreto Asfáltico; SR= Subrasante

Tabla 54. Iteraciones realizadas con el nivel de alta sobrecarga del programa IMT-PAVE 3.0 con las seis estructuras base, las dos estructuras propuestas y los ajustes de espesores y módulos realizados.

Nivel de alta sobrecarga													
Iteración	Espesor de la capa (cm)				Espesor (cm)		Módulo de la capa (MPa)					Falla (años)	
	1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	Deformación
1	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	207	145	>40	1.5
2	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	5000	207	145	>40	1.9
3	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	207	145	>40	1
4	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6800	3400	207	145	>40	1.3
5	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	207	145	>40	1.7
6	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	207	145	>40	2.7
7	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	3400	2900	145	>40	8.9
8	7.5	10	7.5	15	25	40	3400	10000	5000	2900	145	>40	10.4
9	7.5	10	7.5	15	25	40	2400	6800	3400	2900	145	>40	6.5
10	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6800	3400	2900	145	>40	7.8
11	7.5	10	7.5	15	25	40	4400	6000	6700	2900	145	>40	9.8
12	7.5	10	7.5	15	25	40	10000	8200	5500	2900	145	>40	14.2
13	7.5	18	-	15	25.5	40.5	3400	10000	-	207	145	>40	6.4
14	7.5	18	-	15	25.5	40.5	5000	10000	-	207	145	>40	7.6
15	7.5	18	-	15	25.5	40.5	2400	6800	-	207	145	>40	3.4
16	7.5	18	-	15	25.5	40.5	4400	6000	-	207	145	>40	3.7
17	7.5	18	-	15	25.5	40.5	10000	8200	-	207	145	>40	8.3
18	7.5	18	-	15	25.5	40.5	3400	10000	-	2900	145	>40	28.3
19	7.5	18	-	15	25.5	40.5	5000	10000	-	2900	145	>40	32.3
20	7.5	18	-	15	25.5	40.5	2400	6800	-	2900	145	>40	16.8
21	7.5	18	-	15	25.5	40.5	4400	6000	-	2900	145	>40	18.2
22	7.5	18	-	15	25.5	40.5	10000	8200	-	2900	145	>40	34.6
23	7.5	18	-	20	25.5	45.5	10000	5000	-	2900	145	>40	>40
24	6	10	6	15	22	37	3400	10000	3400	207	145	>40	<1
25	6	10	6	15	22	37	3400	10000	5000	207	145	>40	1.1
26	6	10	6	15	22	37	2400	6800	3400	207	145	>40	<1
27	6	10	6	15	22	37	4400	6800	3400	207	145	>40	<1
28	6	10	6	15	22	37	4400	6000	6700	207	145	>40	<1
29	6	10	6	15	22	37	10000	8200	5500	207	145	>40	1.4
30	6	10	6	15	22	37	3400	10000	3400	2900	145	>40	5.8
31	6	10	6	15	22	37	3400	10000	5000	2900	145	>40	6.7
32	6	10	6	15	22	37	2400	6800	3400	2900	145	>40	4.3
33	6	10	6	15	22	37	4400	6800	3400	2900	145	>40	5
34	6	10	6	15	22	37	4400	6000	6700	2900	145	>40	6
35	6	10	6	15	22	37	10000	8200	5500	2900	145	>40	8.5
36	5	10	20	15	35	50	3400	10000	3400	207	145	>40	9
37	5	10	20	15	35	50	3400	10000	5000	207	145	>40	13.5
38	5	10	20	15	35	50	2400	6800	3400	207	145	>40	6.8
39	5	10	20	15	35	50	4400	6800	3400	207	145	>40	7.7
40	5	10	20	15	35	50	4400	6000	6700	207	145	>40	15.3
41	5	10	20	15	35	50	10000	8200	5500	207	145	>40	17.2
42	5	10	20	15	35	50	3400	10000	3400	2900	145	>40	37.1
43	5	10	20	15	35	50	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
44	5	10	20	15	35	50	2400	6800	3400	2900	145	>40	29.6
45	5	10	20	15	35	50	4400	6800	3400	2900	145	>40	32.7

46	5	10	20	15	35	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
47	5	10	20	15	35	50	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
48	4	8	20	15	32	47	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
49	5	10	20	15	35	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	34.4
50	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	207	145	>40	17.3
51	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	5000	207	145	>40	20.8
52	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	6800	3400	207	145	>40	10.4
53	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6800	3400	207	145	>40	11.5
54	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6000	6700	207	145	>40	14.5
55	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	207	145	>40	21.5
56	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
57	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
58	4	5	28	15	37	52	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
59	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
60	4	5	29	15	38	53	2400	6800	3400	290	145	>40	>40
61	4	5	28	15	37	52	4400	6800	3400	2900	145	>40	>40
62	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
63	4	5	23	15	32	47	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
64	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
65	4	5	27	15	36	51	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
66	4	5	27	15	36	51	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
67	5	20	7.5	20	32.5	52.5	3400	10000	3400	207	145	>40	11.2
68	5	20	7.5	20	32.5	52.5	3400	10000	5000	207	145	>40	13
69	5	20	7.5	20	32.5	52.5	2400	6800	3400	207	145	>40	6.9
70	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6800	3400	207	145	>40	7.8
71	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6000	6700	207	145	>40	9.2
72	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	8200	5500	207	145	>40	14
73	5	20	7.5	20	32.5	52.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
74	5	17	7.5	20	29.5	49.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
75	5	16	7	20	28	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
76	5	20	7	20	32	52	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
77	5	20	7.5	20	32.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
78	5	20	7	20	32	52	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
79	4	20	7	20	31	51	4400	6800	3400	2900	145	>40	>40
80	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
81	4	19	7	20	30	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
82	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
83	4	17	7	20	28	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
84	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
85	5	20	7	20	32	52	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
86	5	10	5	20	20	40	3400	10000	3400	207	145	>40	1
87	5	10	5	20	20	40	3400	10000	5000	207	145	>40	1.2
88	5	10	5	20	20	40	2400	6800	3400	207	145	>40	<1
89	5	10	5	20	20	40	4400	6800	3400	207	145	>40	<1
90	5	10	5	20	20	40	4400	6000	6700	207	145	>40	1
91	5	10	5	20	20	40	10000	8200	5500	207	145	>40	1.5
92	5	10	5	20	20	40	3400	10000	3400	2900	145	>40	11
93	5	10	5	20	20	40	3400	10000	5000	2900	145	>40	12.2
94	5	10	5	20	20	40	2400	6800	3400	2900	145	>40	8.4
95	5	10	5	20	20	40	4400	6800	3400	2900	145	>40	9.5
96	5	10	5	20	20	40	4400	6000	6700	2900	145	>40	10.7

97	5	10	5	20	20	40	10000	8200	5500	2900	145	>40	14.4
98	5	10	5	25	20	45	3400	10000	3400	2900	145	>40	25
99	5	10	5	25	20	45	3400	10000	5000	2900	145	>40	27.3
100	5	10	5	25	20	45	2400	6800	3400	2900	145	>40	19.7
101	5	10	5	25	20	45	4400	6800	3400	2900	145	>40	21.9
102	5	10	5	25	20	45	4400	6000	6700	2900	145	>40	24.5
103	5	10	5	25	20	45	10000	8200	5500	2900	145	>40	31.7
104	5	10	8	25	23	48	3400	10000	3400	2900	145	>40	36.5
105	5	10	8	25	23	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
106	5	10	8	25	23	48	2400	6800	3400	2900	145	>40	29.1
107	5	10	8	25	23	48	4400	6800	3400	2900	145	>40	32.2
108	5	10	8	25	23	48	4400	6000	6700	2900	145	>40	39.2
109	5	10	8	25	23	48	10000	5000	3400	2900	145	>40	33.7
110	5	15	5	20	25	45	3400	10000	3400	2900	145	>40	24.4
111	5	15	5	20	25	45	3400	10000	5000	2900	145	>40	26.6
112	5	15	5	20	25	45	2400	6800	3400	2900	145	>40	17.4
113	5	15	5	20	25	45	4400	6800	3400	2900	145	>40	19.4
114	5	15	5	20	25	45	4400	6000	6700	2900	145	>40	21.2
115	5	15	5	20	25	45	10000	8200	5500	2900	145	>40	29.6
116	5	15	5	23	25	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
117	4	15	5	24	24	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
118	4	14	5	25	23	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
119	8	11	5	25	24	49	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
120	10	14	5	25	29	54	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
121	12	10	8	20	30	50	3400	10000	5000	2900	145	>40	40
122	5	15	5	25	25	50	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
123	5	12	5	25	22	47	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
124	5	15	5	23	25	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
125	4	15	4	25	23	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
126	5	15	5	25	25	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
127	4	15	6	25	25	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	40
128	4	10	11	25	25	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
129	5	15	20	15	40	55	3400	10000	2900	207	145	>40	17.8
130	5	15	20	15	40	55	5000	10000	2900	207	145	>40	19.2
131	5	15	20	15	40	55	2400	6800	2900	207	145	>40	12.5
132	5	15	20	15	40	55	4400	6800	2900	207	145	>40	14
133	5	15	20	15	40	55	4400	6000	2900	207	145	>40	12.8
134	5	15	20	15	40	55	10000	8200	2900	207	145	>40	19.4
135	5	15	20	15	40	55	10000	5000	2900	207	145	>40	13.8
136	5	15	25	20	45	65	2400	3400	2900	207	145	>40	22
137	5	15	25	20	45	65	2400	5000	2900	207	145	>40	27.2
138	5	15	25	20	45	65	4400	3400	2900	207	145	>40	25.3
139	5	15	25	20	45	65	3400	10000	2900	207	145	>40	>40
140	5	15	25	20	45	65	3400	5000	2900	207	145	>40	28.8
141	5	14	25	20	44	64	5000	10000	2900	207	145	>40	>40
142	5	15	25	20	45	65	2400	6800	2900	207	145	>40	32.8
143	5	15	25	20	45	65	4400	6800	2900	207	145	>40	36.1
144	5	15	25	20	45	65	4400	6000	2900	207	145	>40	33.5
145	4	8	19	15	31	46	10000	8200	2900	207	145	>40	>40
146	5	15	25	20	45	65	10000	5000	2900	207	145	>40	35.7
147	5	15	25	20	45	65	2400	10000	2900	207	145	>40	>40

148	5	10	15	22	30	52	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40
149	6	12	15	20	33	53	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40
150	5	15	10	24	30	54	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40
151	5	9	15	22	29	51	4400	3400	4400	2900	145	>40	>40
152	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	2900	145	>40	>40
153	5	15	10	25	30	55	3400	2400	3400	2900	145	>40	>40
154	8	15	25	20	48	68	2400	5000	3400	207	145	>40	>40
155	7	15	25	20	47	67	2400	5000	3400	207	145	>40	>40

CA=Concreto Asfáltico; SR= Subrasante

Tabla 55. Estructuras que cumplieron ambos criterios de falla con el nivel de alta sobrecarga del programa IMT-PAVE 3.0.

Estructuras con nivel de alta sobrecarga que cumplen ambos criterios de falla														
	Iteración	Espesor de la capa en cm				Espesor total		Módulo de la capa				SR	Fatiga	Falla Deformación
		1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base			
1	123	5	12	5	25	22	47	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
2	105	5	10	8	25	23	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
3	118	4	14	5	25	23	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
4	125	4	15	4	25	23	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
5	117	4	15	5	24	24	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
6	119	8	11	5	25	24	49	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
7	116	5	15	5	23	25	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
8	122	5	15	5	25	25	50	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
9	124	5	15	5	23	25	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
10	126	5	15	5	25	25	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
11	127	4	15	6	25	25	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
12	128	4	10	11	25	25	50	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
13	23	7.5	18	-	20	25.5	45.5	10000	5000	-	2900	145	>40	>40
14	75	5	16	7	20	28	48	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
15	83	4	17	7	20	28	48	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
16	152	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	2900	145	>40	>40
17	120	10	14	5	25	29	54	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
18	151	5	9	15	22	29	51	4400	3400	4400	2900	145	>40	>40
19	74	5	17	7.5	20	29.5	49.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
20	81	4	19	7	20	30	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
21	121	12	10	8	20	30	50	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
22	148	5	10	15	22	30	52	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40
23	150	5	15	10	24	30	54	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40
24	153	5	15	10	25	30	55	3400	2400	3400	2900	145	>40	>40
25	79	4	20	7	20	31	51	4400	6800	3400	2900	145	>40	>40
26	145	4	8	19	15	31	46	10000	8200	2900	207	145	>40	>40
27	48	4	8	20	15	32	47	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
28	63	4	5	23	15	32	47	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
29	76	5	20	7	20	32	52	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
30	78	5	20	7	20	32	52	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
31	85	5	20	7	20	32	52	10000	5000	3400	2900	145	>40	>40
32	73	5	20	7.5	20	32.5	52.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40

33	77	5	20	7.5	20	32.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
34	80	5	20	7.5	20	32.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
35	82	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
36	84	5	20	7.5	20	32.5	52.5	10000	5000	3400	2900	145	>40	40
37	149	6	12	15	20	33	53	2400	3400	4400	2900	145	>40	>40
38	43	5	10	20	15	35	50	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
39	46	5	10	20	15	35	50	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
40	47	5	10	20	15	35	50	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
41	65	4	5	27	15	36	51	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
42	66	4	5	27	15	36	51	10000	5000	3400	2900	145	>40	40
43	58	4	5	28	15	37	52	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
44	61	4	5	28	15	37	52	4400	6800	3400	2900	145	>40	>40
45	56	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	2900	145	>40	>40
46	57	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	5000	2900	145	>40	>40
47	59	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	6800	3400	2900	145	>40	>40
48	62	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	6000	6700	2900	145	>40	>40
49	64	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	145	>40	>40
50	60	4	5	29	15	38	53	2400	6800	3400	290	145	>40	>40
51	141	5	14	25	20	44	64	5000	10000	2900	207	145	>40	>40
52	139	5	15	25	20	45	65	3400	10000	2900	207	145	>40	>40
53	147	5	15	25	20	45	65	2400	10000	2900	207	145	>40	>40
54	154	8	15	25	20	48	68	2400	5000	3400	207	145	>40	>40
55	155	7	15	25	20	47	67	2400	5000	3400	207	145	>40	>40

CA=Concreto Asfáltico; SR=Subrasante; sombreado en verde se ajustó el módulo; resaltado en rojo se ajustó el espesor

Tabla 56. Iteraciones de las seis estructuras base, las dos propuestas y ocho pruebas con ajuste de espesor y módulos con el programa Per Road 4.4.

Estructura	Iteración	Espesor de la capa (in)				Espesor total (in)		Módulo de la capa (ksi)					Grado PG			Umbral y ubicación de falla		
																Deflexión CA 1	Fatiga CA 3	Deformación SR
		CA 1	CA 2	CA 3	Base	CA	Pavimento	CA 1	CA 2	CA 3	Base	SR	CA 1	CA 2	CA 3	20 milli-inch Arriba	HSD Fondo	200 µε Arriba
Mejor desempeño por AF Tarefder 2012	1	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	2	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	3	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	4	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	5	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	6	3	4	3	6	10	16	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	7	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	8	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	9	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	10	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	11	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	12	3	4	3	6	10	16	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	13	3	4	3	6	10	16	650	870	980	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	14	3	4	3	6	10	16	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	15	3	4	3	6	10	16	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	16	3	4	3	6	10	16	650	870	980	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	17	3	4	3	6	10	16	650	870	980	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	18	3	4	3	6	10	16	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	19	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	20	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	21	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	22	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	23	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	24	3	4	3	6	10	16	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Sin la capa RBL Tarefder 2012	1	3	7	-	6	10	16	500	1500	-	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	2	3	7	-	6	10	16	500	1500	-	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	3	3	7	-	6	10	16	500	1500	-	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	4	3	7	-	6	10	16	500	1500	-	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	5	3	7	-	6	10	16	350	1000	-	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	6	3	7	-	6	10	16	350	1000	-	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	7	3	7	-	6	10	16	350	1000	-	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	8	3	7	-	6	10	16	350	1000	-	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	9	3	7	-	6	10	16	650	870	-	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	10	3	7	-	6	10	16	650	870	-	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	11	3	7	-	6	10	16	650	870	-	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	12	3	7	-	6	10	16	650	870	-	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	13	3	7	-	6	10	16	1500	1200	-	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	14	3	7	-	6	10	16	1500	1200	-	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	15	3	7	-	6	10	16	1500	1200	-	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	16	3	7	-	6	10	16	1500	1200	-	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
Basada en estructura de Nuevo México Tarefder 2009	17	2.5	4	2.5	6	9	15	500	1500	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	18	2.5	4	2.5	6	9	15	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	19	2.5	4	2.5	6	9	15	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	20	2.5	4	2.5	6	9	15	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	21	2.5	4	2.5	6	9	15	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	22	2.5	4	2.5	6	9	15	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	23	2.5	4	2.5	6	9	15	350	1000	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	24	2.5	4	2.5	6	9	15	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	25	2.5	4	2.5	6	9	15	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓

	26	2.5	4	2.5	6	9	15	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	27	2.5	4	2.5	6	9	15	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	28	2.5	4	2.5	6	9	15	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	29	2.5	4	2.5	6	9	15	650	870	980	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	30	2.5	4	2.5	6	9	15	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	31	2.5	4	2.5	6	9	15	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	32	2.5	4	2.5	6	9	15	650	870	980	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	33	2.5	4	2.5	6	9	15	650	870	980	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	34	2.5	4	2.5	6	9	15	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	35	2.5	4	2.5	6	9	15	1500	1200	800	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	36	2.5	4	2.5	6	9	15	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	37	2.5	4	2.5	6	9	15	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	38	2.5	4	2.5	6	9	15	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	39	2.5	4	2.5	6	9	15	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	40	2.5	4	2.5	6	9	15	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Basada en estructura de Ohio Sargand 2015	41	2	8	4	6	14	20	500	1500	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	42	2	8	4	6	14	20	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	43	2	8	4	6	14	20	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	44	2	8	4	6	14	20	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	45	2	8	4	6	14	20	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	46	2	8	4	6	14	20	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	47	2	8	4	6	14	20	350	1000	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	48	2	8	4	6	14	20	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	49	2	8	4	6	14	20	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	50	2	8	4	6	14	20	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	51	2	8	4	6	14	20	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	52	2	8	4	6	14	20	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	53	2	8	4	6	14	20	650	870	980	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	54	2	8	4	6	14	20	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	55	2	8	4	6	14	20	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	56	2	8	4	6	14	20	650	870	980	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	57	2	8	4	6	14	20	650	870	980	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	58	2	8	4	6	14	20	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	59	2	8	4	6	14	20	1500	1200	800	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	60	2	8	4	6	14	20	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	61	2	8	4	6	14	20	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	62	2	8	4	6	14	20	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	63	2	8	4	6	14	20	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	64	2	8	4	6	14	20	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Basada en estructura de Ohio Qin 2010	65	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	1500	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	66	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	67	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	68	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	69	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	70	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	71	1.75	9	4	6	14.75	20.75	350	1000	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	72	1.75	9	4	6	14.75	20.75	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	73	1.75	9	4	6	14.75	20.75	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	74	1.75	9	4	6	14.75	20.75	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	75	1.75	9	4	6	14.75	20.75	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	76	1.75	9	4	6	14.75	20.75	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	77	1.75	9	4	6	14.75	20.75	650	870	980	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	78	1.75	9	4	6	14.75	20.75	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	79	1.75	9	4	6	14.75	20.75	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓

	80	1.75	9	4	6	14.75	20.75	650	870	980	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	81	1.75	9	4	6	14.75	20.75	650	870	980	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	82	1.75	9	4	6	14.75	20.75	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	83	1.75	9	4	6	14.75	20.75	1500	1200	800	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	84	1.75	9	4	6	14.75	20.75	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	85	1.75	9	4	6	14.75	20.75	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	86	1.75	9	4	6	14.75	20.75	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	87	1.75	9	4	6	14.75	20.75	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	88	1.75	9	4	6	14.75	20.75	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	89	2	8	3	8	13	21	500	1500	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
Basada en estructura de Texas Walubita 2010	90	2	8	3	8	13	21	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	91	2	8	3	8	13	21	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	92	2	8	3	8	13	21	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	93	2	8	3	8	13	21	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	94	2	8	3	8	13	21	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	95	2	8	3	8	13	21	350	1000	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	96	2	8	3	8	13	21	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	97	2	8	3	8	13	21	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	98	2	8	3	8	13	21	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	99	2	8	3	8	13	21	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	100	2	8	3	8	13	21	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	101	2	8	3	8	13	21	650	870	980	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	102	2	8	3	8	13	21	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	103	2	8	3	8	13	21	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	104	2	8	3	8	13	21	650	870	980	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	105	2	8	3	8	13	21	650	870	980	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	106	2	8	3	8	13	21	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	107	2	8	3	8	13	21	1500	1200	800	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	108	2	8	3	8	13	21	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	109	2	8	3	8	13	21	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	110	2	8	3	8	13	21	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	111	2	8	3	8	13	21	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	112	2	8	3	8	13	21	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	113	2	4	2	6	8	14	500	1500	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	114	2	4	2	6	8	14	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	115	2	4	2	6	8	14	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	116	2	4	2	6	8	14	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	117	2	4	2	6	8	14	500	1500	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	118	2	4	2	6	8	14	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	119	2	4	2	6	8	14	350	1000	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
Propuesta 1	120	2	4	2	6	8	14	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	121	2	4	2	6	8	14	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	122	2	4	2	6	8	14	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	123	2	4	2	6	8	14	350	1000	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	124	2	4	2	6	8	14	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	125	2	4	2	6	8	14	650	870	980	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	126	2	4	2	6	8	14	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	127	2	4	2	6	8	14	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	128	2	4	2	6	8	14	650	870	980	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	129	2	4	2	6	8	14	650	870	980	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	130	2	4	2	6	8	14	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	131	2	4	2	6	8	14	1500	1200	800	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓

Propuesta2	132	2	4	2	6	8	14	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	133	2	4	2	6	8	14	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	134	2	4	2	6	8	14	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	135	2	4	2	6	8	14	1500	1200	800	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	136	2	4	2	6	8	14	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	137	2	4	2	6	8	14	350	500	350	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	138	2	4	2	6	8	14	350	500	350	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	139	2	4	2	6	8	14	350	500	350	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	140	2	4	2	6	8	14	350	500	350	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	141	2	4	2	6	8	14	350	500	350	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	142	2	4	2	6	8	14	350	500	350	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	143	2	4	2	6	8	14	500	350	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	144	2	4	2	6	8	14	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	145	2	4	2	6	8	14	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	146	2	4	2	6	8	14	500	350	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	147	2	4	2	6	8	14	500	350	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	148	2	4	2	6	8	14	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
	149	2	4	2	6	8	14	500	1500	421	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	150	2	4	2	6	8	14	500	1500	421	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	151	2	4	2	6	8	14	500	1500	421	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	152	2	4	2	6	8	14	500	1500	421	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	153	2	4	2	6	8	14	350	1000	421	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	154	2	4	2	6	8	14	350	1000	421	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	155	2	4	2	6	8	14	350	1000	421	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	156	2	4	2	6	8	14	350	1000	421	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	157	2	4	2	6	8	14	650	870	421	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	158	2	4	2	6	8	14	650	870	421	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	159	2	4	2	6	8	14	650	870	421	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	160	2	4	2	6	8	14	650	870	421	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	161	2	4	2	6	8	14	1500	1200	421	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	162	2	4	2	6	8	14	1500	1200	421	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	163	2	4	2	6	8	14	1500	1200	421	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	164	2	4	2	6	8	14	1500	1200	421	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	165	2	4	2	6	8	14	350	500	421	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	166	2	4	2	6	8	14	350	500	421	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	167	2	4	2	6	8	14	350	500	421	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	168	2	4	2	6	8	14	350	500	421	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
	169	2	4	2	6	8	14	500	350	421	30	21	76-22	76-22	-	✓	✓	✓
	170	2	4	2	6	8	14	500	350	421	30	21	70-22	70-22	-	✓	✓	✓
	171	2	4	2	6	8	14	500	350	421	30	21	76-22	70-22	-	✓	✓	✓
	172	2	4	2	6	8	14	500	350	421	30	21	70-22	64-22	-	✓	✓	✓
Prueba 1	173	3	4	3	6	10	16	500	350	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	174	3	4	3	6	10	16	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	175	3	4	3	6	10	16	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	176	3	4	3	6	10	16	500	350	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	177	3	4	3	6	10	16	500	350	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	178	3	4	3	6	10	16	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 2	179	3	7	-	6	10	16	500	350	-	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	180	3	7	-	6	10	16	500	350	-	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	181	3	7	-	6	10	16	500	350	-	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	182	3	7	-	6	10	16	500	350	-	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓

	183	3	7	-	6	10	16	500	350	-	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	184	3	7	-	6	10	16	500	350	-	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 3	185	3	7	-	6	10	16	350	500	-	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	186	3	7	-	6	10	16	350	500	-	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	187	3	7	-	6	10	16	350	500	-	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	188	3	7	-	6	10	16	350	500	-	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	189	3	7	-	6	10	16	350	500	-	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	190	3	7	-	6	10	16	350	500	-	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 4	191	2.5	4	2.5	6	9	15	500	350	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	192	2.5	4	2.5	6	9	15	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	193	2.5	4	2.5	6	9	15	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	194	2.5	4	2.5	6	9	15	500	350	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	195	2.5	4	2.5	6	9	15	500	350	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	196	2.5	4	2.5	6	9	15	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 5	197	2	8	4	6	14	20	500	350	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	198	2	8	4	6	14	20	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	199	2	8	4	6	14	20	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	200	2	8	4	6	14	20	500	350	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	201	2	8	4	6	14	20	500	350	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	202	2	8	4	6	14	20	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 6	203	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	350	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	204	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	205	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	206	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	350	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	207	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	350	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	208	1.75	9	4	6	14.75	20.75	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 7	209	2	8	3	8	13	21	500	350	500	30	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	210	2	8	3	8	13	21	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	211	2	8	3	8	13	21	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	212	2	8	3	8	13	21	500	350	500	30	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	213	2	8	3	8	13	21	500	350	500	30	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	214	2	8	3	8	13	21	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Estructura seleccionada con el programa IMT-PAVE 3.0	215	2.4	3.1	5.5	9.8	11	20.8	500	350	500	421	21	76-22	76-22	64-22	✓	✓	✓
	216	2.4	3.1	5.5	9.8	11	20.8	500	350	500	421	21	70-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	217	2.4	3.1	5.5	9.8	11	20.8	500	350	500	421	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	218	2.4	3.1	5.5	9.8	11	20.8	500	350	500	421	21	70-22	64-22	64-22	✓	✓	✓
	219	2.4	3.1	5.5	9.8	11	20.8	500	350	500	421	21	70-22	64-22	70-22	✓	✓	✓
	220	2.4	3.1	5.5	9.8	11	20.8	500	350	500	421	21	70-22	70-22	70-22	✓	✓	✓
Prueba 8	221	2	3	1	6	6	12	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	222	2	3	1	6	6	12	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	223	2	3	1	6	6	12	650	870	980	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	224	2	3	1	6	6	12	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	225	2	3	1	6	6	12	500	1500	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
	226	2	3	1	6	6	12	350	1000	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
	227	2	3	1	6	6	12	650	870	980	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
	228	2	3	1	6	6	12	1500	1200	800	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
	229	2	3	1	6	6	12	500	1500	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	230	2	3	1	6	6	12	350	1000	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	231	2	3	1	6	6	12	650	870	980	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
	232	2	3	1	6	6	12	1500	1200	800	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	✓	✓
	233	1	3	2	6	6	12	350	500	650	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
	234	1	3	2	6	6	12	350	500	650	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓

235	1	3	2	6	6	12	350	500	650	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
236	1	3	2	6	6	12	650	500	350	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓
237	1	3	2	6	6	12	650	500	350	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
238	1	3	2	6	6	12	650	500	350	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
239	1	3	2	6	6	12	650	500	350	30	21	76-22	76-22	70-22	✓	x	✓
240	1	3	2	6	6	12	650	500	350	30	21	76-22	70-22	70-22	✓	x	✓
241	1	3	2	6	6	12	500	350	500	30	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓
242	1	3	2	6	6	12	500	350	500	30	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
243	1	3	2	6	6	12	500	350	500	30	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
244	1	2	1	6	4	10	500	350	500	421	21	76-22	70-22	64-22	✓	x	✓
245	1	2	1	6	4	10	500	350	500	421	21	70-22	70-22	70-22	✓	x	✓
246	1	2	1	6	4	10	500	350	500	421	21	70-22	70-22	64-22	✓	x	✓

CA=Concreto Asfáltico; SR=Subrasante; PG=Grado de Desempeño; HSD=Horizontal Strain Distribution (distribución horizontal de la deformación).

Anexo B. Costos para el usuario

Tabla 57. TDPA por tipo de vehículo y tasa de crecimiento (r) del 2.05%.

r = 2.05%		Tipo de vehículo						
Año		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
0	2018	19136	765	1597	180	337	180	22
1	2019	19529	780	1629	184	344	184	23
2	2020	19929	796	1663	187	351	187	23
3	2021	20338	813	1697	191	358	191	24
4	2022	20755	829	1732	195	366	195	24
5	2023	21180	846	1767	199	373	199	25
6	2024	21614	864	1803	203	381	203	25
7	2025	22057	881	1840	207	389	207	26
8	2026	22509	899	1878	212	397	212	26
9	2027	22971	918	1916	216	405	216	27
10	2028	23442	937	1956	220	413	220	28
11	2029	23922	956	1996	225	422	225	28
12	2030	24413	975	2037	229	430	229	29
13	2031	24913	995	2079	234	439	234	29
14	2032	25424	1016	2121	239	448	239	30
15	2033	25945	1037	2165	244	457	244	30
16	2034	26477	1058	2209	249	467	249	31
17	2035	27020	1080	2254	254	476	254	32
18	2036	27574	1102	2301	259	486	259	32
19	2037	28139	1124	2348	265	496	265	33
20	2038	28716	1147	2396	270	506	270	34
21	2039	29304	1171	2445	275	517	275	34
22	2040	29905	1195	2495	281	527	281	35
23	2041	30518	1219	2546	287	538	287	36
24	2042	31144	1244	2598	293	549	293	37
25	2043	31782	1270	2652	299	560	299	37
26	2044	32434	1296	2706	305	572	305	38
27	2045	33099	1322	2761	311	583	311	39
28	2046	33777	1350	2818	318	595	318	40
29	2047	34470	1377	2876	324	608	324	41
30	2048	35176	1405	2935	331	620	331	41
31	2049	35898	1434	2995	337	633	337	42

32	2050	36633	1464	3056	344	646	344	43
33	2051	37384	1494	3119	351	659	351	44
34	2052	38151	1524	3183	359	672	359	45
35	2053	38933	1555	3248	366	686	366	46
36	2054	39731	1587	3315	373	700	373	47
37	2055	40545	1620	3383	381	715	381	48
38	2056	41377	1653	3452	389	729	389	49
39	2057	42225	1687	3523	397	744	397	50
40	2058	43090	1722	3595	405	760	405	51
41	2059	43974	1757	3669	413	775	413	52
42	2060	44875	1793	3744	422	791	422	53
43	2061	45795	1830	3821	431	807	431	54
44	2062	46734	1867	3899	439	824	439	55
45	2063	47692	1905	3979	448	841	448	56
46	2064	48670	1945	4061	458	858	458	57
47	2065	49668	1984	4144	467	875	467	58
48	2066	50686	2025	4229	476	893	476	60
49	2067	51725	2067	4315	486	912	486	61
50	2068	52785	2109	4404	496	930	496	62

Tabla 58. Costo de operación base por tipo de vehículo (\$/veh-km).

Consumos por cada 1000 veh-km	Unidad\ Tipo de vehículo	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4
Consumo de combustible	litros	172.08	398.63	328.45	446.79	483.92	579.47	760.89
Uso de lubricantes	litros	1.85	3.37	3.37	3.37	5.45	5.45	5.45
Consumo de llantas	no. llantas nuevas equivalentes	0.06	0.26	0.16	0.24	0.33	0.39	0.56
Tiempo de operador	horas	10.68	11.47	13.09	13.41	11.48	12.21	14.21
Mano de obra de mantenimiento	horas	2.15	11.06	8.18	12.43	30.48	30.48	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.14	0.13	0.15	0.21	0.27	0.27	0.27
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.4	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
Intereses (tasa 4.03%)	% precio vehículo nuevo	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Costos unitarios año 2019								
Precio vehículo nuevo	\$	\$412,400.00	\$3,007,537.00	\$1,063,726.00	\$1,343,397.00	\$2,187,114.00	\$2,491,236.00	\$2,754,518.00
Costo combustible	\$/litro	\$14.04	\$18.94	\$18.94	\$18.94	\$18.94	\$18.94	\$18.94
Costo lubricantes	\$/litro	\$55.00	\$84.90	\$84.90	\$84.90	\$84.90	\$84.90	\$84.90
Costo de llanta nueva	\$/llanta	\$949.00	\$5,500.00	\$4,475.86	\$4,475.86	\$4,475.86	\$4,475.86	\$4,475.86
Tiempo de operadores	\$/hora	\$23.29	\$66.64	\$46.85	\$46.85	\$53.40	\$53.40	\$53.40
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	\$22.10	\$57.20	\$38.02	\$38.02	\$38.02	\$38.02	\$38.02
Tasa de interés anual	%	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
Costos indirectos por veh-km	\$	0.36	1.09	0.63	0.86	1.21	1.35	1.70
Costo de operación base (\$/veh-km)								
Consumo de combustible	\$	\$2,416.00	\$7,550.05	\$6,220.84	\$8,462.20	\$9,165.44	\$10,975.16	\$14,411.26
Uso de lubricantes	\$	\$101.75	\$286.11	\$286.11	\$286.11	\$462.71	\$462.71	\$462.71
Consumo de llantas	\$	\$56.94	\$1,430.00	\$716.14	\$1,074.21	\$1,477.03	\$1,745.59	\$2,506.48
Tiempo de operador	\$	\$248.74	\$764.36	\$613.27	\$628.26	\$613.03	\$652.01	\$758.81
Mano de obra de mantenimiento	\$	\$47.52	\$632.63	\$311.00	\$472.59	\$1,158.85	\$1,158.85	\$1,158.85
Refacciones	\$	\$577.36	\$3,909.80	\$1,595.59	\$2,821.13	\$5,905.21	\$6,726.34	\$7,437.20
Depreciación	\$	\$1,649.60	\$1,503.77	\$638.24	\$806.04	\$1,093.56	\$1,494.74	\$1,652.71
Interés	\$	\$206.20	\$300.75	\$106.37	\$134.34	\$218.71	\$249.12	\$275.45
Costos indirectos	\$	\$360.00	\$1,090.00	\$630.00	\$860.00	\$1,210.00	\$1,350.00	\$1,700.00
Costo de operación base por tipo de vehículo (\$/veh-km)		\$5.66	\$17.47	\$11.12	\$15.54	\$21.30	\$24.81	\$30.36
Costo de operación base por tipo de vehículo (\$/veh-tramo análisis)		\$2.27	\$6.99	\$4.45	\$6.22	\$8.52	\$9.93	\$12.15

FUENTE: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)con actualización de precios al año 2019. Tramo de análisis = 400 m

Tabla 59. Costo de operación en función de las condiciones de la superficie de rodamiento por tipo de vehículo (\$/veh-km) para el PLD.

Tipo de vehículo	A			B			C2			C3			T3S2			T3S3			T3S2R4		
CO _b \$/veh-km	\$	2.27		\$	6.99		\$	4.45		\$	6.22		\$	8.52		\$	9.93		\$	12.15	
IRI	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	
2.0	1.04	\$ 2.36	1.110	\$ 7.76	1.120	\$ 4.98	1.140	\$ 17.72	1.110	\$ 9.46	1.14	\$ 11.32	1.17	\$ 14.21							
2.2	1.046	\$ 2.37	1.115	\$ 7.79	1.132	\$ 5.03	1.149	\$ 17.86	1.119	\$ 9.54	1.149	\$ 11.40	1.179	\$ 14.32							
2.4	1.052	\$ 2.38	1.120	\$ 7.83	1.144	\$ 5.09	1.158	\$ 18.00	1.128	\$ 9.61	1.158	\$ 11.49	1.188	\$ 14.43							
2.6	1.058	\$ 2.40	1.125	\$ 7.86	1.156	\$ 5.14	1.167	\$ 18.14	1.137	\$ 9.69	1.167	\$ 11.58	1.197	\$ 14.54							
2.8	1.064	\$ 2.41	1.130	\$ 7.90	1.168	\$ 5.19	1.176	\$ 18.28	1.146	\$ 9.77	1.176	\$ 11.67	1.206	\$ 14.65							
3.0	1.070	\$ 2.42	1.135	\$ 7.93	1.180	\$ 5.25	1.185	\$ 18.41	1.155	\$ 9.84	1.185	\$ 11.76	1.215	\$ 14.76							

IRI= Índice Internacional de Rugosidad; CO_b=Costo de Operación base; FCO_b=Factor del Costo de Operación base; Costo de Operación (\$/veh-km)

Tabla 60. Costo de operación en función de las condiciones de la superficie de rodamiento por tipo de vehículo (\$/veh-km) para el PT.

Tipo de vehículo	A			B			C2			C3			T3S2			T3S3			T3S2R4		
CO _b \$/veh-km	\$	2.27		\$	6.99		\$	4.45		\$	6.22		\$	8.52		\$	9.93		\$	12.15	
IRI	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	FCO _b	CO	
2.0	1.040	\$ 2.36	1.110	\$ 7.76	1.120	\$ 4.98	1.140	\$ 7.09	1.110	\$ 9.46	1.140	\$ 11.32	1.170	\$ 14.21							
2.3	1.052	\$ 2.38	1.120	\$ 7.83	1.144	\$ 5.09	1.158	\$ 7.20	1.128	\$ 9.61	1.158	\$ 11.49	1.188	\$ 14.43							
2.7	1.064	\$ 2.41	1.130	\$ 7.90	1.168	\$ 5.19	1.176	\$ 7.31	1.146	\$ 9.77	1.176	\$ 11.67	1.206	\$ 14.65							
3.0	1.076	\$ 2.44	1.140	\$ 7.97	1.192	\$ 5.30	1.194	\$ 7.42	1.164	\$ 9.92	1.194	\$ 11.85	1.224	\$ 14.87							
3.5	1.088	\$ 2.47	1.150	\$ 8.04	1.216	\$ 5.41	1.212	\$ 7.54	1.182	\$ 10.07	1.212	\$ 12.03	1.242	\$ 15.08							
4.0	1.100	\$ 2.49	1.160	\$ 8.10	1.240	\$ 5.51	1.230	\$ 7.65	1.200	\$ 10.23	1.230	\$ 12.21	1.260	\$ 15.30							

IRI= Índice Internacional de Rugosidad; CO_b=Costo de Operación base; FCO_b=Factor del Costo de Operación base; Costo de Operación (\$/veh-km).

Tabla 61. Costo de operación del tránsito anual (en millones de pesos) para la opción PLD.

Año	IRI		A		B		C2		C3		T3S2		T3S3		T3S2R4		Total
0	2.00	\$	16.46	\$	2.16	\$	2.90	\$	0.47	\$	1.16	\$	0.74	\$	0.12	\$	24.01
1	2.20	\$	16.89	\$	2.22	\$	2.99	\$	0.48	\$	1.20	\$	0.76	\$	0.12	\$	24.67
2	2.40	\$	17.34	\$	2.27	\$	3.09	\$	0.49	\$	1.23	\$	0.79	\$	0.12	\$	25.33
3	2.60	\$	17.79	\$	2.33	\$	3.18	\$	0.51	\$	1.27	\$	0.81	\$	0.13	\$	26.02
4	2.80	\$	18.26	\$	2.39	\$	3.28	\$	0.52	\$	1.30	\$	0.83	\$	0.13	\$	26.72
5	3.00	\$	18.74	\$	2.45	\$	3.38	\$	0.54	\$	1.34	\$	0.85	\$	0.13	\$	27.44
6	2.20	\$	18.70	\$	2.46	\$	3.31	\$	0.53	\$	1.33	\$	0.85	\$	0.13	\$	27.30
7	2.40	\$	19.19	\$	2.52	\$	3.42	\$	0.54	\$	1.36	\$	0.87	\$	0.14	\$	28.04
8	2.60	\$	19.69	\$	2.58	\$	3.52	\$	0.56	\$	1.40	\$	0.89	\$	0.14	\$	28.80
9	2.80	\$	20.21	\$	2.64	\$	3.63	\$	0.58	\$	1.44	\$	0.92	\$	0.14	\$	29.57
10	3.00	\$	20.74	\$	2.71	\$	3.75	\$	0.59	\$	1.48	\$	0.95	\$	0.15	\$	30.37
11	2.20	\$	20.69	\$	2.72	\$	3.67	\$	0.59	\$	1.47	\$	0.94	\$	0.15	\$	30.22
12	2.40	\$	21.24	\$	2.79	\$	3.78	\$	0.60	\$	1.51	\$	0.96	\$	0.15	\$	31.03
13	2.60	\$	21.80	\$	2.86	\$	3.90	\$	0.62	\$	1.55	\$	0.99	\$	0.16	\$	31.87
14	2.80	\$	22.37	\$	2.93	\$	4.02	\$	0.64	\$	1.60	\$	1.02	\$	0.16	\$	32.73
15	3.00	\$	22.96	\$	3.00	\$	4.15	\$	0.66	\$	1.64	\$	1.05	\$	0.16	\$	33.61
16	2.20	\$	22.90	\$	3.01	\$	4.06	\$	0.65	\$	1.62	\$	1.04	\$	0.16	\$	33.44
17	2.40	\$	23.51	\$	3.08	\$	4.19	\$	0.67	\$	1.67	\$	1.07	\$	0.17	\$	34.35
18	2.60	\$	24.12	\$	3.16	\$	4.32	\$	0.69	\$	1.72	\$	1.10	\$	0.17	\$	35.28
19	2.80	\$	24.76	\$	3.24	\$	4.45	\$	0.71	\$	1.77	\$	1.13	\$	0.18	\$	36.23
20	3.00	\$	25.41	\$	3.32	\$	4.59	\$	0.73	\$	1.82	\$	1.16	\$	0.18	\$	37.20
21	2.20	\$	25.35	\$	3.33	\$	4.49	\$	0.72	\$	1.80	\$	1.15	\$	0.18	\$	37.01
22	2.40	\$	26.02	\$	3.41	\$	4.63	\$	0.74	\$	1.85	\$	1.18	\$	0.19	\$	38.01
23	2.60	\$	26.70	\$	3.50	\$	4.78	\$	0.76	\$	1.90	\$	1.21	\$	0.19	\$	39.04
24	2.80	\$	27.40	\$	3.59	\$	4.93	\$	0.78	\$	1.96	\$	1.25	\$	0.20	\$	40.10
25	3.00	\$	28.12	\$	3.68	\$	5.08	\$	0.80	\$	2.01	\$	1.28	\$	0.20	\$	41.18
26	2.20	\$	28.06	\$	3.68	\$	4.97	\$	0.80	\$	1.99	\$	1.27	\$	0.20	\$	40.97
27	2.40	\$	28.79	\$	3.78	\$	5.13	\$	0.82	\$	2.05	\$	1.31	\$	0.20	\$	42.07
28	2.60	\$	29.55	\$	3.87	\$	5.29	\$	0.84	\$	2.11	\$	1.34	\$	0.21	\$	43.21
29	2.80	\$	30.33	\$	3.97	\$	5.45	\$	0.86	\$	2.17	\$	1.38	\$	0.22	\$	44.38
30	3.00	\$	31.13	\$	4.07	\$	5.62	\$	0.89	\$	2.23	\$	1.42	\$	0.22	\$	45.57
31	2.20	\$	31.05	\$	4.08	\$	5.50	\$	0.88	\$	2.20	\$	1.40	\$	0.22	\$	45.34
32	2.40	\$	31.87	\$	4.18	\$	5.68	\$	0.91	\$	2.27	\$	1.44	\$	0.23	\$	46.57
33	2.60	\$	32.71	\$	4.29	\$	5.85	\$	0.93	\$	2.33	\$	1.49	\$	0.23	\$	47.83
34	2.80	\$	33.57	\$	4.39	\$	6.03	\$	0.96	\$	2.40	\$	1.53	\$	0.24	\$	49.12
35	3.00	\$	34.45	\$	4.50	\$	6.22	\$	0.98	\$	2.47	\$	1.57	\$	0.25	\$	50.44
36	2.20	\$	34.37	\$	4.51	\$	6.09	\$	0.97	\$	2.44	\$	1.55	\$	0.24	\$	50.18
37	2.40	\$	35.27	\$	4.63	\$	6.28	\$	1.00	\$	2.51	\$	1.60	\$	0.25	\$	51.54
38	2.60	\$	36.20	\$	4.74	\$	6.48	\$	1.03	\$	2.58	\$	1.64	\$	0.26	\$	52.93
39	2.80	\$	37.15	\$	4.86	\$	6.68	\$	1.06	\$	2.65	\$	1.69	\$	0.27	\$	54.36
40	3.00	\$	38.13	\$	4.98	\$	6.89	\$	1.09	\$	2.73	\$	1.74	\$	0.27	\$	55.83
41	2.20	\$	38.04	\$	5.00	\$	6.74	\$	1.08	\$	2.70	\$	1.72	\$	0.27	\$	55.54
42	2.40	\$	39.04	\$	5.12	\$	6.95	\$	1.11	\$	2.78	\$	1.77	\$	0.28	\$	57.04
43	2.60	\$	40.07	\$	5.25	\$	7.17	\$	1.14	\$	2.85	\$	1.82	\$	0.29	\$	58.59
44	2.80	\$	41.12	\$	5.38	\$	7.39	\$	1.17	\$	2.94	\$	1.87	\$	0.29	\$	60.17
45	3.00	\$	42.20	\$	5.52	\$	7.62	\$	1.21	\$	3.02	\$	1.92	\$	0.30	\$	61.79
46	2.20	\$	42.10	\$	5.53	\$	7.46	\$	1.19	\$	2.99	\$	1.90	\$	0.30	\$	61.47
47	2.40	\$	43.21	\$	5.67	\$	7.69	\$	1.23	\$	3.07	\$	1.96	\$	0.31	\$	63.14
48	2.60	\$	44.35	\$	5.81	\$	7.93	\$	1.26	\$	3.16	\$	2.01	\$	0.32	\$	64.84
49	2.80	\$	45.51	\$	5.96	\$	8.18	\$	1.30	\$	3.25	\$	2.07	\$	0.32	\$	66.59
50	3.00	\$	46.71	\$	6.10	\$	8.43	\$	1.33	\$	3.34	\$	2.13	\$	0.33	\$	68.39
																\$	2,167.48

IRI=Índice Internacional de Rugosidad.

Tabla 62. Costo de operación del tránsito anual (en millones de pesos) para la opción PT.

Año	IRI		A		B		C2		C3		T3S2		T3S3		T3S2R4		Total
0	2.00	\$	16.46	\$	2.16	\$	2.90	\$	0.47	\$	1.16	\$	0.74	\$	0.12	\$	24.01
1	2.33	\$	16.99	\$	2.23	\$	3.03	\$	0.48	\$	1.21	\$	0.77	\$	0.12	\$	24.82
2	2.67	\$	17.54	\$	2.29	\$	3.15	\$	0.50	\$	1.25	\$	0.80	\$	0.13	\$	25.66
3	3.00	\$	18.10	\$	2.36	\$	3.28	\$	0.52	\$	1.30	\$	0.83	\$	0.13	\$	26.51
4	3.50	\$	18.67	\$	2.43	\$	3.42	\$	0.54	\$	1.34	\$	0.86	\$	0.13	\$	27.40
5	4.00	\$	19.27	\$	2.50	\$	3.56	\$	0.56	\$	1.39	\$	0.89	\$	0.14	\$	28.30
6	2.33	\$	18.80	\$	2.47	\$	3.35	\$	0.53	\$	1.34	\$	0.85	\$	0.13	\$	27.48
7	2.67	\$	19.41	\$	2.54	\$	3.49	\$	0.55	\$	1.39	\$	0.88	\$	0.14	\$	28.40
8	3.00	\$	20.03	\$	2.61	\$	3.63	\$	0.57	\$	1.44	\$	0.92	\$	0.14	\$	29.35
9	3.50	\$	20.67	\$	2.69	\$	3.78	\$	0.59	\$	1.49	\$	0.95	\$	0.15	\$	30.32
10	4.00	\$	21.32	\$	2.77	\$	3.94	\$	0.62	\$	1.54	\$	0.98	\$	0.15	\$	31.32
11	2.33	\$	20.81	\$	2.73	\$	3.71	\$	0.59	\$	1.48	\$	0.94	\$	0.15	\$	30.41
12	2.67	\$	21.48	\$	2.81	\$	3.86	\$	0.61	\$	1.53	\$	0.98	\$	0.15	\$	31.43
13	3.00	\$	22.17	\$	2.89	\$	4.02	\$	0.63	\$	1.59	\$	1.01	\$	0.16	\$	32.48
14	3.50	\$	22.87	\$	2.98	\$	4.19	\$	0.66	\$	1.65	\$	1.05	\$	0.16	\$	33.56
15	4.00	\$	23.60	\$	3.07	\$	4.36	\$	0.68	\$	1.71	\$	1.09	\$	0.17	\$	34.67
16	2.33	\$	23.03	\$	3.02	\$	4.10	\$	0.65	\$	1.64	\$	1.04	\$	0.16	\$	33.66
17	2.67	\$	23.77	\$	3.11	\$	4.27	\$	0.68	\$	1.70	\$	1.08	\$	0.17	\$	34.79
18	3.00	\$	24.54	\$	3.20	\$	4.45	\$	0.70	\$	1.76	\$	1.12	\$	0.18	\$	35.95
19	3.50	\$	25.32	\$	3.30	\$	4.63	\$	0.73	\$	1.82	\$	1.16	\$	0.18	\$	37.14
20	4.00	\$	26.12	\$	3.39	\$	4.82	\$	0.75	\$	1.89	\$	1.20	\$	0.19	\$	38.37
21	2.33	\$	25.49	\$	3.34	\$	4.54	\$	0.72	\$	1.81	\$	1.16	\$	0.18	\$	37.25
22	2.67	\$	26.31	\$	3.44	\$	4.73	\$	0.75	\$	1.88	\$	1.20	\$	0.19	\$	38.50
23	3.00	\$	27.16	\$	3.54	\$	4.93	\$	0.78	\$	1.95	\$	1.24	\$	0.19	\$	39.79
24	3.50	\$	28.02	\$	3.65	\$	5.13	\$	0.81	\$	2.02	\$	1.29	\$	0.20	\$	41.11
25	4.00	\$	28.91	\$	3.76	\$	5.34	\$	0.83	\$	2.09	\$	1.33	\$	0.21	\$	42.47
26	2.33	\$	28.22	\$	3.70	\$	5.02	\$	0.80	\$	2.01	\$	1.28	\$	0.20	\$	41.23
27	2.67	\$	29.12	\$	3.81	\$	5.24	\$	0.83	\$	2.08	\$	1.33	\$	0.21	\$	42.61
28	3.00	\$	30.06	\$	3.92	\$	5.45	\$	0.86	\$	2.16	\$	1.37	\$	0.22	\$	44.04
29	3.50	\$	31.01	\$	4.04	\$	5.68	\$	0.89	\$	2.23	\$	1.42	\$	0.22	\$	45.50
30	4.00	\$	32.00	\$	4.16	\$	5.91	\$	0.92	\$	2.31	\$	1.47	\$	0.23	\$	47.00
31	2.33	\$	31.23	\$	4.10	\$	5.56	\$	0.89	\$	2.22	\$	1.42	\$	0.22	\$	45.63
32	2.67	\$	32.23	\$	4.22	\$	5.79	\$	0.92	\$	2.30	\$	1.47	\$	0.23	\$	47.16
33	3.00	\$	33.26	\$	4.34	\$	6.03	\$	0.95	\$	2.39	\$	1.52	\$	0.24	\$	48.74
34	3.50	\$	34.33	\$	4.47	\$	6.28	\$	0.99	\$	2.47	\$	1.57	\$	0.25	\$	50.36
35	4.00	\$	35.42	\$	4.60	\$	6.54	\$	1.02	\$	2.56	\$	1.63	\$	0.26	\$	52.02
36	2.33	\$	34.56	\$	4.53	\$	6.16	\$	0.98	\$	2.46	\$	1.57	\$	0.25	\$	50.51
37	2.67	\$	35.68	\$	4.67	\$	6.41	\$	1.02	\$	2.55	\$	1.62	\$	0.25	\$	52.20
38	3.00	\$	36.82	\$	4.81	\$	6.68	\$	1.05	\$	2.64	\$	1.68	\$	0.26	\$	53.94
39	3.50	\$	37.99	\$	4.95	\$	6.95	\$	1.09	\$	2.74	\$	1.74	\$	0.27	\$	55.74
40	4.00	\$	39.20	\$	5.09	\$	7.24	\$	1.13	\$	2.83	\$	1.81	\$	0.28	\$	57.58
41	2.33	\$	38.26	\$	5.02	\$	6.81	\$	1.09	\$	2.72	\$	1.73	\$	0.27	\$	55.90
42	2.67	\$	39.49	\$	5.17	\$	7.10	\$	1.13	\$	2.82	\$	1.80	\$	0.28	\$	57.77
43	3.00	\$	40.75	\$	5.32	\$	7.39	\$	1.17	\$	2.92	\$	1.86	\$	0.29	\$	59.70
44	3.50	\$	42.05	\$	5.48	\$	7.70	\$	1.21	\$	3.03	\$	1.93	\$	0.30	\$	61.69
45	4.00	\$	43.38	\$	5.64	\$	8.01	\$	1.25	\$	3.14	\$	2.00	\$	0.31	\$	63.73
46	2.33	\$	42.34	\$	5.55	\$	7.54	\$	1.20	\$	3.01	\$	1.92	\$	0.30	\$	61.87
47	2.67	\$	43.70	\$	5.72	\$	7.86	\$	1.25	\$	3.12	\$	1.99	\$	0.31	\$	63.94
48	3.00	\$	45.10	\$	5.89	\$	8.18	\$	1.29	\$	3.23	\$	2.06	\$	0.32	\$	66.08
49	3.50	\$	46.54	\$	6.06	\$	8.52	\$	1.34	\$	3.35	\$	2.14	\$	0.33	\$	68.28
50	4.00	\$	48.02	\$	6.24	\$	8.86	\$	1.39	\$	3.47	\$	2.21	\$	0.35	\$	70.53
																\$	2,208.91

IRI=Índice Internacional de Rugosidad.

Anexo C. Factores equivalentes de carga del Instituto del Asfalto

Tabla 63. Factores equivalentes de carga (EALF) del Instituto del Asfalto.

Carga del eje (libras)	Factor equivalente de carga (EALF)		
	Sencillo	Tándem	Trídem
1000	0.00002		
2000	0.00018		
3000	0.00072		
4000	0.00209		
5000	0.0050		
6000	0.0104		
7000	0.0196		
8000	0.0343		
9000	0.0562		
10000	0.0877	0.00688	0.002
11000	0.1311	0.01008	0.002
12000	0.1890	0.0144	0.003
13000	0.2640	0.0199	0.005
14000	0.3600	0.027	0.006
15000	0.4780	0.036	0.008
16000	0.6230	0.0472	0.011
17000	0.7960	0.0608	0.014
18000	1.00	0.0773	0.017
19000	1.24	0.0971	0.022
20000	1.51	0.1206	0.027
21000	1.83	0.148	0.033
22000	2.18	0.18	0.040
23000	2.58	0.217	0.048
24000	3.03	0.26	0.057
25000	3.53	0.308	0.067
26000	4.09	0.364	0.080
27000	4.71	0.426	0.093
28000	5.39	0.495	0.109
29000	6.14	0.572	0.126
30000	6.97	0.658	0.145
31000	7.88	0.753	0.167
32000	8.88	0.857	0.191
33000	9.98	0.971	0.217
34000	11.18	1.095	0.246
35000	12.50	1.23	0.278
36000	13.93	1.38	0.313
37000	15.50	1.53	0.352
38000	17.20	1.7	0.393
39000	19.06	1.89	0.438
40000	21.08	2.08	0.487
41000	23.27	2.29	0.540
42000	25.64	2.51	0.597

43000	28.22	2.76	0.658
44000	31.00	3.00	0.723
45000	34.00	3.27	0.793
46000	37.24	3.55	0.868
47000	40.74	3.85	0.948
48000	44.50	4.17	1.033
49000	48.54	4.51	1.12
50000	52.88	4.86	1.22
51000		5.23	1.32
52000		5.63	1.43
53000		6.04	1.54
54000		6.47	1.66
55000		6.93	1.78
56000		7.41	1.91
57000		7.92	2.05
58000		8.45	2.20
59000		9.01	2.35
60000		9.59	2.51
61000		10.2	2.67
62000		10.84	2.85
63000		11.52	3.03
64000		12.22	3.22
65000		12.96	3.41
66000		13.73	3.62
67000		14.54	3.83
68000		15.38	4.05
69000		16.26	4.28
70000		17.19	4.52
71000		18.15	4.77
72000		19.16	5.03
73000		20.22	5.29
74000		21.32	5.57
75000		22.47	5.86
76000		23.66	6.15
77000		24.91	6.46
78000		26.22	6.78
79000		27.58	7.11
80000		28.99	7.45

Anexo D. Diseño de PLD de la carretera Chihuahua – Madera

Esta carretera está conformada por tramos federales y estatales. Para el análisis se dividió en dos tramos de estudio: el primero de la ciudad de Chihuahua a la ciudad de Cuauhtémoc y el segundo de la ciudad de Cuauhtémoc a la ciudad de Madera. A continuación, se presentan los datos de tránsito y clima de ambos tramos. Para el análisis se siguió la misma metodología que el tramo de estudio Ciudad Juárez -Villa Ahumada. Solamente se evaluará el diseño con el programa IMT-PAVE y se verificará la vida del diseño con las funciones de transferencia del programa Per Road.

El TDPA del 2018, sin incluir las motocicletas, para el tramo Chihuahua – Cuauhtémoc fue de 11643 vehículos. La tasa de crecimiento para todos los tipos de vehículos es de: 3.64% y la tasa de crecimiento tan solo considerando los vehículos tipo B y C es de: 3.39%.

Mientras que para el tramo Cuauhtémoc- Madera el TDPA en el 2018, nuevamente excluyendo las motocicletas, fue de: 6518 vehículos. La tasa de crecimiento para todos los tipos de vehículos es de: 1.92% y para los vehículos tipo B y C es 1.77%.

En relación con los datos de temperatura solicitados para el diseño con el programa Per Road, se ocuparon datos de tres estaciones cercanas al tramo de Cuauhtémoc - Madera y datos de dos estaciones para el tramo Chihuahua -Cuauhtémoc (tabla 68), aunque se puede apreciar que las temperaturas medias son muy similares para todas las estaciones.

En la tabla 69 se muestran las estructuras base, el grado PG del asfalto y los módulos para las capas de concreto asfáltico, base estabilizada y la subrasante utilizados como punto de partida, dentro de las iteraciones se incluyó la estructura seleccionada para el tramo de estudio Ciudad Juárez – Villa Ahumada. Se examinaron exclusivamente las estructuras de Ohio por ser las que utilizan asfalto grado PG 64-22 el cual coincide con el utilizado en la región de Cuauhtémoc (Dirección de Caminos, 2018).

En las tablas 70 y 72 se muestran los resultados de las iteraciones realizadas con el programa IMT-PAVE para ambos tramos. Por otro lado, en las tablas 71 y 73 se resumen las iteraciones que cumplieron con ambos criterios de falla para el tramo respectivo.

El diseño seleccionado para ambos tramos es muy similar en cuanto a las capas de CA. Ambos diseños tienen 5 cm en la capa de superficie, 8 cm para la capa intermedia. Mientras que la capa del fondo varía sólo por un cm y la base.

La primera capa estará conformada por mezcla superpave tipo SMA con tamaño máximo nominal de 12.5 mm ($\frac{1}{2}$ in) con asfalto modificado grado PG 64-22 o PG 68-22, la capa intermedia será una mezcla superpave densa de graduación gruesa con tamaño máximo nominal de 19 mm ($\frac{3}{4}$ in) con asfalto grado PG 64-22 modificado con polímero. La tercera capa formada por mezcla asfáltica de granulometría densa de graduación fina con un tamaño máximo nominal de 37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ in) con asfalto AC-20 grado PG 64-22. Por último, la capa de base estabilizada la cual debe tener un módulo mínimo de 2900 MPa.

Tabla 64. TDPA del periodo 2003 al 2018 del tramo Chihuahua -Cuauhtémoc.

AÑO	TDPA	Clasificación por tipo de vehículo		
		A	B	C
2003	6289	5126	340	824
2004	5711	4466	331	914
2005	6412	5344	406	791
2006	7210	6100	216	894
2007	8854	7508	398	947
2008	9172	7347	440	1385
2009	8424	6882	312	1230
2010	7627	6401	241	996
2011	9774	7936	225	1466
2012	9861	7897	185	1442
2013	10362	8497	52	1720
2014	10543	8645	53	1750
2015	10328	9293	57	1881
2016	10444	8658	125	1608
2017	10920	9096	76	1616
2018	11773	9724	94	1825

Tabla 65. Cálculo de los eje equivalentes para el tramo Chihuahua -Cuauhtémoc.

Vehículo	TDPA	TC	n	CT	TD	Cd	CD	Ci	ΣEE
B	94	0.0364	40	31879.63	2,996,685	3.7982	0.9	1	10,243,711
C2	1719	0.0364	40	31879.63	54,801,087	5.0543	0.9	1	249,282,162
C3	35	0.0364	40	31879.63	1,115,787	3.7982	0.9	1	3,814,148
T3-S2	35	0.0364	40	31879.63	1,115,787	6.1013	0.9	1	6,126,980
T3S3	35	0.0364	40	31879.63	1,115,787	6.0838	0.9	1	6,109,357
T3-S2-R4	0	0.0364	40	31879.63	-	6.6504	0.9	1	-
EE totales									275,576,357

Tabla 66. TDPA del periodo 2003 al 2018 del tramo Cuauhtémoc - Madera.

AÑO	TDPA	Clasificación por tipo de vehículo		
		A	B	C
2003	4711	3708	259	744
2004	4783	3420	383	981
2005	4815	3534	351	929
2006	5625	4309	281	1036
2007	5973	4653	311	1009
2008	6676	5141	361	1175
2009	6467	5219	356	892
2010	5959	5137	72	751
2011	6952	5381	202	1342
2012	6955	4842	254	1297
2013	6256	4629	106	1489
2014	6499	4816	110	1540
2015	6876	5088	103	1650
2016	6989	5109	91	1761
2017	6710	4965	872	1617
2018	6564	5212	72	1234

Tabla 67. Cálculo de los eje equivalentes para el tramo Cuauhtémoc – Madera.

Vehículo	TDPA	TC	n	CT	TD	Cd	CD	Ci	ΣEE
B	72	0.0192	40	21668.39	1,560,124	3.7982	0.9	1	5,333,047
C2	768	0.0192	40	21668.39	16,641,326	5.0543	0.9	1	75,698,967
C3	118	0.0192	40	21668.39	2,556,870	3.7982	0.9	1	8,740,271
T3-S2	158	0.0192	40	21668.39	3,423,606	6.1013	0.9	1	18,799,612
T3S3	118	0.0192	40	21668.39	2,556,870	6.0838	0.9	1	13,999,832
T3-S2-R4	24	0.0192	40	21668.39	520,041	6.6504	0.9	1	3,112,642
EE totales									125,684,371

Tabla 68. Datos de temperatura media de estaciones cercanas a la carretera Chihuahua – Madera.

Lugar	Temperatura media general		Estación (meses)	Duración en semanas	Temperatura promedio de la estación	
	°C	°F			°C	°F
Madera	11.9	53.4	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	17	4.5	40.1
			Primavera (marzo, abril, mayo)	13	10.6	51.1
			Verano (junio, julio, agosto)	13	18.4	65.1
			Otoño (septiembre, octubre)	9	14.0	57.2
Temosachi	14.3	57.7	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	17	6.9	44.5
			Primavera (marzo, abril, mayo)	13	13.1	55.6
			Verano (junio, julio, agosto)	13	20.7	69.3
			Otoño (septiembre, octubre)	9	16.3	61.3
Tejolocachi	14.2	57.5	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	17	6.8	44.2
			Primavera (marzo, abril, mayo)	13	13.0	55.5
			Verano (junio, julio, agosto)	13	20.8	69.4
			Otoño (septiembre, octubre)	9	16.1	61.0
Cuauhtémoc	13.4	56.1	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	17	7.1	44.8
			Primavera (marzo, abril, mayo)	13	12.6	54.7
			Verano (junio, julio, agosto)	13	19.0	66.2
			Otoño (septiembre, octubre)	9	14.8	58.6
Abraham González	13.9	57.1	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	17	7.3	45.1
			Primavera (marzo, abril, mayo)	13	12.9	55.2
			Verano (junio, julio, agosto)	13	19.8	67.6
			Otoño (septiembre, octubre)	9	15.8	60.4

Tabla 69. Estructuras base para diseño de la carretera Chihuahua-Madera.

Basada en estructura de Ohio Qin 2010				Basada en estructura de Ohio Sargan 2015															
Capa	Espesor		Espesor		Grado PG del asfalto				Módulos										
	in	cm	in	cm	1	2	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
CA 1	1.75	4.5	2	5	64-28	64-22	5000	725	3400	500	4400	650	2400	350	3400	500	10000	1500	
CA 2	9	12	8	20	64-22	64-22	3400	500	2400	350	3400	500	3400	500	10000	1500	8200	1200	
CA 3	4	10	4	10	64-22	64-22	2400	350	3400	500	2400	350	2400	350	3400	500	5500	800	
BG	6	15	6	15			207	30	207	30	207	30	207	30	207	30	207	30	
BE							2900	421	2900	421	2900	421	2900	421	2900	421	2900	421	
SR							97\62	14\9	97\62	14\9	97\62	14\9	97\62	14\9	97\62	14\9	97\62	14\9	

CA = Concreto Asfáltico; BG = Base Granular; BE = Base Estabilizada; SR = Subrasante; PG=Grado de desempeño del asfalto.
 El primer valor del módulo resiliente fue utilizado para Cuauhtémoc y el segundo para Madera.

Tabla 70. Iteraciones con el programa IMT-PAVE para el tramo Chihuahua – Cuauhtémoc utilizando el nivel de alta sobrecarga para los espectros de carga.

Iteración	Espesor de la capa cm				Espesor total cm		Módulo de la capa MPa					Falla años	
	1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	Deformación
1	5	20	10	20	35	55	5000	3400	2400	207	97	>40	5.1
2	5	20	10	20	35	55	3400	2400	3400	207	97	>40	4.1
3	5	20	10	20	35	55	4400	3400	2400	207	97	>40	5
4	5	20	10	20	35	55	2400	3400	2400	207	97	>40	4.3
5	5	20	10	20	35	55	3400	10000	3400	207	97	>40	17
6	5	20	10	20	35	55	10000	8200	5500	207	97	>40	22.7
7	5	20	10	20	35	55	5000	3400	2400	2900	97	>40	>40
8	5	20	10	20	35	55	3400	2400	3400	2900	97	>40	35.3
9	5	20	10	20	35	55	4400	3400	2400	2900	97	>40	>40
10	5	20	10	20	35	55	2400	3400	2400	2900	97	>40	36.3
11	5	20	10	20	35	55	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
12	5	20	10	20	35	55	10000	8200	5500	2900	97	>40	>40
13	4.5	23	10	15	37.5	52.5	5000	3400	2400	207	97	>40	4.7
14	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	2400	3400	207	97	>40	3.6
15	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	3400	2400	207	97	>40	4.5
16	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	3400	2400	207	97	>40	4
17	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	207	97	>40	18.5
18	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	207	97	>40	23.3
19	4.5	23	10	15	37.5	52.5	5000	3400	2400	2900	97	>40	24.1
20	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	2400	3400	2900	97	>40	19.7
21	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	3400	2400	2900	97	>40	23.5
22	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	3400	2400	2900	97	>40	21.2
23	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
24	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	97	>40	>40
25	6	8	14	25	28	53	5000	3400	2400	207	97	>40	3.2
26	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	207	97	>40	3.3
27	6	8	14	25	28	53	4400	3400	2400	207	97	>40	3.1
28	6	8	14	25	28	53	2400	3400	2400	207	97	>40	2.6
29	6	8	14	25	28	53	3400	10000	3400	207	97	>40	6.1
30	6	8	14	25	28	53	10000	8200	5500	207	97	>40	11.5
31	6	8	14	25	28	53	5000	3400	2400	2900	97	>40	>40
32	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	2900	97	>40	>40
33	6	8	14	25	28	53	4400	3400	2400	2900	97	>40	>40
34	6	8	14	25	28	53	2400	3400	2400	2900	97	>40	39.3
35	6	8	14	25	28	53	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
36	6	8	14	25	28	53	10000	8200	5500	2900	97	>40	>40
37	4	7	13	25	24	49	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
38	6	8	14	22	28	50	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
39	5	8	14	25	27	52	5000	3400	2400	2900	97	>40	>40
40	5	8	14	25	27	52	3400	2400	3400	2900	97	>40	>40
41	5	7	14	25	26	51	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40

CA = Concreto Asfáltico; SR = Subrasante

Tabla 71. Iteraciones que cumplen ambos criterios de falla para el tramo Chihuahua – Cuauhtémoc.

Iteración	Espesor de la capa en cm				Espesor total cm		Módulo de la capa MPa						Falla años Deformación
	1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	
37	4	7	13	25	24	49	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
41	5	7	14	25	26	51	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
39	5	8	14	25	27	52	5000	3400	2400	2900	97	>40	>40
40	5	8	14	25	27	52	3400	2400	3400	2900	97	>40	>40
31	6	8	14	25	28	53	5000	3400	2400	2900	97	>40	>40
32	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	2900	97	>40	>40
33	6	8	14	25	28	53	4400	3400	2400	2900	97	>40	>40
35	6	8	14	25	28	53	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
36	6	8	14	25	28	53	10000	8200	5500	2900	97	>40	>40
38	6	8	14	22	28	50	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
7	5	20	10	20	35	55	5000	3400	2400	2900	97	>40	>40
11	5	20	10	20	35	55	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
12	5	20	10	20	35	55	10000	8200	5500	2900	97	>40	>40
23	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	2900	97	>40	>40
24	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	97	>40	>40

CA = Concreto Asfáltico; SR = Subrasante. El renglón resaltado en amarillo corresponde a la estructura seleccionada.

Tabla 72. Iteraciones con el programa IMT-PAVE para el tramo Cuauhtémoc - Madera utilizando el nivel de alta sobrecarga para los espectros de carga.

Iteración	Espesor de la capa cm				Espesor total cm		Módulo de la capa cm						Falla años
	1	2	3	Base	CA	pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	Deformación
1	5	20	10	20	35	55	5000	3400	2400	207	62	>40	2.8
2	5	20	10	20	35	55	3400	2400	3400	207	62	>40	2.3
3	5	20	10	20	35	55	4400	3400	2400	207	62	>40	2.8
4	5	20	10	20	35	55	2400	3400	2400	207	62	>40	2.4
5	5	20	10	20	35	55	3400	10000	3400	207	62	>40	8.7
6	5	20	10	20	35	55	10000	8200	5500	207	62	>40	10.9
7	5	20	10	20	35	55	5000	3400	2400	2900	62	>40	19.6
8	5	20	10	20	35	55	3400	2400	3400	2900	62	>40	17
9	5	20	10	20	35	55	4400	3400	2400	2900	62	>40	19.2
10	5	20	10	20	35	55	2400	3400	2400	2900	62	>40	17.4
11	5	20	10	20	35	55	3400	10000	3400	2900	62	>40	>40
12	5	20	10	20	35	55	10000	8200	5500	2900	62	>40	>40
13	4.5	23	10	15	37.5	52.5	5000	3400	2400	207	62	>40	2.6
14	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	2400	3400	207	62	>40	2.1
15	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	3400	2400	207	62	>40	2.5
16	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	3400	2400	207	62	>40	2.2
17	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	207	62	>40	9.5
18	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	207	62	>40	11.2
19	4.5	23	10	15	37.5	52.5	5000	3400	2400	2900	62	>40	12
20	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	2400	3400	2900	62	>40	10
21	4.5	23	10	15	37.5	52.5	4400	3400	2400	2900	62	>40	11.8
22	4.5	23	10	15	37.5	52.5	2400	3400	2400	2900	62	>40	10.7
23	4.5	23	10	15	37.5	52.5	3400	10000	3400	2900	62	>40	32.6
24	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	62	>40	>40
25	6	8	14	25	28	53	5000	3400	2400	207	62	>40	1.8
26	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	207	62	>40	1.9
27	6	8	14	25	28	53	4400	3400	2400	207	62	>40	1.7
28	6	8	14	25	28	53	2400	3400	2400	207	62	>40	1.54
29	6	8	14	25	28	53	3400	10000	3400	207	62	>40	3.3
30	6	8	14	25	28	53	10000	8200	5500	207	62	>40	5.5
31	6	8	14	25	28	53	5000	3400	2400	2900	62	>40	21.5
32	6	8	14	25	28	53	3400	2400	3400	2900	62	>40	21.9
33	6	8	14	25	28	53	4400	3400	2400	2900	62	>40	20.9
34	6	8	14	25	28	53	2400	3400	2400	2900	62	>40	18.7
35	6	8	14	25	28	53	3400	10000	3400	2900	62	>40	32.1
36	6	8	14	25	28	53	10000	8200	5500	2900	62	>40	>40
37	6	10	14	25	30	55	3400	10000	3400	2900	62	>40	>40
38	7	8	10	30	25	55	3400	10000	3400	2900	62	>40	>40
39	5	8	15	30	28	58	5000	3400	2400	2900	62	>40	>40
40	6	22	15	20	43	63	5000	3400	2400	2900	62	>40	>40
41	6	20	10	25	36	61	5000	3400	2400	2900	62	>40	>40

CA = Concreto Asfáltico; SR = Subrasante

Tabla 73. Iteraciones que cumplen ambos criterios de falla para el tramo Cuauhtémoc – Madera.

Iteración	Espesor de la capa cm				Espesor total cm		Módulo de la capa MPa					Falla años	
	1	2	3	Base	CA	Pavimento	1	2	3	Base	SR	Fatiga	Deformación
38	7	8	10	30	25	55	3400	10000	3400	2900	62	>40	>40
36	6	8	14	25	28	53	10000	8200	5500	2900	62	>40	>40
39	5	8	15	30	28	58	5000	3400	2400	2900	62	>40	>40
37	6	10	14	25	30	55	3400	10000	3400	2900	62	>40	>40
11	5	20	10	20	35	55	3400	10000	3400	2900	62	>40	>40
12	5	20	10	20	35	55	10000	8200	5500	2900	62	>40	>40
41	6	20	10	25	36	61	5000	3400	2400	2900	62	>40	>40
24	4.5	23	10	15	37.5	52.5	10000	8200	5500	2900	62	>40	>40
40	6	22	15	20	43	63	5000	3400	2400	2900	62	>40	>40

CA = Concreto Asfáltico; SR = Subrasante. El renglón resaltado en amarillo corresponde a la estructura seleccionada.