



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



PLANEACIÓN ESTRATÉGICA Y MANEJO EFICIENTE DE UNA NUEVA
TECNOLOGÍA DE PAVIMENTACIÓN CON EL USO DE ASFALTO ESPUMADO EN
MÉXICO. CASOS DE ESTUDIO: LIBRAMIENTO CIUDAD VALLES – TAMUÍN

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestría en Planeación Estratégica e Innovación

Presenta:

Ing. Elvia Raquel Blanco Martínez

Asesor:

Dr. Jorge Pedro García Contreras

Índice

Introducción	1
1.-Antecedentes del estado actual del libramiento Ciudad Valles y Tamuín	3
1.1.-Análisis de la Estructura Actual de Pavimentos	4
1.1.1.-Evaluación del Pavimento mediante Deflectómetro de Impacto	5
1.1.2.-Vida Remanente Estructura Actual	5
1.2.-Problemática	6
1.3.-Justificación	10
1.4.-Objetivo General	11
2.-Conceptos generales del diseño de la mezcla y la estructura del pavimento	12
2.1.-Pavimentos	12
2.1.2.- Generalidades de las Capas de Pavimento	13
2.1.2.1.- Pavimento Flexible	13
2.1.2.2. Pavimento Rígido	14
2.1.2.3.-Modulo Resiliente	14
2.1.3.-Estructura de Pavimento	14
2.1.3.1.-Carpeta Asfáltica	14
2.1.3.2.- Base	15
2.1.3.2.1.-Base Espumada	15
2.1.3.2.2.-Expansión	17
2.1.3.2.3.- Vida Media	17
2.1.3.3.- Subbase	17
2.1.3.4.- Subrasante	17
2.2.-Material Reciclable	19
2.2.1.-Reciclaje en Frio	20
2.2.2.-Tipos de Reciclaje de Pavimentos	20
2.2.2.1.-En planta	21
2.2.2.2.-En vía (o in situ)	22
3.-Diseño de mezcla y estructura del pavimento con base espumada	23
3.1.-Tránsito y Clima Libramiento Ciudad Valles-Tamuín	23
3.1.1.-Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y Configuración Vehicular Libramiento Ciudad Valles-Tamuín	23
3.1.2.-Cálculo de la Tasa de Crecimiento Libramiento Ciudad Valles-Tamuín	25
3.2.-Clima en Libramiento Ciudad Valles-Tamuín	30
3.3.-Calidades del Material del Pavimento	32

3.4.- Diseño de mezcla con Asfalto Espumado _____	43
3.4.1.-Granulometría_____	43
3.4.2.- Método AASHTO T180_____	44
3.4.3.- Índice Plástico_____	44
3.4.4.-Determinación del Contenido Optimo de Asfalto _____	45
3.5.-Determinación de las Propiedades del Asfalto Espumado _____	47
3.5.1.-Calidad del Asfalto Espumado _____	47
3.5.2.-Determinación de la resistencia a la tracción indirecta (ITS) Seco y Saturado _____	49
3.5.3.-Determinación de los resultados de Cohesión y Ángulo de fricción _____	51
3.6.-Diseño Estructural del Pavimento _____	51
3.6.1.-Método AASHTO 93 _____	51
3.6.2.-IMT-PAVE_____	52
3.6.3.-Resultaods de Diseños con el método AASHTO y IMT-PAVE _____	52
4.-Propuestas de Solución con la capa de asfalto espumado_____	55
4.1.-Vida Remanente Alternativa 1 y 2 _____	55
4.2.-Propuesta de Solución Alternativa 1 _____	56
4.3.-Tramos por Ejecutar de Subdrenaje Longitudinal y Transversal _____	58
4.3.1.-Sección Tipo Subdren Longitudinal _____	59
4.3.2.-Sección Tipo Subdren Transversal_____	60
4.4.-Bacheo Profundo _____	61
4.4.1.-Sección tipo Bacheo Profundo_____	62
4.5.-Propuesta de Solución Alternativa 2 _____	63
5.- Análisis financiero y programas de intervención con la capa de asfalto espumado _____	66
5.1.-Presupuesto Alternativa 1 _____	67
5.2.-Programa de Obra Alternativa 1 _____	68
5.3.-Programa de Obra Project Alternativa 1 _____	69
5.4.-Presupuesto Alternativa 2 _____	70
5.5.-Programa de Obra Alternativa 2 _____	71
5.6.-Programa de Obra Project Alternativa 2 _____	72
5.7.- Análisis y Comparativa de las Alternativas 1 y 2 de Rehabilitación _____	73
5.8.- Costo Beneficio _____	75
6.- Recomendaciones _____	77
Conclusiones _____	78
Bibliografía _____	80
Anexos_____	82

Índice de Figuras

Figura 1.- Segmento 2 del km 100+000 a km 118+640.	3
Figura 2.- Estructura Actual de Pavimento.	4
Figura 3.- Inventario de deterioros km 100+000 al Km 118+640.	7
Figura 4.- Estado actual del Pavimento, Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.	8
Figura 5.- Estado actual del Pavimento, Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.	8
Figura 6.- Estado actual del Pavimento, Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.	9
Figura 7.- Estado actual del Pavimento, Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.	9
Figura 8.- Estructura de Pavimento Flexible y Rígida.	12
Figura 9.- Estructura de Pavimento Flexible.	13
Figura 10.- Ensaye de módulo resiente para mezclas asfálticas.	14
Figura 11.- Diagrama de caja y bigotes para los resultados de Módulo Resiliente Carpetas Asfálticas.	15
Figura 12.- Asfalto Espumado.	16
Figura 13.- Configuración Vehicular 2019 empleada en el Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín, tramo km 100+000 al km 118+640 (elaboración propia).	25
Figura 14.- Histórico de vehículos pesados para la obtención de la tasa de crecimiento Libramiento Ciudad Valles-Tamuín (COCONAL).	27
Figura 15.- Espectros de carga considerados para la revisión del pavimento con programa IMT PAVE 3.0 (fuente: IMT)	30
Figura 16.- Temperatura media mensual Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín (km 100+000 al km 118+300) (elaboración propia).	31
Figura 17.- Localización de los sondeos para determinar calidades capas de los pavimentos, tramo II Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.	32
Figura 18.- Realización de calas y sondeos en el acotamiento del km 101+000 del Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.	32
Figura 19.- Detalle de extracción de muestras con broca de 4 pulgadas sobre acotamiento km 101+000 del Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín.	33
Figura 20.- Detalle de muestra extraída de sondeo: CASAA, carpeta asfáltica y porción de base cementada	33
Figura 21.- Curva Granulométrica.	44
Figura 22.- Cal Hidratada.	45
Figura 23.- Asfalto ECK-B 64-22.	46
Figura 24.- Gráfica de Expansión y Vida Media.	47
Figura 25.- Calidad de Asfalto Espumado.	48
Figura 26.- Maquina WLB10s.	48
Figura 27.- Mezcla con asfalto espumado puntos de soldadura.	49
Figura 28.- Gráfica de ITS seco y saturado.	50
Figura 29.- Diseño de pavimento con base espumada utilizando programa IMT PAVE 3.0.	54
Figura 30.- Estructura Propuesta de Pavimento, Alternativa 1.	57

<i>Figura 31.- Sección tipo Subdren Longitudinal.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 32.- Sección tipo Subdren Transversal.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 33.- Sección tipo Bacheo Profundo.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 34.- Estructura Propuesta de Pavimentos Alternativa 2.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 35 – Monto Acumulado de Pavimento.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 36 – Costo de Pavimento.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 37 – Precio Base Espumada Vs Base Asfáltica.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 38.- Nomograma AASHTO 93 para determinación de coeficientes de capa para carpetas asfálticas.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 39.- Nomograma AASHTO 93 para determinación de coeficientes de capa para bases estabilizadas (bases espumadas).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 40.- Nomograma AASHTO 93 para determinación de coeficientes de capa para bases estabilizadas (subbase hidráulica).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 41.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Tránsito.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 42.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Espectro de carga.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 43.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Análisis Espectral.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 44.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Análisis Probabilista.....</i>	<i>95</i>

Índice de Tablas

Tabla 1.-Vida remanente por Fatiga y Deformación.....	5
Tabla 2.- Calidad capa subrasante estabilizada con cal viva al 3%.	19
Tabla 3.- Principales ventajas de las técnicas de reciclado.	21
Tabla 4.- Aforo Vehicular para el Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín, tramo 100+000 al km 118+640	km 24
Tabla 5.- Configuración vehicular mensual y promedio segmento II, Libramiento Ciudad Valles-Tamuín	24
Tabla 6.- Obtención tasa de crecimiento segmento II Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.	27
Tabla 7.- Resumen de información de tránsito por subtramo.....	28
Tabla 8.- Cálculo de los ejes sencillo equivalentes duales (ESALS) para subtramo del km 100+000 al km 118+640.....	28
Tabla 9.- Temperatura Media mensual estaciones cercanas al Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín (km 100+000 al km 118+640). Fuente ERIC CLICOM.....	31
Tabla 10.- Calidades del terraplén Km 118+000 al Km 118+640.	34
Tabla 11.- Calidades capa de subyacente Km 118+000 al Km 118+640.	36
Tabla 12.- Calidades capa de subyacente Km 110+000 al Km 117+580.....	38
Tabla 13.- Calidades capa de subrasante Km 118+000 al Km 118+640.....	40
Tabla 14.- Calidades capa de RoadCem km 118+000 al km 118+640.	41
Tabla 15.- Calidades Carpeta Asfáltica Km 118+000 al Km 118+640.....	42
Tabla 16.- Determinación del Índice de plasticidad. [5].....	45
Tabla 17.- Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto.	46
Tabla 18.- Resultados de diseños ITS Seco y Saturado.....	50
Tabla 19.- Diseño del pavimento con base espumada con método AASHTO 93.	53
Tabla 20.- Vida Remanente Secciones Propuestas.	56
Tabla 21.- Subdrenaje Longitudinal.....	58
Tabla 22.- Subdrenaje Transversal.....	58
Tabla 23.- Bacheo Profundo.....	61
Tabla 24.- Presupuesto Alternativa 1.....	67
Tabla 25.- Programa de Obra Alternativa 1.....	68
Tabla 26.- Programa Proje de Obra Alternativa 1.....	69
Tabla 27.- Presupuesto Alternativa 2.	70
Tabla 28.- Programa de Obra Alternativa 2.	71
Tabla 29.- Programa Proje de Obra Alternativa 1.....	72
Tabla 30.- Análisis y Comparativa Alternativas 1 y 2.....	73
Tabla 31.- Cálculo de Ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALS).....	83
Tabla 32.- Coeficientes de drenaje (m) según AASHTO 93.	89
Tabla 33.- Resumen Final de diseño AASHTO 93 para base espumada.	90

Introducción

Una carretera es una vía de transporte que satisface necesidades tales como el movimiento de personas, bienes y servicios de manera rápida y eficiente, por lo que un transporte bien desarrollado con una vasta red de comunicaciones y una amplia infraestructura reduce el efecto a distancia entre regiones, integra el mercado nacional y conecta a bajo costo los mercados de diferentes países y comunidades, lo cual es un factor esencial para garantizar el funcionamiento efectivo de la economía.^[7]

Si a lo anterior le integramos reducción en los costos de rehabilitación de pavimentos, podemos estar seguros de generar un impacto económico importante con beneficio para la sociedad.

Derivado de la condición del tramo del Libramiento Ciudad Valles- Tamuín comprendido del km 100+000 al km 118+640 del Segmento 2, se realizaron inspecciones visuales en campo.

Relacionado con la rehabilitación definitiva del Segmento 2 y con conocimiento pleno sobre la problemática existente; se analizó la estructura actual del pavimento y cuerpo del terraplén, con el fin de determinar la calidad de los materiales y la vida útil de la estructura actual de pavimento.

Como etapa inicial se realizó una inspección ocular a todo el tramo, notándose deterioros del pavimento, en algunas zonas se detectó el desprendimiento de carpeta en zonas agrietadas por fatiga, baches, piel de cocodrilo entre otros deterioros. Figuras 4, 5, 6 y 7.

Posteriormente se definió la estratigrafía del pavimento en base a calas y sondeos que se ejecutaron en los acotamientos de la autopista.

Se analizaron cuencas de deflexión tanto en el cadenamiento ascendente como en el descendente. Las mismas se pueden inducir a partir de cargas estáticas o dinámicas. Las cuencas de deflexión utilizadas en este tramo carretero siguen las recomendaciones de la normativa SCT, referidos en los apartados de métodos de muestreo y prueba de materiales M-MMP-4-07-020/17 "Determinación de las deflexiones con equipo de impacto en pavimentos Flexibles".^{[11] y [28]}

Se obtuvo la vida remanente de la estructura actual, tanto por fatiga como por deformación permanente con el programa IMT PAVE 3.0. El programa permite diseñar pavimentos considerando factores de variación estacional para todos los materiales (método probabilista aleatorio), así como pavimentos con base cementada (bases con zeolitas sintéticas), las cuales prevalecen en el subtramo.^[6]

El presente estudio muestra antecedentes, expone el estado actual del tramo y brinda dos propuestas de conservación para la rehabilitación de dicho segmento, las cuales se analizaron de forma económica, todo lo anterior con el fin de subsanar la problemática existente.

Dichas propuestas incluirán una nueva tecnología que se está implementando en todo el mundo y que actualmente se está trabajado en México, sobre todo en carreteras de rehabilitación, sin dejar de mencionar que también es aplicable en carreteras nuevas, dicha tecnología es el uso y aplicación del asfalto espumado.

Este se utiliza como capa de base de primera calidad, el asfalto espumado es un proceso físico, en el cual se inyectan pequeñas cantidades de agua y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160°C a 190°C), dentro de una cámara, generando una espuma aumentando su volumen original a un tamaño de 15 a 20 veces mayor.^[25]

El proceso constructivo es fácil, ya que su aplicación no requiere de procesos complicados, el material puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico en menor tiempo después del mezclado, además se puede producir en grandes cantidades y ser almacenado cerca del punto de aplicación.

Una de las ventajas de utilizar esta tecnología es que minimiza la explotación de bancos de material virgen. Con esta innovación se pueden utilizar materiales reciclados que antes se desechaban como el Reciclado de Pavimentos Asfálticos (RAP), lo que permite afectar lo menos posible al medio ambiente y crear ahorros económicos importantes.

1.-Antecedentes del estado actual del libramiento Ciudad Valles y Tamuín

El Libramiento de Ciudad Valles y Tamuín es una autopista de altas especificaciones tipo A2, que se ubica en el municipio de Ciudad Valles y en el municipio de Tamuín, en el Estado de San Luis Potosí. Se localiza al sur de la cabecera municipal de Cd. Valles, San Luis Potosí. El inicio del proyecto se ubica en el Entronque La Pitahaya, en la carretera federal 70, del tramo Cd. Valles-Tampico y el final se localiza nuevamente sobre la carretera federal 70 en la localidad de Tamuín, S.L.P. abarcando 49.14 kilómetros de longitud Figura 1.

El Libramiento cuenta con dos carriles de circulación (uno por sentido) de 3.50 m de ancho, acotamientos exteriores de 2.50 m y una velocidad de proyecto de 110 km/h y cuenta con cuatro entronques: La Pitahaya, La Calera, San Vicente y San Juan.

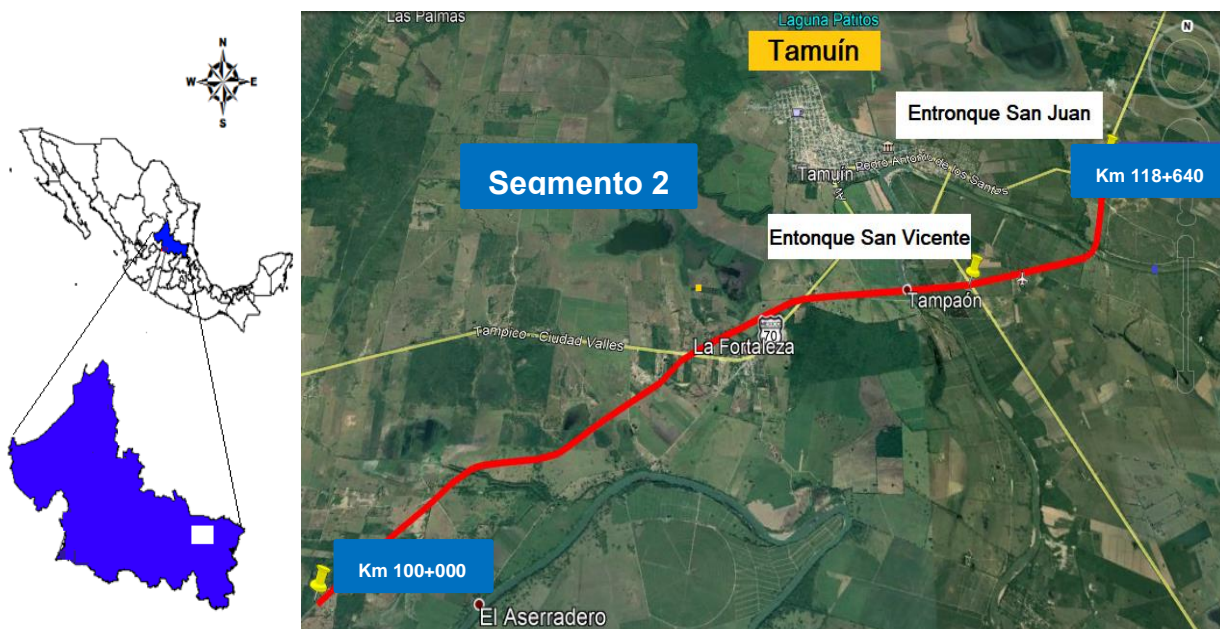


Figura 1.- Segmento 2 del km 100+000 a km 118+640.

1.1.-Análisis de la Estructura Actual de Pavimentos

Como parte de los trabajos ejecutados para la definición de las alternativas de solución propuestas se realizaron sondeos de pozos a cielo abierto (PCA), con el fin de obtener los espesores y calidades de cada una de las capas.

De acuerdo con los resultados de PCA realizados por el laboratorio en campo, la estructura actual del subtramo 2, Km 100+000 al Km 118+640, está conformada por una capa de rodadura tipo Carpeta Asfáltica Superficial Altamente Adherida (CASAA) de 3 cm de espesor, una Carpeta Asfáltica de 6 cm, una Base Estabilizada PowerCem de 25 cm, Subrasante de 25 cm y Subyacente de 30 cm Figura 2.

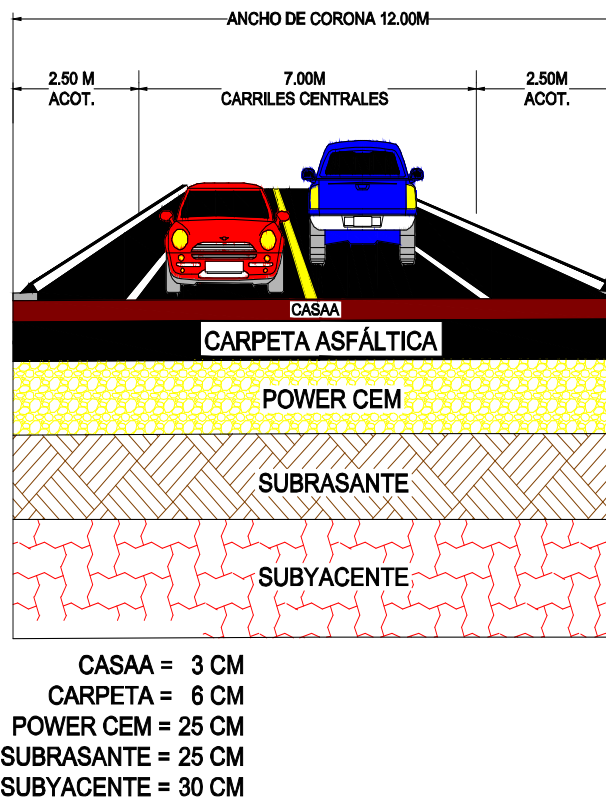


Figura 2.- Estructura Actual de Pavimento.

1.1.1.-Evaluación del Pavimento mediante Deflectómetro de Impacto

Para poder evaluar la condición estructural del pavimento, se realizaron pruebas de deflexión mediante el equipo Deflectómetro de impacto Falling Weight Deflectometer (FWD). Según la normativa N-CSV-CAR-1-03-010-17. [19] La deflexión es la medida de la deformación elástica o de recuperación vertical que experimenta un pavimento al paso de una carga. La aplicación de una carga a la superficie del pavimento produce una deflexión, cuya magnitud disminuye al aumentar la distancia a la carga aplicada. La forma resultante se denomina cuenca de deflexión.

Para el Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín, subtramo km 100+000 al km 118+640, se llevaron a cabo deflexiones en ambos carriles, generando un primer impacto de asentamiento y un segundo impacto de registro. Las mediciones fueron llevadas a cabo con un deflectómetro de impacto Heavy Weight Deflectometer (HWD), en condiciones climáticas normales (clima soleado) y tratando de no hacer la medición en puntos de mucho deterioro.

1.1.2.-Vida Remanente Estructura Actual

La vida remanente de la estructura actual se obtuvo de los indicadores de deterioro por fatiga y por deformación permanente. Puede observarse que, debido al agrietamiento reflectivo en la carpeta, originado por la base cementada, así como por su bajo espesor original, se obtuvieron vidas remanentes muy bajas por fatiga. Al realizar el cálculo de la vida remanente de acuerdo con las deformaciones registradas, se tienen resultados de vida remanente bajas por fatiga, la cual controla el diseño de esta estructura de pavimento Tabla 1.

Tabla 1.-Vida remanente por Fatiga y Deformación.

S.H	Km Inicial	Km Final	Longitud (km)	Vida remanente fatiga (años)	Vida remanente por deformación (años)
1	100+000	112+192	12.19	1	13
2	112+192	116+920	4.73	1	13
3	116+920	119+820	2.9	1	13

Los pavimentos con bases cementadas como lo es el PowerCem, presentan una vida remanente muy baja y están gobernados por la fatiga, además de que existe una carencia de calidad y capacidad estructural.

Por lo anterior se concluye que debe reforzarse estructuralmente el pavimento para cumplir por fatiga en los materiales estabilizados con asfalto.

1.2.-Problemática

Como etapa inicial se realizó una inspección ocular a todo el tramo, y se detectó la presencia de un notorio agrietamiento longitudinal y transversal en la carpeta asfáltica sobre el segmento 2, del km 100+000 al km 118+640 Ver Figuras 4, 5, 6 y 7. El cuál pudo haberse originado ya sea por una deficiencia en el procedimiento constructivo de la carpeta asfáltica o por la falla de algunas de las capas inferiores que componen la estructura del pavimento. De la revisión del referido Perfil Informativo se destaca lo siguiente:

- Se encontró que algunas secciones del cuerpo del terraplén son deficientes, presentan material suelto y sin grado de compactación definido.
- Se detecta la construcción de una base cementada rígida que en teoría debería dar soporte a la superficie de rodamiento.
- Debido a que dicha estructura se construyó aparentemente sobre un material de terraplén de baja calidad (en cuanto a calidad de los materiales y procedimiento constructivo), al término de la construcción de la carpeta asfáltica se manifestaron agrietamientos longitudinal y transversal, lo cual indica la probabilidad de asentamiento de las capas inferiores.

El tramo actualmente presenta una falla estructural por falta de capacidad y espesor, fundamentalmente en la base estabilizada con PowerCem, situación que provoca que se tengan variaciones en la capacidad estructural, teniendo como resultado el fenómeno de fatiga en las capas estabilizadas con asfalto y por ende presencia de fallas en capa

de rodamiento; favoreciendo la entrada de agua a las capas inferiores y por consiguiente baches aislados de forma continua.

En la Figura 3, se muestra un larguillo con los deterioros observados sobre la superficie del pavimento del Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín km 100+000 al km 118+640, Bacheo Profundo, Fatiga Transversal y Longitudinal.

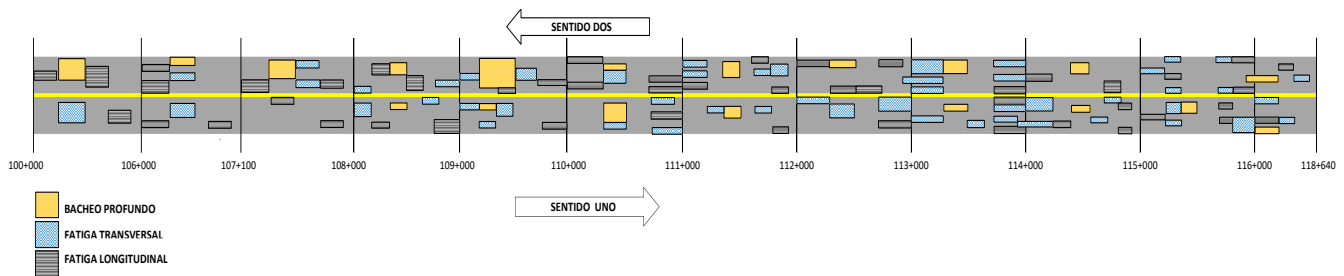


Figura 3.- Inventario de deterioros km 100+000 al Km 118+640.

Las Figuras 4, 5, 6 y 7 muestran la condición actual de la superficie del pavimento a lo largo del tramo en estudio. Puede observarse la presencia de deterioros superficiales en el pavimento, tales como desprendimientos, fisuras con expulsión de finos, disgregación de materiales, hundimientos y/o deformaciones y presencia de agua superficial.

Como etapa inicial se realizó una inspección ocular a todo el tramo, notándose deterioros del pavimento, en algunas zonas se detectó el desprendimiento de capeta, zonas agrietadas por fatiga, baches, piel de cocodrilo entre otros deterioros.

En las figuras 4, 5, 6 y 7 puede observarse agrietamiento reflexivo de grietas originado por la falla de la base cementada con zeolita. Existe una gran cantidad de material fino en la superficie del pavimento originado por el bombeo de los vehículos y presencia de agua superficial. Esto trae como consecuencia la pérdida de soporte del pavimento.



Figura 4.- Estado actual del Pavimento bacheo profundo,
Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.



Figura 5.- Estado actual del Pavimento bacheo profundo,
Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.



Figura 6.- Estado actual del Pavimento Fisuras Longitudinales, Transversales y desprendimiento de finos, Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.



Figura 7.- Estado actual del Pavimento Fisuras Longitudinales y Transversales bacheo profundo, Segmento 2 del km 100+000 al km 118+640.

1.3.-Justificación

El presente trabajo busca dar una solución a la estructura que actualmente tiene el proyecto Libramiento Ciudad Valles- Tamuín comprendido del km 100+000 al km 118+640 del Segmento 2, ya que actualmente presenta fallas y deterioros, notándose que lo que provocando el daño es la capa "PowerCem".

Con la experiencia y aplicación que se ha tenido en otros proyectos rehabilitadores y en construcción de carreteras nuevas se está proponiendo el usar una capa de base hidráulica tipo Asfalto Espumado, la cual ha funcionado y garantizado una estructura con mayor resistencia, durabilidad y menor costo, es una tecnología con una innovación que permite ir más allá en un pavimento convencional, creando una perspectiva más amplia del uso eficiente de nuevas tecnologías. Esta capa minimiza el uso de bancos de material virgen ya que aprovecha el material reciclado en este caso el Reciclado de Pavimentos Asfálticos (RAP), que anteriormente se desechaba provocando contaminación. lo que permite afectar lo menos posible al medio ambiente y crear ahorros económicos importantes.

El proceso constructivo es fácil, ya que su aplicación no requiere de procesos complicados, el material puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico en menor tiempo después del mezclado, además se puede producir en grandes cantidades y ser almacenado cerca del punto de aplicación.

Una de las ventajas del asfalto espumado es la reducción de los gastos de transporte y material, además tiende grandes beneficios como:

- **Flexibilidad:** Estas mezclas se pueden producir en grandes cantidades y ser almacenadas cerca del punto de aplicación, para ser colocadas y compactadas en una etapa posterior. Esto proporciona flexibilidad en la mezcla de fabricación.
- **Tiempo:** El material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico en un menor tiempo después del mezclado. Los periodos de construcción son más cortos.
- **Seguridad:** Uno de los mayores beneficios de este proceso son los relativamente altos niveles de seguridad del tráfico que se pueden alcanzar.

- **Consumo de energía:** La estabilización con asfalto espumado requiere de un reducido consumo de energía en comparación con el método tradicional de mezcla en caliente.
- **Rentabilidad de Costos:** Ahorro en los costos de material, pues se necesita muy poco agregado nuevo, o reutilización y conservación de recursos no renovables, como agregados y derivados pétreos.
- **Resistencia:** Mejora la capacidad de soporte de la estructura de pavimento.
- **Medio Ambiente:** Reducción de la contaminación por varios efectos asociados a los sistemas constructivos y productivos, siendo los principales: reducción de ruido, reducción de la emisión de polvo

1.4.-Objetivo General

El objetivo del presente proyecto es generar alternativas de solución que permitan resolver la falla que actualmente presenta el pavimento, dado a la falta de capacidad estructural y espesor que actualmente existe y al problema que se tiene con la capa de base estabilizada con "PowerCem" existente, lo que se busca es que a través de un programa de planeación estratégico se logre incrementar la seguridad, transpirabilidad y confort para los usuarios.

1.4.1.-Objetivos Específicos

-Presentar un programa de planeación estratégico para definir la mejor alternativa de solución al proyecto con el fin de mejorar su estructura, disminuir costos y minimizar los impactos ambientales.

-Implementación y/o establecimiento de nuevas tecnologías como lo es el uso de asfalto espumado con el fin de mejorar la calidad del pavimento.

-Dar solución a la estructura actual de pavimento con el fin de aumentar la vida del pavimento a largo plazo cumpliendo con los estándares de calidad que marca la normativa.

2.-Conceptos generales del diseño de la mezcla y la estructura del pavimento

2.1.-Pavimentos

Los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras viales multicapa, es decir, están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural). Así mismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie en determinado periodo de tiempo (objetivo funcional).^[8]

Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales, estos se clasifican en dos tipos: Flexibles y Rígidos. Figura 8 y 9

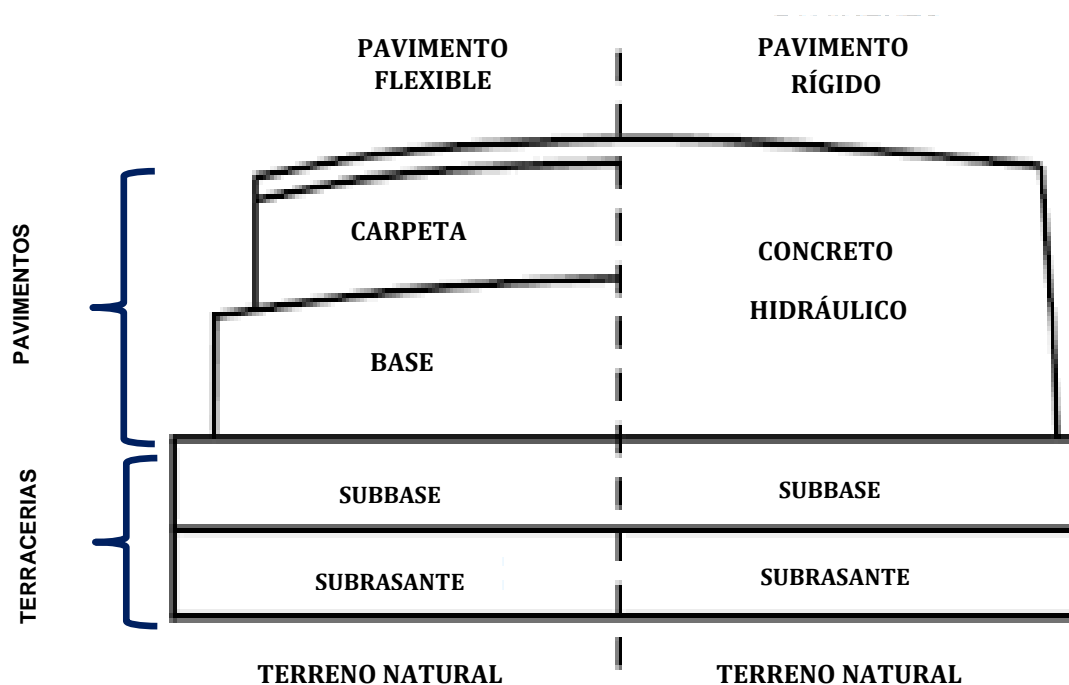


Figura 8.- Estructura de Pavimento Flexible y Rígida. ^[27]

En el presente proyecto trabajaremos con el pavimento flexible y en particular con la capa base, ya que es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos, existen diversos tipos bases las cuales están conformadas o elaboradas con diversos materiales de los cuales pueden estar conformadas únicamente con materiales 100% virgen.

Existen otros tipos de bases que pueden estar conformadas con material virgen y reciclado tipo Reciclado de Pavimentos Asfálticos (RAP) el cual es el material existente en una carretera que ya tiene que ser levantado porque no cumple con los estándares de desempeño como puede ser el Índice de Rugosidad Internacional IRI, Profundidad de Rodera (PR), Coeficiente de Fricción (CF), Deflexión (D) y Macrotextura (MT), anteriormente este material se desechaba, pero con la implementación de nuevas tecnologías ahora es posible utilizarlo tal es el caso de la base espumada que con el paso del tiempo se está utilizando en muchos lugares del mundo.

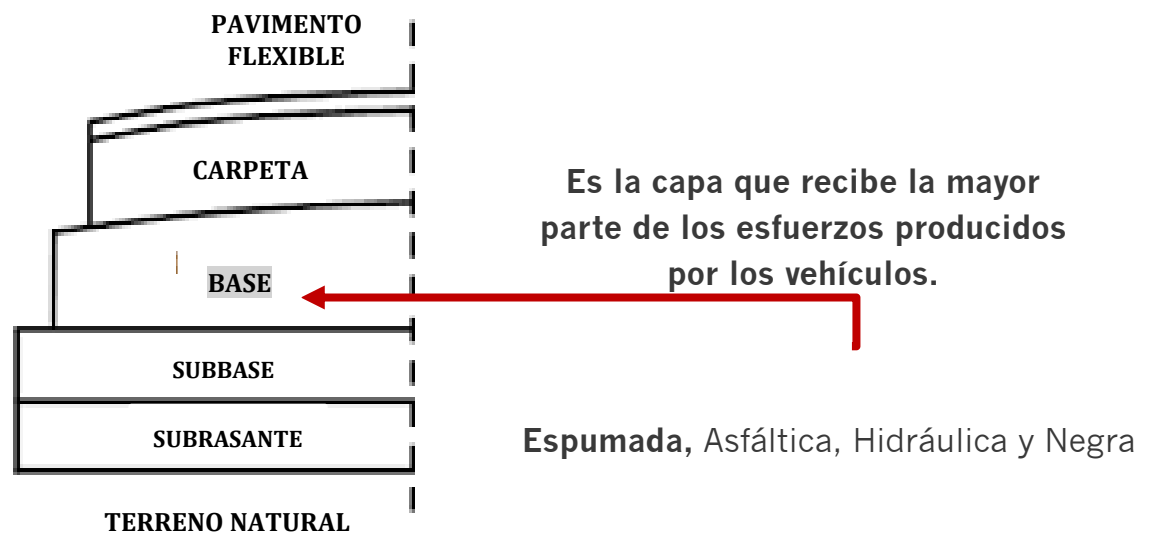


Figura 9.- Estructura de Pavimento Flexible. [27]

2.1.2.- Generalidades de las Capas de Pavimento

2.1.2.1.- Pavimento Flexible

Las estructuras de pavimento del tipo flexible pueden ser definidas como estructuras viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, compuestas por materiales granulares no tratados o ligados (base, subbase, afirmado y en algunos casos subrasante mejorada o material de conformación), que a su vez se soportan sobre el terreno natural o subrasante. [8]

2.1.2.2. Pavimento Rígido

Este tipo de estructura está compuesta generalmente por una capa o losa de concreto hidráulico de 18 a 30 cm de espesor, soportada sobre una capa granular no tratada o estabilizada con cementantes hidráulicos. Debido al valor del módulo elástico elevado del concreto, los esfuerzos inducidos por el tráfico son esencialmente atenuados en flexión por la losa de concreto, y los esfuerzos de compresión se distribuyen en un área amplia y se transmiten al suelo en magnitudes muy pequeñas.^[8]

2.1.2.3.-Modulo Resiliente

El concepto de módulo resiliente, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable. Así pues, el concepto de módulo resiliente está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.^[8]

2.1.3.-Estructura de Pavimento

2.1.3.1.-Carpeta Asfáltica

La carpeta Asfáltica está conformada por una mezcla asfáltica producida con agregados pétreos de la región se coloca sobre la base, además de que se le agrega una cantidad de asfalto debiéndose buscar un contenido optimo, ya que este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tal que sea suficiente para resistir los efectos del tránsito y de la intemperie. Por lo general el valor de módulo resiliente (MR) ronda entre los 3000 MPa, el cual deberá ser corroborado en laboratorio mediante el protocolo de prueba ASTM D4123-82.^[4] Dicha prueba se ensayará a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 1 Hz. Figura 10



Figura 10.- Ensaye de módulo resiliente para mezclas asfálticas.

El asfalto utilizado para este proyecto será un Grado PG 76-22 según la Norma N·CTM·4·05·004/18.^[18] La Figura 11 muestra una amplia dispersión de resultados. El rango de valores oscila entre 2757 a 5630 MPa. Como se comentó anteriormente se utilizará un valor conservador de 3000 MPa para solventar las variaciones de rigidez de mezclas asfálticas.

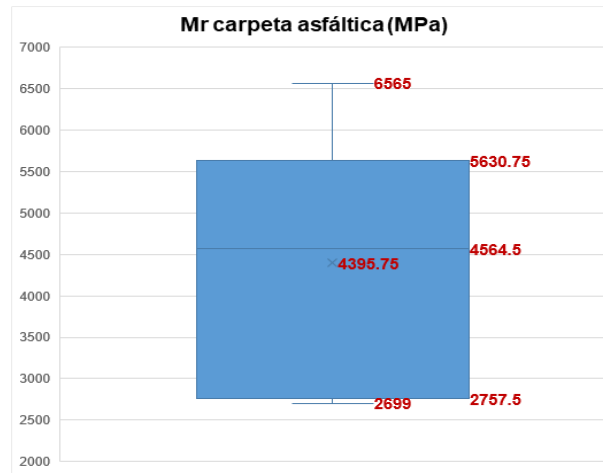


Figura 11.- Diagrama de caja y bigotes para los resultados de Módulo Resiliente Carpetas Asfáltica

2.1.3.2.- Base

La base es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta es colocada sobre ella porque la capacidad de carga del material friccionaste es baja en superficie por falta de confinamiento. Regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mantenimiento (estabilización) y además de transmitirlos de forma adecuada a las capas inferiores.

2.1.3.2.1.-Base Espumada

La capa de base espumada está conformada por la producción de asfalto espumado.

Para la base espumada la experiencia que se tiene en tramos de prueba de agencias de investigación y transporte en Estados Unidos propone un valor conservador de módulo resiliente (Mr) de 800 MPa el cual deberá ser obtenido bajo el mismo protocolo de prueba que la carpeta asfáltica ASTM D4123-82.^[4]

El Departamento de Transporte de Louisiana (Mohammad et al, 2003).^[20] llevó a cabo una investigación sobre el uso de bases estabilizadas con asfalto espumado con ciertos

contenidos de material recuperado (RAP), las cuales fueron usadas para construir pavimentos en tramos de prueba y verificación de desempeño.

Según los autores, para poder tener la certeza de un adecuado desempeño de las bases espumadas se sugiere considerar un porcentaje mayor al 3% de material que pasa la malla No. 200. En caso contrario recomiendan el uso de cemento Portland como material de filler. Sugieren tener una homogeneidad en las capas de apoyo (en este caso en la capa de subbase). En cuanto a los valores de módulos elásticos de estos materiales, se considerará un módulo resiliente conservador de 1200 MPa. Por condiciones de volúmenes de fresado que se utilizarán como RAP, se sugiere emplear una tasa de 60% de este material más el correspondiente de material de aporte (40%). Este aporte daría un incremento al valor del módulo elástico de la capa. Sin embargo y de forma conservadora se mantendrá el valor de 1200 MPa para estar del lado de la seguridad. Se sugiere llevar a cabo un diseño volumétrico de la base espumada considerando los valores de cohesión y ángulo de fricción mínimos recomendados en la literatura especializada.

2.1.3.2.1.1-Producción del Asfalto Espumado

La producción de asfalto espumado se logra mediante la inyección pequeña de agua y aire bajo una alta presión de asfalto caliente, por lo que el asfalto produce una espuma y su volumen original aumenta a un tamaño 20 veces mayor.^[26] Figura 12.

El termino de asfalto espumado se deriva de la acción de espumar ejercida por el asfalto.

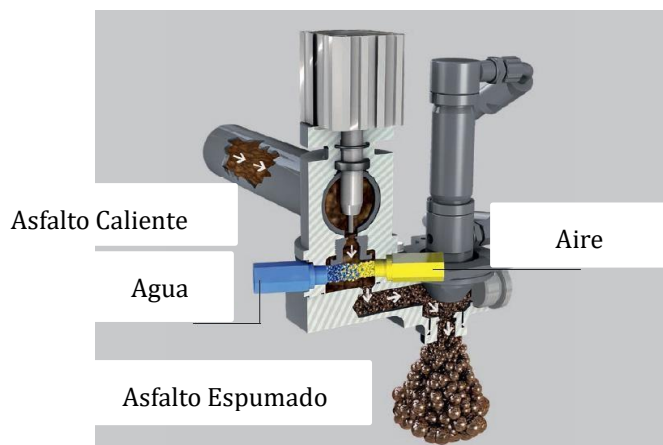


Figura 12.- Asfalto Espumado.^[26]

Una vez realizado el proceso de espumado, la espuma se añade a una tolva mezcladora la cual puede contener porcentajes variados de materiales reciclados RAP y Virgen e incluso se podría considerar hasta un 100% de material RAP dependiendo del diseño. Esta técnica permite elaborar base espumada de muy alto rendimiento, con procesos constructivos especializados de gran ahorro energético.

2.1.3.2.2.-Expansión

Es la razón entre el volumen de asfalto espumado y el volumen del asfalto original. La adherencia de expansión nos indica el manejo de la espuma, y su capacidad de adherencia y mezclado con los agregados.^[26]

2.1.3.2.3.- Vida Media

Es el tiempo, en segundos, que tarda el asfalto en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y entrega una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma.^[26]

2.1.3.3.- Subbase

La Subbase es la capa que se encuentra entre la base y la subrasante, es una de las capas localizada en la parte inferior del pavimento. Debido a que está sometida a menores esfuerzos que la base, su calidad puede ser inferior y generalmente está constituida por materiales locales granulares o marginales. El material que se coloca entre la subrasante y las losas de un pavimento rígido también se denomina subbase.

Para esta capa se recomienda utilizar agregados pétreos que cumplan con la calidad de la norma N.CMT.4.02.001/11.^[16] Se sugiere que el material tenga un valor mínimo de CBR de 60%, el cual equivale aproximadamente a un módulo resiliente de 280 Mpa, según el criterio del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

2.1.3.4.- Subrasante

La función de la Subrasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor sea la calidad del material de esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en los costos sin alterar la calidad.

El comportamiento de los suelos de subrasante tiene una gran influencia en los pavimentos porque sobre ellos descansan y reciben todas las cargas que son transmitidas por el mismo pavimento.

De acuerdo a los resultados encontrados en las pruebas de calidad de capas subrasantes para los sondeos tipo PCA en los cadenamientos 101+500 CD, 102+360 CD, 110+500 CD, 113+000 CD y 117+000 CI los valores resultantes del ensayo CBR no cumplen con el mínimo de 20% necesario para considerarse como capa subrasante expresados en la norma N CMT 1 03/02.^[14] Ya que el valor máximo encontrado fue de 16.9%.

Por tal motivo, se decidió analizar la alternativa de estabilizar la capa subrasante existente con óxido de calcio. La determinación del porcentaje mínimo necesario para estabilizar esa capa se realizó con el método gráfico expresado en la Norma AASHTO T 220, dando como resultado un 3% de adición de óxido de calcio en peso.

Para verificar el aumento en la capacidad de soporte de la capa, se realizaron ensayos de CBR al material mezclado con el óxido de calcio en el porcentaje determinado. Éstos se realizaron en los cadenamientos 101+440 CD, 101+500 CD, 102+360 CD, 104+530 CD, 107+230 CD, 110+500 CD, 113+000 CD, 114+500 CD, 116+600 CD y 117+000 CI. El promedio de estos resultados fue de 42 %, siendo el mínimo de 21% y el máximo de 72%. Tabla 2

Estos resultados sí cumplen con la norma N-CMT-1-04-19.^[15] Al comparar los resultados naturales, los cuales no cumplían como capa subrasante, con los resultados del suelo estabilizado, se decide utilizar la alternativa de estabilizar la capa al 3% de Oxido de Calcio en peso para que cumpla con los parámetros especificados para capas Subrasantes por la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CMT-1-04-19.^[15]

Tabla 2.- Calidad capa subrasante estabilizada con cal viva al 3%.

Ensayo No.	1380 TER/18	1417 TER/18	1386 TER/18	1418 TER/18	1392 TER/18	1419 TER/18	14-TER/19	15-TER/19	16-TER/19	17-TER/19	17A-TER/19	18-TER/19	18A-TER/19	19-TER/19		
Fecha de recibo	20181217	20181217	20181217	20181217	20181217	20181217	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	Norma	Especificación
Sondeo No.	1	1	3	3	5	5	1	2	3	6	6	7	7	8		
Carril	Derecho	Derecho	Izquierdo	Izquierdo	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho		
Estación Km	110+500	110+500	117+000	117+000	102+360	102+360	101+440	104+530	107+230	113+000	113+000	114+500	114+500	116+600		
Capa	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante		
Profundidad de Sondeo (cm)	0.41-0.72	0.41-0.72	0.33-0.58	0.33-0.58	0.34-0.58	0.34-0.58	0.35-0.59	0.38-0.76	0.38-0.68	0.375-0.68	0.375-0.68	0.305-0.61	0.305-0.61	0.36-0.70		
% DE CAL (OXIDO DE CALCIO)	Sin oxido de calcio	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	3.00%		
% de Compactación	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
Contenido de Agua en %	17.5	--	11.6	--	13.1	--	--	16.4	15	15.9	15.9	9	9	10		
CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL																
Tamaño máximo., mm	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	2"	1"	1"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	M.MMP. 4.01.003	76 mm máx
Pasa Malla Núm. 4	57	74.7	74	80.3	75	68.3	59.3	66.7	59.1	62	66.5	74	73.4	53.9	M.MMP. 4.01.003	--
Pasa Malla Núm. 40	31.1	37.5	46.1	46.6	53	46.1	49.1	49	40.1	52.2	56.2	53.7	54.8	39.2	M.MMP. 4.01.003	--
Pasa Malla Núm. 200	16.4	19.2	28.3	26	30	24	33.9	38.5	34	37.4	40.7	20.7	23.6	19.9	M.MMP. 4.01.003	--
Peso Volumetrico Sulto	1374	1394	1444	1484	1464	1504	1310	1344	1385	1351	1333	1545	1526	1463	M.MMP.1.06	Reportar
Peso Volumetrico Maximo	1795	1643	1900	1897	1910	1905	1900	1860	1837	1920	1867	1921	1863	1608	M.MMP.1.09	Reportar
Humedad Optima	20	22.7	13.5	14.9	11.5	14.5	13	14.9	16	14.2	13.2	12.9	14.5	14.8	M.MMP.1.09	Reportar
Limite Liquido, %	26.5	30	27.7	31.6	30.7	28.6	27.8	36.7	38	26.8	29.8	19.7	18.6	30.9	M.MMP.1.07	40 máx
Indice Plastico, %	7.5	10.7	10.7	6.5	11.1	7.7	N.P	11.4	N.P.	14.8	10.8	N.P.	N.P.	10.5	M.MMP.1.07	12 máx
Contracion Lineal, %	2.7	2.5	3.6	2.4	4.6	2.4	2.2	4	3	7.3	3.2	1.6	1	3.3	--	Reportar
Clasificacion SUCS	GM	SC	SC	SM	SC	SC	GM	CL	GM	GC	CL	SM	SM	GC	--	--
Valor de Soporte de California (CBR), %	15.9	21.5	14.6	44	15.9	72.7	45.8	31.9	35.3	6.2	28.4	16.9	41.7	35.4	M.MMP.1.11	20 mín
Expansión %	0	0	0.52	0.34	2.6	0	0	0	0	0.25	0.08	0.77	0	0	M.MMP.1.11	2 máx
ESTUDIO DE PAVIMENTO																
% de Compactación	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	100 ± 2
Huedad de prueba	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Valor Relativo de Soporte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
% de Compactación	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Humedad de Prueba	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Valor Relativo de Soporte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2.2.-Material Reciclable

El reciclaje de carpetas asfálticas, comúnmente llamado RAP (Recycling Asphalt Pavement), es una técnica que ha venido tomando fuerza en diferentes partes del mundo.

El material reciclado RAP, se obtiene en frío mediante el fresado de la carpeta asfáltica, y en algunos casos si es necesario se ocupa base asfáltica, dependerá del diseño y del espesor que se le quiera dar a la nueva estructura. [26]

El empleo del material RAP, aporta fuertes beneficios ambientales y económicos ya que se extrae menos volumen de material virgen.

El objetivo principal del uso de materiales reciclados es minimizar el impacto del ciclo de vida desde la extracción, producción y transporte del material virgen mediante la sustitución de la totalidad o fracción del volumen necesario. Diversos estudios han mostrado que la utilización de ciertos porcentajes de material reciclado o RAP (Reclaimed

Asphalt Pavement), puede contribuir a un mejor desempeño de la mezcla o bien mantener un comportamiento similar con relación al empleo de sólo materiales vírgenes. [26]

Las políticas del uso del RAP emitido por la Federal Highway Administration (FHWA) consideran los siguientes puntos:

- Los materiales pétreos reciclados son recursos viables de uso.
- El RAP debería ser la primera consideración de materiales disponibles.
- Considerar el RAP en fases tempranas de diseño y planeación.
- Los beneficios económicos se deben considerar en el empleo del RAP.
- La restricción del empleo del RAP debería ser técnicamente validado.
- El porcentaje de RAP en una nueva mezcla se ha incrementado con el paso de los años.

2.2.1.-Reciclaje en Frio

El reciclaje en frio constituye un procedimiento de construcción internacionalmente reconocido desde el punto de vista ecológico, económico y técnico, pues posee, por una parte, características de rapidez en su ejecución debido al avance tecnológico de las maquinas disponibles en la actualidad y, por otro lado, constituye significativamente en el manejo ambiental al reducir la explotación de banco de material.

2.2.2.-Tipos de Reciclaje de Pavimentos

Las técnicas que hacen posible el reciclaje de los pavimentos asfálticos se basan en dos tipos de procesos generales: en planta o in situ. A su vez, cada uno de estos sistemas puede clasificarse en dos categorías, de acuerdo con la temperatura bajo la cual se ejecute el procedimiento: en frio o en caliente. De esta forma, los procesos de reciclaje de pavimentos se sitúan dentro de los cuatro tipos que se señalan a continuación:

- Reciclaje en planta en caliente
- Reciclaje en vía (in situ) en caliente
- Reciclaje en planta en frio
- Reciclaje en vía (in situ) en frio

Para el caso presente será el reciclaje "in situ" en frío.^[26]

Tabla 3.- Principales ventajas de las técnicas de reciclado.

Principales Ventajas de las técnicas de reciclado	
Técnica de reciclado	Ventajas
Reciclado Superficial	Mejora la resistencia al deslizamiento
	Corrige las deficiencias de origen superficial
	Mejora el perfil geométrico de la calzada
	Permite eliminar la capa de restitución de gálibo en refuerzos del pavimento
Reciclado "IN SITU"	Mejora la resistencia al deslizamiento
	Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural
	Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural del pavimento
	Elimina temporalmente las fisuras reflejas
	Permite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales (6 a 7 cm) con deformaciones plásticas
Reciclado en Planta	Mejora el perfil geométrico de la calzada
	Refuerza estructuralmente al pavimento de acuerdo con las necesidades del proyecto
	Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural
	Produce mezclas asfálticas de mejor calidad
	Permite eliminar o corregir las capas intermedias de deficiente comportamiento
	Elimina las fisuras reflejadas
	Mejora la resistencia al deslizamiento
Corrige el perfil geométrico de la calzada	

2.2.2.1.-Reciclaje en Planta

El reciclaje en frío en planta comprende todas aquellas tareas o ejercicios que se llevan a cabo en un lugar predeterminado, acopio, en donde se almacenan los residuos provenientes de pavimentos asfálticos existentes demolidos y transportados hasta el sitio donde se producirá el nuevo material reciclado.^[26]

Como principales beneficios del reciclado en planta se tiene:

- Control de los materiales de entrada. El reciclado en planta permite obtener un producto final específico al mezclar distintos tipos de agregados. Dichos materiales

se pueden someter a ensayos en cualquier momento siendo posible cambiar la proporción de estos en la mezcla.

- Calidad del mezclado. Es posible realizar modificaciones en la operación de mezclado continuo para variar el tiempo en que el material es retenido dentro de la cámara de mezclado, cambiando la calidad de la mezcla.
- Posibilidades de acopio del material. Particularmente los materiales tratados con asfalto espumado, el producto obtenido puede ser almacenado y ser utilizado cuando sea requerido, y de ese modo evitar la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma.

2.2.2.2.-Receclado In Situ

El reciclaje de pavimentos en frío, "in situ", o en el mismo lugar, se realiza disgregando el material del firme antiguo que se recicla, mezclándolo in situ con el ligante o conglomerante utilizado y, posteriormente, extendiéndolo y compactándolo para constituir una capa del firme, es una técnica de rehabilitación de carreteras, que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de las capas del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría, etc.), pero que mezclados homogéneamente con un nuevo ligante (emulsión bituminosa) y ciertos porcentajes de agua y aditivos (cemento o cal), tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas del mismo pavimento. Esta técnica es generalmente utilizada en pavimentos viejos o con avanzado deterioro.^[26]

3.-Diseño de mezcla y estructura del pavimento con base espumada

Se considera a la presente investigación dentro del diseño metodológico descriptivo experimental, debido a las variables empleadas y desarrolladas en la investigación, que son a grandes rasgos:

Variable independiente, las características netamente estructurales de campo, existentes, las cuales no pueden ser alteradas para el estudio.

Variable independiente, las que dependen de las características de campo, es decir, el diseño de asfalto espumado, el cual conlleva parámetros que se calculan para un desempeño para definir la estructura de pavimentos.

3.1.-Tránsito y Clima Libramiento Ciudad Valles-Tamuín

Para poder revisar estructuralmente los pavimentos que comprenden este corredor vial se necesitan conocer ciertos insumos como lo es lo concerniente al tránsito y las características particulares del medio ambiente como la temperatura y la lluvia.

3.1.1.-Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y Configuración Vehicular Libramiento Ciudad Valles-Tamuín

A continuación, se detallan los criterios empleados para definir el tránsito en el subtramo del km 100+000 al km 118+640 (A2).

- Subtramo km 100+000 al km 118+640 (A2). Para este subtramo se utilizará la información actualizada. La Tabla 4, muestra los aforos ponderados del tramo en estudio, para cada mes del año 2022 y a su vez el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA).

Tabla 4.- Aforo Vehicular para el Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín, tramo km 100+000 al km 118+640

2022	MOTOS	TIPO A	TIPO B	TIPO C	TOTAL	TDPA
ENERO	513	46,138	2,078	23,901	72,630	1,748
FEBRERO	514	36,109	1,605	21,803	60,031	1,592
MARZO	622	42,435	1,934	23,294	68,285	1,638
ABRIL	667	69,127	2,792	22,186	94,772	2,335
MAYO	687	43,826	2,283	23,217	70,013	1,703
JUNIO	646	42,996	2,056	20,125	65,823	1,643
JULIO	603	69,868	2,778	22,267	95,516	2,299
AGOSTO	525	59,549	2,664	23,367	86,105	2,099
SEPTIEMBRE	429	39,710	1,972	22,137	64,248	1,621
OCTUBRE	485	37,676	1,995	23,223	63,379	1,539
NOVIEMBRE	587	45,527	2,302	21,834	70,250	1,733
DICIEMBRE	542	58,942	2,457	23,276	85,217	2,032
T O T A L	6,820	591,903	26,916	270,630	896,269	1,832

Para fines del proyecto ejecutivo de diseño de espesores del pavimento, se considerarán 1832 vehículos en ambos sentidos. La Tabla 5, muestra la configuración vehicular mensual para el año 2022 del Libramiento Ciudad Valles-Tamuín en subtramo II. El promedio mensual se utilizará para la configuración vehicular, misma que se observa en la Figura 13.

Tabla 5.- Configuración vehicular mensual y promedio segmento II, Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.

MES	CONFIGURACIÓN VEHICULAR (2022)										
	A	B2	B3	C2	C3	C4	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R2	T3-S2-R3	T3-S2-R4
ENE	59.2	1.4	1.2	3.6	5.6	0.7	13.1	5.2	0.5	0.1	9.4
FEB	55.3	1.3	1.0	3.6	6.1	0.9	13.7	5.3	0.5	0.2	12.1
MAR	57.4	1.3	1.1	3.8	5.6	0.7	12.9	4.4	0.5	0.2	12.1
ABR	69.3	1.4	1.3	2.6	3.7	0.6	8.9	3.5	0.2	0.1	8.5
MAY	58.0	1.6	1.3	4.1	4.8	0.8	13.7	4.7	0.3	0.1	10.6
JUN	60.7	1.5	1.2	4.0	4.4	0.7	12.9	4.1	0.3	0.1	10.0
JUL	69.2	1.5	1.1	3.0	3.3	0.6	9.9	3.4	0.1	0.1	7.8
AGO	64.7	1.6	1.2	3.1	3.5	0.6	11.0	4.0	0.2	0.1	10.0
SEP	56.4	1.4	1.2	3.8	4.4	0.8	14.7	4.3	0.3	0.1	12.6
OCT	54.2	1.5	1.3	4.4	5.8	0.9	14.9	4.5	0.2	0.2	12.2
NOV	60.0	1.6	1.3	3.9	5.0	0.7	13.1	3.8	0.3	0.1	10.2
DIC	65.3	1.4	1.2	3.3	4.3	0.6	10.5	3.9	0.3	0.1	9.0
Promedio	60.8	1.5	1.2	3.6	4.7	0.7	12.4	4.2	0.3	0.1	10.4

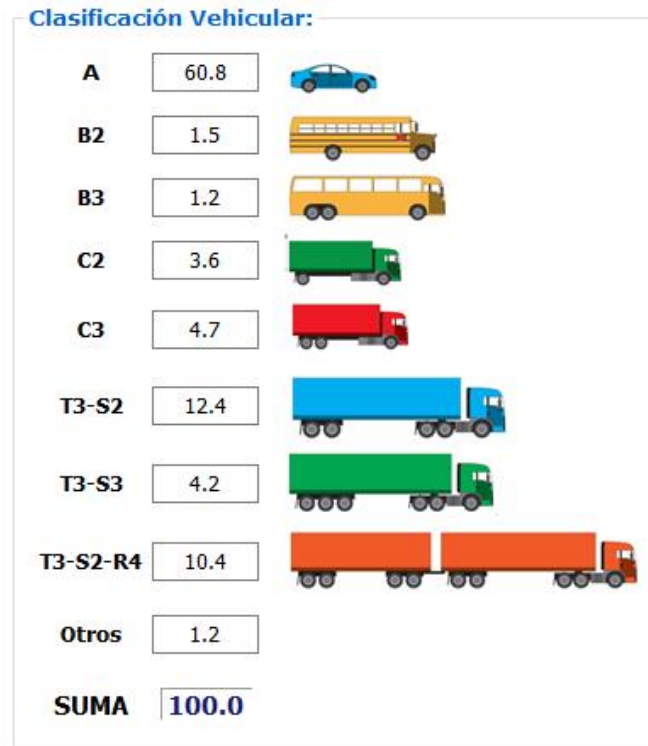


Figura 13.- Configuración Vehicular 2019 empleada en el Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín, tramo km 100+000 al km 118+640. (Elaboración propia).

3.1.2.-Cálculo de la Tasa de Crecimiento Libramiento Ciudad Valles-Tamuín

Una vez obtenido el TDPA, se procede a calcular las tasas de crecimiento mediante las series históricas del mismo. Para obtener la tasa de crecimiento anual se procedió a aplicar la regresión lineal mediante el Método de Mínimos Cuadrados (MMC), donde se aplicó las ecuaciones (1) (2) (3) y (4).

$$\text{TDPA} = a_0 + a_1 (A) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{(\sum \text{TDPA})(\sum A^2) - (\sum A)(\sum A * \text{TDPA})}{N (\sum A^2) - (\sum A)^2} \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{N * (\sum A * \text{TDPA}) - (\sum A)(\sum \text{TDPA})}{N (\sum A^2) - (\sum A)^2} \quad (3)$$

$$i = \frac{N * (a_1)}{(\sum \text{TDPA}) - (a_1)(\sum A)} \quad (4)$$

En donde:

$\sum \text{TDPA}$ = sumatoria de TDPA de todos los años considerados.

$\sum A^2$ = sumatoria de cada año elevado al cuadrado.

$\sum A$ = sumatoria de los años.

$\sum A * \text{TDPA}$ = sumatoria del producto del año con su respectivo TDPA.

$(\sum A)^2$ = sumatoria total de los años y elevado al cuadrado.

a_0 = Constante de la curva de regresión (intersección con eje TDPA).

a_1 = Constante de la curva de regresión (pendiente).

N = número total de años considerados en el análisis.

i = Tasa de crecimiento (%).

Para este proyecto carretero, se sustituirá el porcentaje de vehículos pesados por el TDPA. Lo anterior se debe a que los vehículos pesados representan las condiciones más críticas en la evaluación estructural y diseño de los pavimentos. Por tal motivo, se construyó la serie histórica con los datos del año 2021 y 2022. En la Tabla 6, se muestra la obtención de los parámetros a_1 y a_2 , así como la tasa de crecimiento en decimal y en porcentaje (casillas

sombreadas en amarillo). Para este proyecto se utilizará una tasa de crecimiento de 5.9%. Esta tasa de crecimiento se recomienda utilizarla tanto en el subtramo del km 100+000 al km 118+640.

Tabla 6.- Obtención tasa de crecimiento segmento II Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.

Mínimos cuadrados				
Año	A	%Pesados	A ²	(A)(Pesados)
2021	1	29.24	1	29.24
2022	2	30.86	4	61.72
Σ	3	60.1	5	90.96
$(\Sigma)^2$	9			
a0 =	27.620		i =	0.0587
a1 =	1.620		i =	5.865 %
			i =	5.9 %

En la Figura 14 se muestra la serie histórica de vehículos pesados para la obtención de la tasa de crecimiento del proyecto del Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.

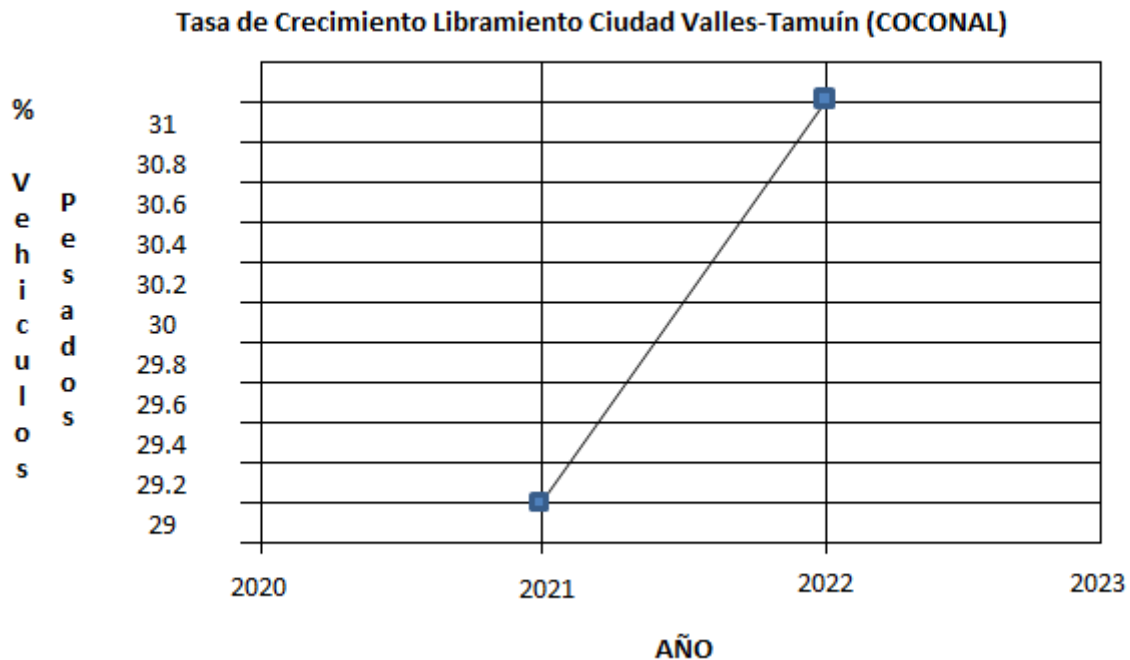


Figura 14.- Histórico de vehículos pesados para la obtención de la tasa de crecimiento Libramiento Ciudad Valles-Tamuín. (Elaboración propia).

A manera de resumen se muestran los resultados de tránsito para ambos subtramos en la Tabla 7.

Tabla 7.- Resumen de información de tránsito por subtramo.

Subtramo	Km 100+000 al km 118+640 (A2)
TDPA	1832
Factor sentido	0.5
Factor carril	1.0
TDPA (proyecto)	916
Tasa de crecimiento	5.9%
Periodo de análisis	20 años
Configuración vehicular	Ver Figura 13

La Tabla 8, muestra la obtención de los ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALS) para ambos subtramos mediante el método AASHTO 93. [2] Para el subtramo del km 100+000 al km 118+640 se tienen 17.2 millones de ESALS (20 años).

Tabla 8.- Cálculo de los ejes sencillo equivalentes duales (ESALS) para subtramo del km 100+000 al km 118+640.

Carretera:		Libramiento Ciudad Valles-Tamuín		TDPA =	1,832	CD =	0.50
Tramo	II			n (años)	20	CC =	1.00
km:	100+000 al km 118+640			r =	0.059	Pt=	2.50
Origen:				SN =	4.41	F. crecim. =	36.39
Tipo de camión	Comp. Vehic.	Porcentaje cargado/vacio		Tráfico presente	Coefficiente Esal	Esal's anuales	Esal's de diseño
A2	0.608	Cargado	1.00	203,279	0.0008	159	5,795
		Vacio	0.00	0	0.0004	0	0
A'2	0.000	Cargado	1.00	0	0.0605	0	0
		Vacio	0.00	0	0.0017	0	0
B2	0.015	Cargado	0.80	4,012	3.5540	14,259	518,924
		Vacio	0.20	1,003	0.6106	612	22,290
B3	0.012	Cargado	0.80	3,210	3.2315	10,372	377,460
		Vacio	0.20	802	0.1725	138	5,039
B4	0.000	Cargado	0.80	0	3.1367	0	0
		Vacio	0.20	0	0.1179	0	0
C2	0.036	Cargado	0.80	9,629	3.5540	34,222	1,245,418
		Vacio	0.20	2,407	0.0649	156	5,683
C3	0.047	Cargado	0.80	12,571	3.2315	40,623	1,478,384
		Vacio	0.20	3,143	0.0814	256	9,308
C2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	7.8398	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0743	0	0

C2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	130.3392	0	0
		Vacio	0.20	0	51.3041	0	0
C3 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	7.5172	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0908	0	0
C3 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	7.4361	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0884	0	0
T2 - S1	0.000	Cargado	0.80	0	5.6969	0	0
		Vacio	0.20	0	0.1045	0	0
T2 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	5.6158	0	0
		Vacio	0.20	0	0.1195	0	0
T3 - S2	0.124	Cargado	0.80	33,167	5.2932	175,559	6,389,031
		Vacio	0.20	8,292	0.0842	699	25,422
T3 - S3	0.042	Cargado	0.80	11,234	4.5518	51,134	1,860,916
		Vacio	0.20	2,808	0.0818	230	8,356
T2 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	9.9827	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0913	0	0
T3 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	9.6601	0	0
		Vacio	0.20	0	0.1035	0	0
T3 - S2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.1134	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0964	0	0
T3 - S2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	6.1711	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0925	0	0
T3 - S2 - R4	0.116	Cargado	0.80	31,027	4.7140	146,260	5,322,793
		Vacio	0.20	7,757	0.0878	681	24,771
T3 - S3 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	4.1936	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0847	0	0
Totales				334,340		475,360	17,299,588

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en su plataforma de diseño que se comentará y detallará más adelante en este documento, distintos escenarios de sobrecarga derivados de la experiencia de años de medición dinámica en todos los corredores de nuestro país. Estos escenarios de sobrecarga son: carga legal, ligera sobrecarga, alta sobrecarga, muy alta sobrecarga y especial (datos obtenidos de pesajes dinámicos reales WIM). En la Figura 15 se muestra un ejemplo de espectros de carga considerados por el IMT.

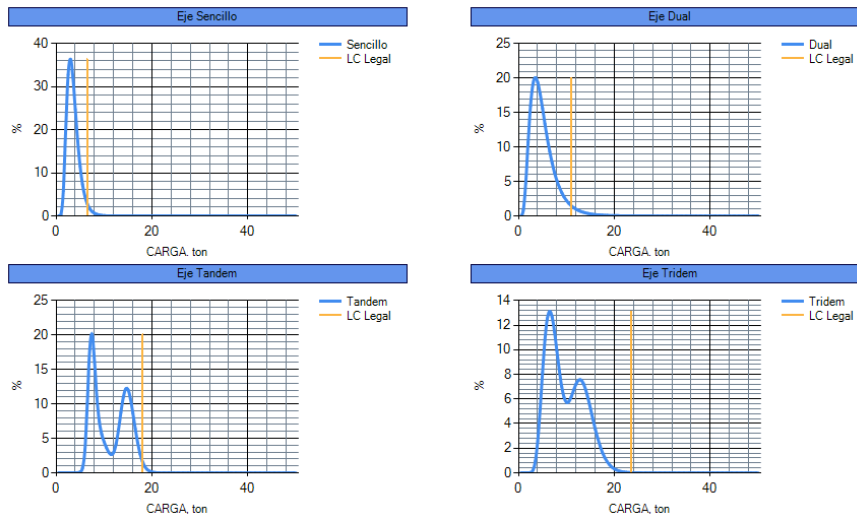


Figura 15.- Espectros de carga considerados para la revisión del pavimento con programa IMT PAVE 3.0. [6] (Fuente: IMT)

3.2.-Clima en Libramiento Ciudad Valles-Tamuín

Para la revisión de las estructuras de pavimento y rediseño de las mismas mediante métodos empíricos-mecanicistas, es necesario conocer la temperatura media mensual en la zona donde se desarrolla el corredor carretero. El objeto de determinar la temperatura media mensual se debe al comportamiento que tienen los materiales asfálticos (carpetas densas, bases negras, etc.), los cuales son altamente susceptibles a la temperatura. El programa IMT PAVE 3.0 (se detalla más adelante) permite hacer un análisis más realista del comportamiento o campo de esfuerzos y deformaciones de estos materiales de manera mensual, es decir cuando están sujetos a distintos gradientes de temperatura. [6]

Para ello se utiliza la base de datos "Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC CLICOM)" de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). En la Tabla 9 se muestran 5 estaciones representativas cercanas al proyecto del Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín. De las 5 se obtiene un valor promedio que es representativo para todo el proyecto y es el utilizado posteriormente en el análisis del rediseño del pavimento en el programa IMT PAVE 3.0. [6] Figura 16.

Esta variabilidad permite hacer análisis aleatorios de desempeño del pavimento, es decir se utiliza un método no determinista y más preciso.

Tabla 9.- Temperatura Media mensual estaciones cercanas al Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín (km 100+000 al km 118+640). Fuente ERIC CLICOM

	Cd. Valles (24012)	Tamuín (24139)	Ébano (24015)	Las Adjuntas Tamuín (24036)	Rayón (24060)	Promedio
Mes/Tem. Med. Men	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	
Enero	14	14.5	15.5	14.9	11.5	14.1
Febrero	15.6	16	16.9	16.1	12.4	15.4
Marzo	18.7	19.1	19.9	19.5	15.3	18.5
Abril	22.1	22.1	22.9	22.8	18.5	21.7
Mayo	24.4	24.9	25.5	25.7	20.8	24.3
Junio	25.4	26	26.4	26.9	21.5	25.2
Julio	24.5	25.5	25.9	26.1	20.4	24.5
Agosto	24.2	25.1	25.7	25.7	20.1	24.2
Septiembre	23.2	24	24.7	24.7	19.1	23.1
Octubre	20.4	21.5	22.5	22.1	16.9	20.7
Noviembre	18.1	18.4	19.6	18.9	14.3	17.9
Diciembre	14.8	15.7	16.9	16	12.2	15.1

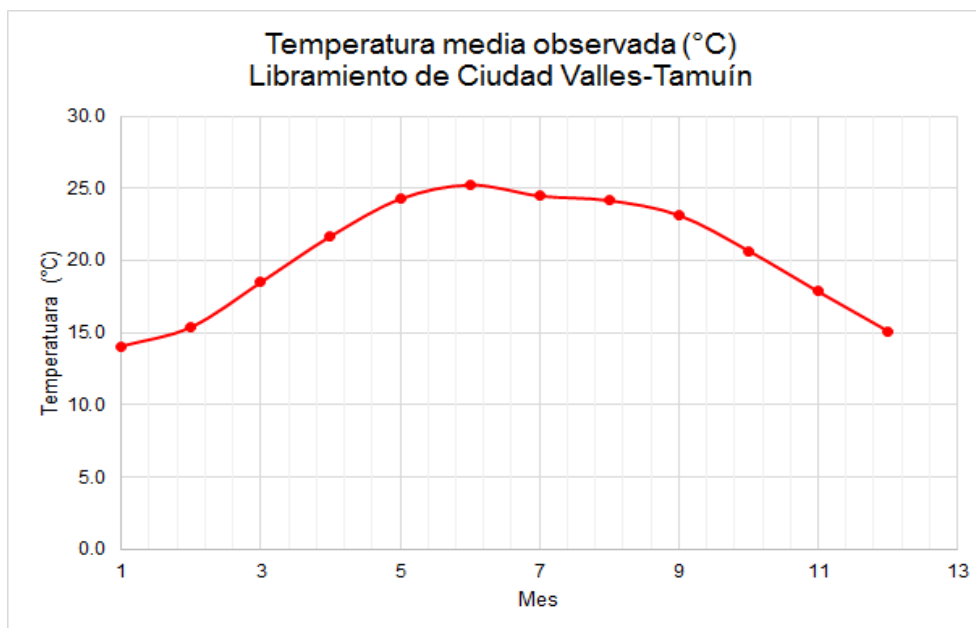


Figura 16.- Temperatura media mensual Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín (km 100+000 al km 118+300) (Elaboración propia).

En las hojas de Excel anexas a este documento se muestran los cálculos correspondientes al clima descrito en este apartado.

3.3.-Calidades del Material del Pavimento

Para las calidades de las capas del pavimento, se llevaron a cabo calas y sondeos sobre los acotamientos del sentido ascendente y descendente del Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín. En la Figura 17, se muestran los puntos donde se obtuvieron las muestras de cada una de las capas del pavimento, mismas que se comentan más adelante en este documento técnico.

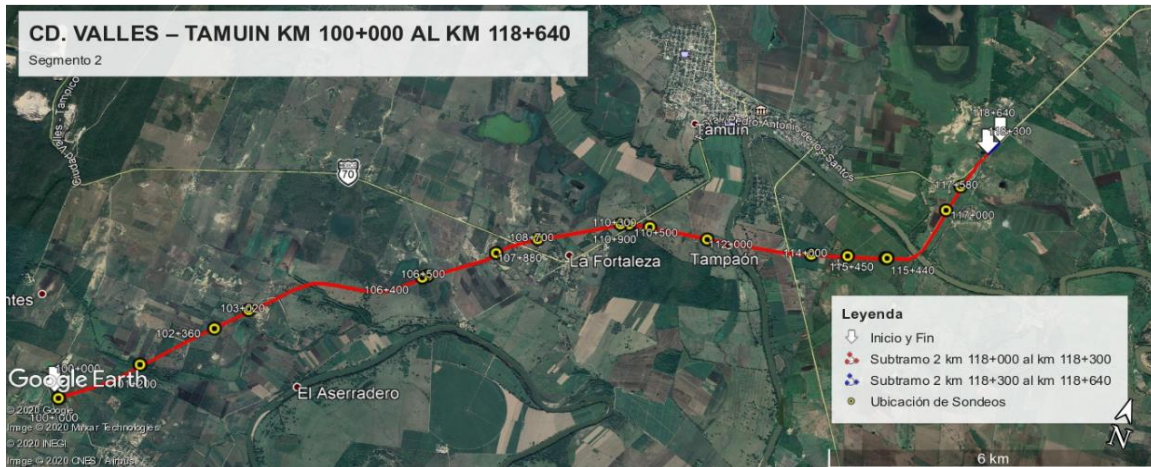


Figura 17.- Localización de los sondeos para determinar calidades capas de los pavimentos, tramo II Libramiento Ciudad Valles-Tamuín. (Elaboración propia).

En la Figura 18 y 19, se realiza la extracción de muestras con bronca de 4 pulgadas. La Figura 20, muestra el detalle de las muestras obtenidas: capas CASAA, capeta asfáltica y bases cementada.



Figura 18.- Realización de calas y sondeos en el acotamiento del km 101+000 del Libramiento Ciudad Valles-Tamuín.



Figura 19.- Detalle de extracción de muestras con broca de 4 pulgadas sobre acotamiento km 101+000 del Libramiento de Ciudad Valles-Tamuín.



Figura 20.- Detalle de muestra extraída de sondeo: CASAA, carpeta asfáltica y porción de base cementada

La Tabla 10, muestra los resultados de calidad hechos a cada uno de los sondeos en el terraplén.

De acuerdo a la normativa N.CMT.1.01/02.^[12] de la SCT se tiene lo siguiente:

- Para el límite líquido la norma contempla un valor máximo de 50%. Para este estudio sólo se detectaron valores mayores en el km 108+300. El valor promedio de LL para todos los sondeos es de 38.1. Puede indicarse que se cumple con el valor de LL.
- Para el valor de expansión (Exp) la norma contempla un valor máximo de 5%. Para todos los sondeos no se encontraron valores por arriba de ese valor. El valor promedio es de 1.4%. Por lo que se cumple con el valor de expansión.

- Para el valor de CBR, lo norma contempla un valor mínimo de 5%. Para todos los sondeos se tienen valores por arriba del valor mínimo. El valor promedio de CBR es de 32.8%. Por lo tanto, se cumple con ese valor de CB

Tabla 10.- Calidades del terraplén Km 118+000 al Km 118+640.

SOND	CUER	KM.	% G	% A	% F	CBR	EXP.	LL	IP	CL	PV	PVM	HOPT
1	LD	101+440	32	52	16	21	1.4	37.4	12.8	2.7	1326.0	1822.0	14.6
2	LD	115+450	37	45	18.0	19	1.4	39.3	13.7	2.8	1327	1788	14.1
3	LD	114+000	46	37	17.0	31	1.1	37.8	12.6	2.6	1348	1780	15.2
4	LD	110+300	47	38	15.0	27	1.1	36.2	11.6	2.3	1377	1854	13.2
5	LI	108+600	0	37	63.0	9	3.6	58.6	20.3	-	1055	1536	18.9
6	LI	106+500	9	80	11.0	85	0	22.3	NP	2.2	1355	1596	10.3
7	LI	112+000	46	40	14.0	32	1.2	38.3	12.7	2.7	1366	1795	13.6
8	LI	100+000	37	37	26.0	38	1.3	34.5	9.9	2.1	1366	1875	15.3
		Valor Máx.	47	80	63.0	85	3.6	58.6	20.3	2.8	1377	1875	18.9
		Valor Mín.	0	37	11.0	9	0	22.3	9.9	2.1	1055	1536	10.3
		Valor Med.	32	46	22.5	32.8	1.4	38.1	13.4	2.5	1315.0	1755.8	14.4
		Desv. Estandar	17.81	14.81	16.93	22.95	1.00	9.92	3.28	0.28	106.64	122.62	2.41
		Coef. de Variación	56.08	32.37	75.24	70.06	72.22	26.06	24.55	11.24	8.11	6.98	16.75

Donde:

% G = Porcentaje de gravas

% A = Porcentaje de arenas

% F = Porcentaje de finos

CBR = Valor de Soporte de California

Exp = Expansión

LL = Límite Líquido

IP = Índice Plástico

CL = Contracción Lineal

PV = Peso volumétrico

PVM = Peso Volumétrico Máximo

H. Opt = Humedad Óptima

LD = Lado derecho

LI = Lado izquierdo

De lo anterior podemos concluir que la capa de terraplén no necesita una intervención completa. Por lo tanto, los terraplenes del segmento II del Libramiento Ciudad Valles-Tamuín del km 100+000 al km 118+640 cumplen en cuanto a capacidad estructural, estabilidad, asentamientos y calidad.

La Tabla 11, muestra los resultados de calidad hechos a cada uno de los sondeos para la subyacente del km 100+000 al km 118+640.

De acuerdo a la normativa N.CMT.1.02/02 ^[13] de la SCT se tiene lo siguiente:

- Para el límite líquido la norma contempla un valor máximo de 50%. Para este estudio no se detectaron valores mayores al máximo. El valor promedio de LL para todos los sondeos es de 32.5. Puede indicarse que se cumple con el valor de LL.
- Para el valor de expansión (Exp) la norma contempla un valor máximo de 3%. Para todos los sondeos no se encontraron valores por arriba de ese valor. El valor promedio es de 1.6%. Por lo que se cumple con el valor de expansión.
- Para el valor de CBR, la norma contempla un valor mínimo de 10%. Salvo en el km 110+500, en todos los sondeos se tienen valores por arriba del valor mínimo. El valor promedio de CBR es de 26.4%. Por lo tanto, se cumple con ese valor de CBR.

Tabla 11.- Calidades capa de subyacente Km 118+000 al Km 118+640.

Sondeo	KM.	% G	% A	% F	CBR	EXP.	LL	IP	CL	PV	PVM	H. OPT.	H. NAT.	% COMP.
LD	100+000	19	4.4	17	41.0	1.30	23.0	10.3	3.5	1345	1822	16.2	16.5	96.1
LD	101+200	42	30	28	17.4	1.45	31.7	20.9	7.2	---	1915	13.5	11.6	97.9
LD	103+020	---	---	---	---	---	---	---	---	1383	1822	16.1	18.5	97.7
LD	106+400	27	68	5	70.9	1.56	36.1	NP	0.00	1225	1605	18.5	14.5	100.4
LD	106+500	32	44	24	18.0	1.80	43.2	18.9	3.7	1120	1556	18.3	20.3	97.7
LD	108+700	---	---	---	---	---	---	---	---	1145	1556	18.3	20.3	100.4
LD	110+300	---	---	---	---	---	---	---	---	1185	1586	18.5	19.5	96.8
LD	110+900	60	26	14	3.5	1.23	34.2	21.7	8.7	1384	1910	14.4	11.6	95.9
LD	112+000	4	35	11	36	2.10	32.5	8.0	3.1	1320	1785	16.3	---	95.9
LD	114+000	55	33	12	35	0.36	31.0	6.1	3.4	1305	1791	16.6	---	96.8
LD	114+700	26	41	33	62.1	0.41	25.4	5.9	2.7	1246	1905	15.6	15.8	93.3
LD	115+450	45	44	11	37	0.9	35.3	10.1	3.1	1320	1822	16.1	21.4	95.4
LD	117+580	41	45	14	28	1.7	38.8	14.0	2.7	1286	1796	16.4	5.3	96.8
LI	110+500	0	12.2	87.8	4.9	2.6	37.0	22.5	8.4	1355	1820	15.5	19.2	95.8
LI	114+000	45	43.0	12.0	16.4	1.6	31.4	11.5	3.3	1320	1765	16.6	13.9	97.3
LI	117+000	23.9	46.4	29.8	11.1	2.4	23.2	NP	0.0	1385	1750	19.5	14.9	97.1
LI	115+440	25.0	43.0	22.0	13.4	2.7	28.4	5.9	2.7	1286	1760	15.7	18.7	95.4
LI	102+360	40.0	40.0	20.0	13.1	1.8	33.3	14.7	5.7	1274	1990	12.0	13.1	94.8
LI	107+880	33.0	45.0	22	14.1	---	34.7	15.6	5.4	1276	1900	12.1	13.0	97.6
Valor mín.		0	4.4	5	3.5	0.36	23	5.9	0	1120	1556	12	5.3	93.3
Valor máx.		60	68	87.8	70.9	2.7	43.2	22.5	8.7	1385	1990	19.5	21.4	100.4
Promedio		32.4	37.5	22.7	26.4	1.6	32.5	13.3	4.0	1287	1782	16.1	15.8	96.8
Desv. Estándar		16.4	14.7	19.0	19.5	0.7	5.5	6.0	2.5	78.2	126.2	2.1	4.2	1.7

Donde:

% G = Porcentaje de gravas

% A = Porcentaje de arenas

% F = Porcentaje de finos

CBR = Valor de Soporte de California

Exp = Expansión

LL = Límite Líquido

IP = Índice Plástico

CL = Contracción Lineal

PV = Peso volumétrico

PVM = Peso Volumétrico Máximo

H. Opt = Humedad Óptima

H. Nat = Humedad natural

%Comp = Grado de compactación

LD = Lado derecho

LI = Lado izquierdo

De lo anterior se puede concluir que la capa de subyacente del km 100+000 al km 118+640 se encuentra en óptimas condiciones y no necesita una intervención completa.

La Tabla 12, muestra los resultados de calidad hechos a cada uno de los sondeos para la subyacente del km 118+000 al km 118+640.

De acuerdo a la normativa N.CMT.1.02/02^[13] de la SCT se tiene lo siguiente:

- Para el límite líquido la norma contempla un valor máximo de 50%. Para este estudio no se detectaron valores mayores al máximo. El valor promedio de LL para todos los sondeos es de 29.7. Puede indicarse que se cumple con el valor de LL.
- Para el valor de expansión (Exp) la norma contempla un valor máximo de 3%. Para todos los sondeos no se encontraron valores por arriba de ese valor. El valor promedio es de 1.5%. Por lo que se cumple con el valor de expansión.
- Para el valor de CBR, lo norma contempla un valor mínimo de 10%. En todos los sondeos se tienen valores por arriba del valor mínimo. El valor promedio de CBR es de 71.5%. Por lo tanto, se cumple con ese valor de CBR.

La Tabla 13 muestra los resultados de calidad hechos a cada uno de los sondeos para la subrasante del km 100+000 al km 118+640.

De acuerdo a la normativa N.CMT.1.03/02^[14] de la SCT se tiene lo siguiente:

- Para el límite líquido la norma contempla un valor máximo de 40%. Para este estudio sólo se detectó un valor mayor al máximo en el km 107+880. El valor promedio de LL para todos los sondeos es de 32. Puede indicarse que se cumple con el valor de LL.
- Para el valor de expansión (Exp) la norma contempla un valor máximo de 2%. Para todos los sondeos no se encontraron valores por arriba de ese valor. El valor promedio es de 1.0%. Por lo que se cumple con el valor de expansión.
- Para el índice plástico (IP) la norma contempla un valor máximo de 12%. Para los sondeos se encontraron valores por arriba de ese valor en el km 106+400 y en el km 110+900. El valor promedio es de 10.0%.
- Para el valor de CBR, lo norma contempla un valor mínimo de 20%. Salvo en el km 110+500, en todos los sondeos se tienen valores por arriba del valor mínimo. El valor promedio de CBR es de 46%. Por lo tanto, se cumple con ese valor de CBR.

Tabla 12.- Calidades capa de subyacente Km 110+000 al Km 117+580.

Sondeo	KM.	%	%	%	CBR	EXP.	LL	IP	CL	PV	PVM	H.	H.	%
		G	A	F								OPT.	NAT.	COMP.
1A	100+000	42	31	27	38	1.4	33.2	9.7	3.7	1385	1877	16.1	18.5	96.4
1	101+200	24	60	16	26.5	0.3	22.7	10.2	4	---	2020	10.5	8.6	93
2A	103+020	34.5	39	17	44	0.9	34.5	8.9	3.3	1372	1836	15.7	14.1	95.4
3A	106+400	51	25	24	32.4	1.2	32.3	17.9	7.2	---	1880	14	13.1	---
4A	106+500	29	58	13	39	1.05	39.1	6.5	3.1	1365	1886	15.3	13.6	---
2	108+600	44	45	11	49	0.8	30.6	5.3	2.3	1328	1840	15.2	15.9	96.3
5A	110+300	48	39	13	56	0.65	32.4	7.6	3.3	---	1790	18.2	---	---
3	110+900	63	24	13	37.5	0.9	32.4	20.3	7.8	---	1955	12.6	9.3	100
6A	112+000	51	40	9	45	0.75	34.2	9.6	3.4	---	1818	18.8	---	---
7A	114+000	56	30	14	38	0.6	35.2	10.3	3.7	---	1794	16.6	---	---
4	114+700	47	45	8	95.9	0.1	19.5	NP	0.5	---	2040	9.9	5.2	101.3
8A	115+450	54	31	15	35	1.05	33.5	10.3	3.7	---	1812	15.8	---	---
9A	117+580	46	36	18	41	1.2	31.2	6.9	2.9	---	1791	16.4	---	---
1 B	110+500	43	40.6	16.4	43	1.35	26.5	7.5	2.7	---	1795	20	17.5	94.7
2 B	114+400	57	31	13	37	1.2	31.6	7.3	2.8	---	1830	18.1	16.9	95.6
3 B	117+000	26	45.7	28.3	47	1.4	27.7	10.7	3.6	1444	1900	13.5	11.6	96.7
4 B	115+140	43	46	11	31.5	1.2	30.7	9.3	3.1	---	1920	17.5	19.5	98.4
5 B	102+360	25	45	30	95.9	1.4	30.7	11.1	4.6	---	1910	11.5	13.1	99.3
6 B	107+880	38	48	14	37.8	1.33	41.2	16.4	5.9	---	1895	14.1	10.9	97.1
Valor mín.		24	24	8	26.5	0.1	19.5	5.3	0.5	1328	1790	9.9	5.2	93
Valor máx.		63	60	30	95.9	1.4	41.2	20.3	7.8	1444	2040	20	19.5	101.3
Promedio		43	40	16	46	1	32	10	4	1379	1873	15	13	97
Desv. Estándar		11.38	9.93	6.43	18.89	0.38	5.02	4.02	1.67	42.15	73.88	2.79	4.07	2.36

Donde:

% G = Porcentaje de gravas

% A = Porcentaje de arenas

% F = Porcentaje de finos

CBR = Valor de Soporte de California

Exp = Expansión

LL = Límite Líquido

IP = Índice Plástico

CL = Contracción Lineal

PV = Peso volumétrico

PVM = Peso Volumétrico Máximo

H. Opt = Humedad Óptima

H. Nat = Humedad natural

%Comp = Grado de compactación

De lo anterior puede comentarse que hay zonas donde los índices plásticos (IP) son altos y se tienen suelos muy plásticos. Se concluye que en el km 100+000 al km 118+640 se debe de estabilizar con cal viva para generar una mejor capa de apoyo a la estructura del pavimento generando mayores valores de valor de soporte de California (CBR), mismos que permitan reducir los espesores del pavimento y no incrementar en demasía la rasante geométrica del proyecto.

La Tabla 13, muestra los resultados de calidad hechos a cada uno de los sondeos para la subrasante del km 118+000 al km 118+640.

De acuerdo con la normativa N.CMT.1.03/02 ^[14] de la SCT se tiene lo siguiente:

- Para el límite líquido la norma contempla un valor máximo de 40%. Para este estudio no se detectaron valores mayores al máximo. El valor promedio de LL para todos los sondeos es de 41.2. Puede indicarse que se cumple con el valor de LL.
- Para el valor de expansión (Exp) la norma contempla un valor máximo de 2%. Para todos los sondeos no se encontraron valores por arriba de ese valor. El valor promedio es de 1.4%. Por lo que se cumple con el valor de expansión.

- Para el índice plástico (IP) la norma contempla un valor máximo de 12%. Para todos los sondeos no se encontraron valores por arriba de ese valor. El valor promedio es de 10.32%. Por lo que se cumple con el valor de expansión.
- Para el valor de CBR, lo norma contempla un valor mínimo de 20%. Salvo en el km 110+500, en todos los sondeos se tienen valores por arriba del valor mínimo. El valor promedio de CBR es de 26.4%. Por lo tanto, se cumple con ese valor de CBR.

Tabla 13.- Calidades capa de subrasante Km 118+000 al Km 118+640.

Ensaye No.	1380 TER/18	1417 TER/18	1386 TER/18	1418 TER/18	1392 TER/18	1419 TER/18	14-TER/19	15-TER/19	16-TER/19	17-TER/19	17A-TER/19	18-TER/19	18A-TER/19	19-TER/19		
Fecha de recibo	20181217	20181217	20181217	20181217	20181217	20181217	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	20190118	Norma	Especificación
Sondeo No.	1	1	3	3	5	5	1	2	3	6	6	7	7	8		
Carril	Derecho	Derecho	Izquierdo	Izquierdo	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho	Derecho		
Estación Km	110+500	110+500	117+000	117+000	102+360	102+360	101+440	104+530	107+230	113+000	113+000	114+500	114+500	116+600		
Capa	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante	Subrasante		
Profundidad de Sondeo (cm)	0.41-0.72	0.41-0.72	0.33-0.58	0.33-0.58	0.34-0.58	0.34-0.58	0.35-0.59	0.38-0.76	0.38-0.68	0.375-0.68	0.375-0.68	0.305-0.61	0.305-0.61	0.36-0.70		
% DE CAL (OXIDO DE CALCIO)	Sin oxido de calcio	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	Sin oxido de calcio	3.00%	3.00%		
% de Compactación	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
Contenido de Agua en %	17.5	--	11.6	--	13.1	--	--	16.4	15	15.9	15.9	9	9	10		
CARACTERISTICAS DEL MATERIAL																
Tamaño máximo., mm	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	2"	1"	1"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	M.MMP. 4.01.003	76 mm máx
Pasa Malla Núm. 4	57	74.7	74	80.3	75	68.3	59.3	66.7	59.1	62	66.5	74	73.4	53.9	M.MMP. 4.01.003	--
Pasa Malla Núm. 40	31.1	37.5	46.1	46.6	53	46.1	49.1	49	40.1	52.2	56.2	53.7	54.8	39.2	M.MMP. 4.01.003	--
Pasa Malla Núm. 200	16.4	19.2	28.3	26	30	24	33.9	38.5	34	37.4	40.7	20.7	23.6	19.9	M.MMP. 4.01.003	--
Peso Volumetrico Sulto	1374	1394	1444	1484	1464	1504	1310	1344	1385	1351	1333	1545	1526	1463	M.MMP.1.06	Reportar
Peso Volumetrico Maximo	1795	1643	1900	1897	1910	1905	1900	1860	1837	1920	1867	1921	1863	1608	M.MMP.1.09	Reportar
Humedad Optima	20	22.7	13.5	14.9	11.5	14.5	13	14.9	16	14.2	13.2	12.9	14.5	14.8	M.MMP.1.09	Reportar
Límite Líquido, %	26.5	30	27.7	31.6	30.7	28.6	27.8	36.7	38	26.8	29.8	19.7	18.6	30.9	M.MMP.1.07	40 máx
Índice Plástico, %	7.5	10.7	10.7	6.5	11.1	7.7	N.P	11.4	N.P.	14.8	10.8	N.P.	N.P.	10.5	M.MMP.1.07	12 máx
Contracción Lineal, %	2.7	2.5	3.6	2.4	4.6	2.4	2.2	4	3	7.3	3.2	1.6	1	3.3	--	Reportar
Clasificación SUCS	GM	SC	SC	SM	SC	SC	GM	CL	GM	GC	CL	SM	SM	GC	--	--
Valor de Soporte de California (CBR), %	15.9	21.5	14.6	44	15.9	72.7	45.8	31.9	35.3	6.2	28.4	16.9	41.7	35.4	M.MMP.1.11	20 mín
Expansión %	0	0	0.52	0.34	2.6	0	0	0	0	0.25	0.08	0.77	0	0	M.MMP.1.11	2 máx
ESTUDIO DE PAVIMENTO																
% de Compactación	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	100 ± 2
Humedad de prueba	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Valor Relativo de Soporte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
% de Compactación	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Humedad de Prueba	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Valor Relativo de Soporte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

La Tabla 14, muestra los resultados de calidad hechos a cada uno de los sondeos para la capa de RoadCem del km 118+000 al km 118+640.

De acuerdo con la normativa N.CMT.4.02.001/16 ^[17] para bases tratadas de la SCT se tiene lo siguiente:

- De acuerdo con los resultados en la capa RoadCem los valores resultantes del ensayo CBR no cumplen con el mínimo 60% necesario. El valor mínimo encontrado fue de 6.5%, existen tres muestras más que están por debajo de lo establecido por la norma antes mencionada.

- En cuanto a los resultados de limite liquido la mayoría de los ensayos no cumplen con el máximo 25% el valor máximo encontrado es de 43.2% necesario para considerarse que existe alta plasticidad en los materiales de esta capa expresados en la norma antes mencionada.

Tabla 14.- Calidades capa de RoadCem km 118+000 al km 118+640.

Sond	Km.	% G	% A	% F	CBR	EXP.	LL	IP	CL	PVS S	PVM	H. OPT	H. NAT	% COMP.	EA
1 A	100+000	0	84	16	75	---	28.6	NP	NA	1222	1844	9.8	21.5	98.4	44
1	101+200	33	55	12	81	---	29.3	NP	1.3	1244	1670	20.6	20.0	99.6	56
2 A	103+020	0	82	18	78	---	26.8	NP	NA	1244	1866	9.4	23.5	95.8	46
3 A	106+400	53	38	9	77	---	43.2	6.1	2.4	1236	1595	23.5	20.2	100.3	53
4 A	106+500	0	89	11	72	---	29.3	NP	NA	1415	1862	9.9	23.5	98.6	50
2	108+600	37	55	11	77	---	25.6	NP	NA	1132	1796	10.0	11.5	100.6	53
5 A	110+300	37	56	10	81	---	22.1	NP	NA	1377	1875	10.8	7.0	97.4	51
3	110+900	64	30	6.6	78	---	38.7	NP	1.8	1414	1650	20.4	17.0	105.6	63
6 A	112+000	41	52	7	85	---	24.2	NP	NA	1366	1872	10.1	6.3	99.6	56
7 A	114+000	38	54	8	88	---	21.7	NP	NA	1371	1874	9.8	6.2	98.7	57
4	114+700	51	28	21.4	94	0.40	35.4	11.6	3.1	1414	1600	24.6	20.9	95.8	17.0
8 A	115+450	42	48	10	82	---	21.9	NP	NA	1362	1896	10.4	6.4	96.7	61.0
9 A	117+580	40	49	11	93	---	22.3	NP	NA	1355	1887	9.7	5.3	98.8	51.0
1 B	110+500	23.5	16.5	60.1	6.5	---	40.9	23.0	9.1	1220	1760	17.5	17.1	99.3	7.6
2 B	114+000	5	5.6	3.9	11.4	0.6	34.5	26.2	9.7	1245	1720	15.7	12.0	98.7	16.8
3 B	117+000	47.4	46.4	6.2	62	---	19.0	NP	0.0	1475	2320	7.0	4.6	99.7	58.0
4 B	115+440	35.0	44.0	21.0	40.1	0.4	31.0	7.1	2.6	1145	1690	26.2	30.3	99.0	40.0
5 B	102+360	48.3	39.5	12.2	61.2	---	35.9	6.8	2.5	1210	1670	24.0	23.2	99.0	46.0
6 B	115+880	49	31.0	10.0	43.6	---	30.6	7.8	2.8	1195	1740	20.7	13.8	99.0	39.0
Valor mín.		0	5.6	3.9	6.5	0.4	19	6.1	0	1132	1595	7	4.6	95.8	7.6
Valor máx.		64	89	60.1	94	0.6	43.2	26.2	9.7	1475	2320	26.2	30.3	110.3	63
Promedio		33.9 1	47.5 3	13.9 2	67.4 1	0.47	29.53	12.66	3.5 3	1297	1799	15.2 7	15.2 8	99.51	46
Desv. Estándar		19.3 8	21.5 2	12.1 5	25.0 8	0.12	7.05	8.4 0	3.2 2	102	163	6.50	7.81	3.33	16

Donde:

% G = Porcentaje de gravas

% A = Porcentaje de arenas

% F = Porcentaje de finos

CBR = Valor de Soporte de California

Exp = Expansión

LL = Límite Líquido

IP = Índice Plástico

CL = Contracción Lineal

PV = Peso volumétrico

PVM = Peso Volumétrico Máximo

H. Opt = Humedad Óptima

H. Nat = Humedad natural

%Comp = Grado de compactación

De lo anterior puede concluirse que actualmente se presenta una falla estructural por falta de capacidad y espesor, fundamentalmente en esta capa con PowerCem, situación que provoca que se tengan variaciones en la capacidad estructural, teniendo como resultado el fenómeno de fatiga en las capas estabilizadas con asfalto y por ende presencia de fallas en capa de rodamiento; favoreciendo la entrada de agua a las capas inferiores y por consiguiente baches aislados de forma continua.

La Tabla 15, muestran los resultados hechos a muestras o corazones de carpetas asfálticas hechas en el lugar.

Tabla 15.- Calidades Carpeta Asfáltica Km 118+000 al Km 118+640.

Sondeo	KM.	% G	% A	% F	% ASF.	F/A	MR-MPa
1	101+200 LD	36	50	4.3	5.47	0.62	2959
2	106+400 LI	33	62	4.8	5.0	0.96	3025
3	110+900 LD	43	51	6.2	5.56	1.16	3898
4	114+700 LI	48	49	3.7	5.04	0.73	4111
Valor mín.		33	49	3.7	5.0	0.62	2959
Valor máx.		48	62	6.2	5.56	1.16	4111
Promedio		40	53	4.8	5.27	0.87	3498
Desv. Estándar		6.8	6.1	1.1	0.29	0.24	592

Donde:

% G = Porcentaje de gravas

% A = Porcentaje de arenas

% F = Porcentaje de finos

%Asf = Porcentaje de cemento asfáltico

F/A= Relación Filler/Asfalto

MR = Módulo Resiliente

En carpeta asfáltica se manifestaron agrietamientos longitudinales y transversales, derivado del agrietamiento reflectivo generado por la base RoadCem.

3.4.- Diseño de mezcla con Asfalto Espumado

Como etapa inicial de diseño se toman muestras de material a granel de pozos a cielo abierto (o bancos de préstamo y canteras como material de aporte). En cada capa y la parte superior del pavimento debe ser muestreada por separado y como mínimo deben de obtener 200 kg del material de cada capa de la que va a intervenir en el proceso de estabilización y por lo tanto requiera de un diseño de mezcla.

3.4.1.-Granulometría

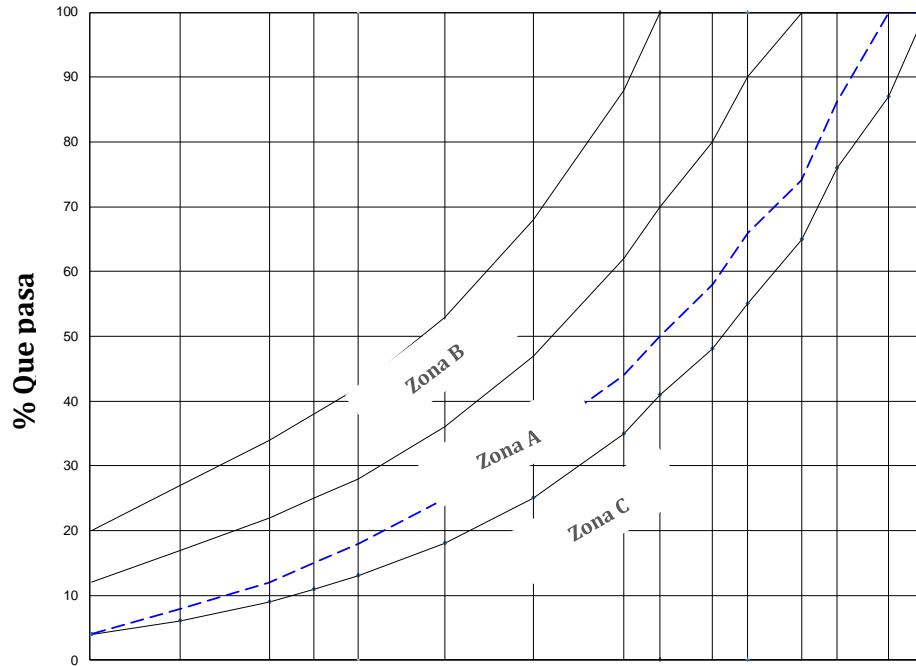
Distribución por tamices para determinar la distribución granulométrica.

Si el material se encuentra en la Zona A de esta clasificación, es apropiado para ser empleado en carreteras con tráfico pesado. Los materiales de la Zona B son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de fracciones gruesas. Los materiales de la Zona C son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos. El contenido de finos del agregado es un parámetro fundamental debido a la influencia que tiene en el proceso de dispersión del asfalto y en general debe encontrarse sobre un 5%. [26]

Es posible variar las proporciones del material a utilizar o el aporte de material virgen para adaptar la granulometría a los parámetros establecidos en dicha sección.

De acuerdo con los resultados de laboratorio la curva granulométrica obtenida es la que se muestra en la Figura 21, la cual entra dentro de la Zona A siguiendo la clasificación siguiente.

Composición Granulométrica



Designación de la Malla

Figura 21.- Curva Granulométrica. [26]

3.4.2.- Método AASHTO T180

Este método nos sirve para determinar la densidad máxima seca del material, así como su humedad óptima. Relación Humedad/Densidad. [1]

3.4.3.- Índice Plástico

La estabilización con asfalto espumado se lleva a cabo normalmente en combinación con una pequeña cantidad (1% en masa) de filler activo (Cemento portland o Cal hidratada) para mejorar la dispersión del asfalto y reducir la susceptibilidad a la humedad. El índice de plasticidad del material se utiliza normalmente como una guía para el uso de la cal hidratada o cemento en la mezcla. [26]

Tabla 16.- Determinación del Índice de plasticidad.^[26]

Índice de plasticidad: <10	Índice de plasticidad:>10
Se lleva a cabo la prueba del ITS en especímenes de 100 mm Φ para determinar la necesidad de agregar ya sea cemento portland o cal hidratada.	Pre- tratar el material con cal hidratada.

El índice de plasticidad que se obtuvo para este estudio arroja un parámetro de plasticidad >10 por lo que en el diseño de la mezcla es necesario pre-tratar el material con cal hidratada. Figura 22



Figura 22.- Cal Hidratada. ^[26]

3.4.4.-Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se toma como referencia la Tabla 17 que se muestra a continuación. ^[26]

Tabla 17.- Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto.

Estimación de la adición del contenido óptimo de asfalto			
Fracción pasando la malla # 200 (0.075 mm)	Fracción pasando la malla # 4 (4.75 mm)		Tipo de material
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	Asfalto recuperado (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/Piedra triturada graduada/grava natural
7-10	2.4	2.8	
>10	2.6	3.2	Gravas y arenas

Los parámetros obtenidos dieron como resultado para la malla #200 (0.075 mm) un resultado de 3 % y para la malla #4 (4.75 mm) un 44%, obteniendo un contenido óptimo de asfalto del 2% en material de Asfalto recuperado (RAP).

Es importante mencionar que no se pueden utilizar asfaltos modificados para la obtención de asfalto espumado. Figura 23



Figura 23.- Asfalto ECK-B 64-22. [26]

3.5.-Determinación de las Propiedades del Asfalto Espumado

3.5.1.-Calidad del Asfalto Espumado

La calidad del producto final, es decir, el asfalto espumado, es determinado principalmente, por los factores "Expansión" y "Vida Media".

Relación de Expansión. Una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la relación del máximo volumen de la espuma en relación con el volumen original del asfalto. Figura 24

Vida Media. Medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo en segundos que la espuma colapsa a la mitad del volumen máximo. Figura 6

Los requerimientos que debe cumplir son Expansión Mínima 8 Veces y Vida Media 6 Segundos. [26]

Básicamente se puede decir: cuanto mayor sea la expansión y cuanto mayor sea la vida media; mejor será la calidad del asfalto espumado. Figura 25

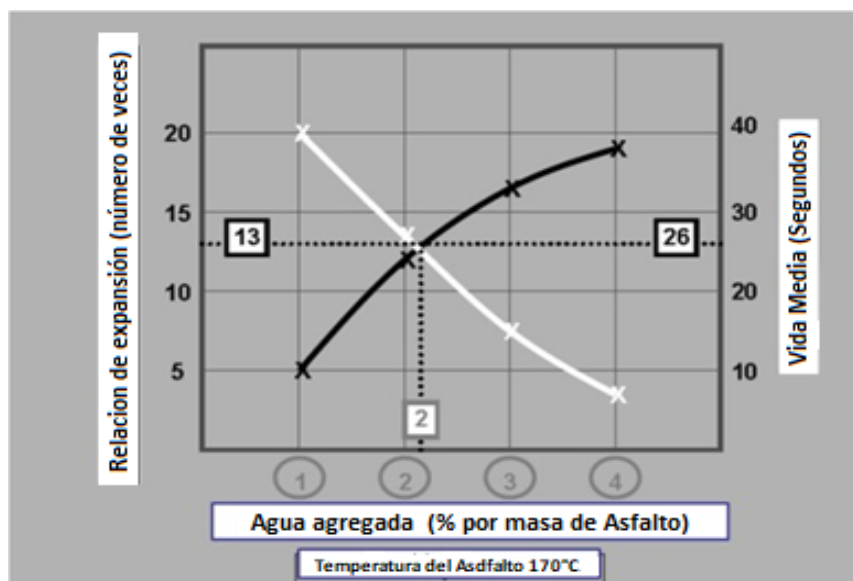


Figura 24.- Gráfica de Expansión y Vida Media. [26]

El porcentaje óptimo de agua para espumar el asfalto arroja un 2.0%.



Figura 25.- Calidad de Asfalto Espumado. [26]

Después de obtener los resultados más aceptables se inicia con la preparación de la mezcla, para incorporarle el asfalto espumado, el cual se compone de las siguientes dosificaciones que se introducen en la maquina WLB10s. Figura 26

Asfalto ECK-B 64-22 1.7%, 1.9%, 2.1% y 2.3%

Humedad 2.0%, 3.0% y 4.0%

Temperatura 170° y 180° C



Figura 26.- Maquina WLB10s. [26]

La función del equipo es obtener diferentes diseños de mezclas, permitiendo variar diferentes parámetros como la cantidad Asfalto, la cantidad de agua y la presión del aire durante el proceso de formación de espuma. El equipo WLB10S cuenta con mezclador de

materiales, que dan como resultado la combinación de pequeños puntos de soldadura que logran hacer la unión de una mezcla uniforme y cumplir con la calidad que requiere una base con alta resistencia. Figura 27

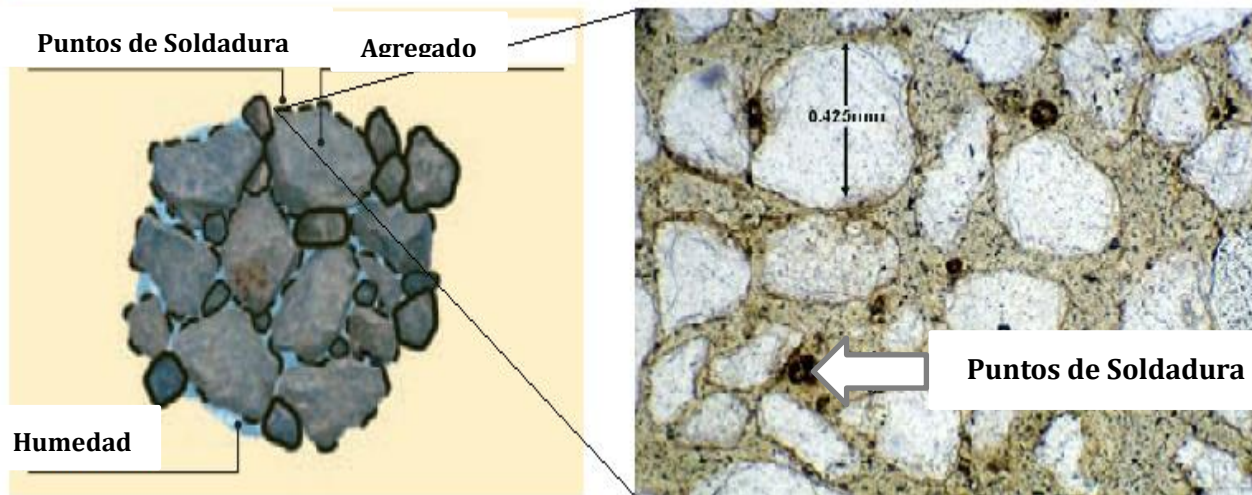


Figura 27.- Mezcla con asfalto espumado puntos de soldadura.

3.5.2.-Determinación de la resistencia a la tracción indirecta (ITS) Seco y Saturado

Para determinar ITS, se producen especímenes de ensayo con un diámetro de 152 mm y una altura de 95 mm con el equipo compactador WLVI.^[26]

Estos especímenes deberán ser "secados" a una temperatura de 40°C durante un periodo de 72 horas, transcurrido este lapso serán divididos en dos grupos de 3 especímenes, de los cuales el primer grupo será sometido a un proceso de inmersión (saturación) en agua por un lapso de 24 horas a una temperatura de 25°C y ensayado a ITS. Por su parte el segundo grupo se ensayará directamente a ITS en estado seco.

Una vez ensayados los dos grupos de especímenes se obtendrá el promedio ITS. Los cuales deberán cumplir con la especificación que a continuación se presentan. Tabla 18

Tabla 18.- Resultados de diseños ITS Seco y Saturado.

Resultados de diseños ITS Seco y Saturado			
	ITS Seco (kpa)	ITS Saturado (kpa)	Condición
Pruebas	225 mínimo	100 mínimo	
80% RAP+20% Material Virgen+1.7% de Asfalto +1.0 cal hidratada.	198	189	No cumple
80% RAP+20% Material Virgen+1.9% de Asfalto +1.0 cal hidratada	223	136	No cumple
80% RAP+20% Material Virgen+2.1% de Asfalto +1.0 cal hidratada	251	145	Cumple
80% RAP+20% Material Virgen+2.3% de Asfalto +1.0 cal hidratada	220	198	No Cumple

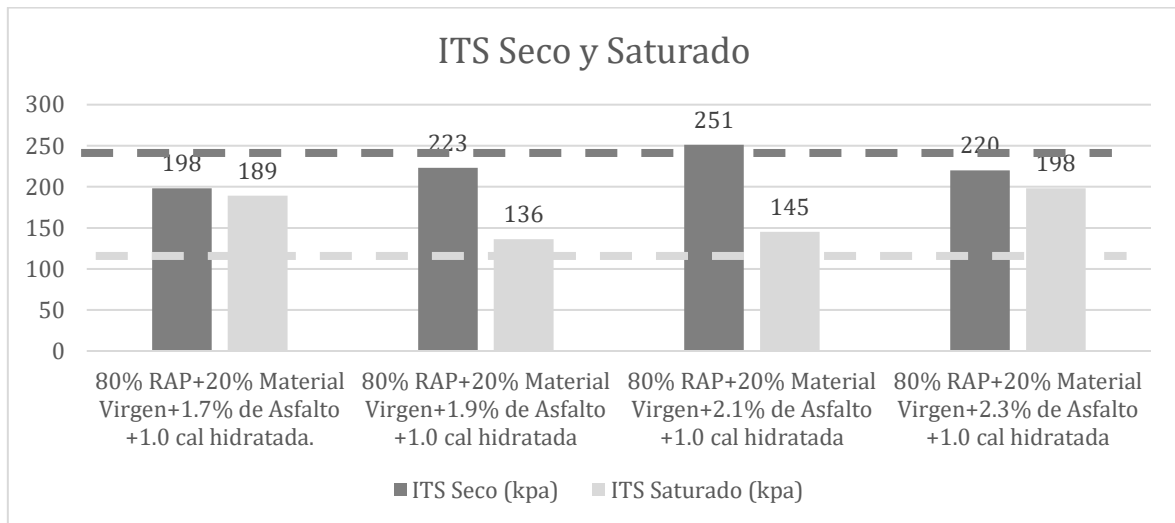


Figura 28.- Gráfica de ITS seco y saturado. (Elaboración propia).

Evaluados los resultados se recomienda usar la siguiente dosificación:

80% RAP + 20% Material Virgen + 1.0% Cal hidratada + 2.1% de ECK-B 64-22

3.5.3.-Determinación de los resultados de Cohesión y Ángulo de fricción

Para determinar los valores de Cohesión (C), y ángulo de fricción (ϕ) se realiza la prueba triaxial, se fabrican especímenes de ensayo con diámetro de 152 mm y una altura de 300 mm. [26]

Para esta evaluación de 2.1% de asfalto espumado y 1% de cal, se obtuvo una cohesión promedio de 250 KPa y un ángulo de fricción de 46.9° , los cuales los valores mínimos son de 250 kpa y 40° . [26]

3.6.-Diseño Estructural del Pavimento

Se llevó a cabo un cálculo de la estructura de pavimento necesaria para soportar los ejes equivalentes bajo un horizonte de proyecto de 20 años, considerando la estructura de pavimento existente.

Los pavimentos con bases cementadas presentan una vida remanente muy baja y están gobernados por la fatiga. Se planteará una alternativa de rehabilitación estructural considerando tecnologías especiales como lo es el asfalto espumado. Antes de describir esta alternativa de rehabilitación se comentarán algunos aspectos técnicos de estas tecnologías. Para la propuesta de espesores se utilizarán los siguientes métodos de diseño:

3.6.1.-Método AASHTO 93

Este método de diseño se basa en los resultados experimentales obtenidos en tramos de prueba en Ottawa Illinois y realizados por AASHTO en las décadas de 50's y 60's. El objetivo principal de los tramos de prueba fue el de obtener relaciones y correlaciones confiables entre el comportamiento de pavimentos diseñados con los mismos criterios, apoyados en suelos similares y en condiciones de tránsito exactamente iguales. El objetivo del diseño es determinar el espesor del pavimento que sea adecuado para soportar los ejes equivalentes (W18) proyectados de diseño.[2]

3.6.2.-IMT-PAVE

El IMT-PAVE es una herramienta de diseño de pavimentos la cual aplica una metodología empírico-mecanicista que, sin descuidar otros factores, pone énfasis en el concepto de espectro de carga para relacionarlo con el de espectro de daño; esto a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que presenta.^[6]

3.6.3.-Resultaods de Diseños con el método AASHTO y IMT-PAVE

La Tabla 19 y Figura 29, muestran los diseños con AASHTO 93 e IMT PAVE respectivamente en donde la sección de pavimento propuesta cumple para los 20 años de servicio y 90% de confiabilidad.

En los anexos de este documento se muestran las memorias de cálculo al detalle tanto del método AASHTO 93 como del método IMT PAVE.

Los datos de tránsito y configuración vehicular se muestran a continuación para alimentar a los programas:

TDPA (2020) = 1832 vehículos

Factor sentido = 0.5 (2 carriles de circulación)

Factor carril = 1.0 (1 carril por sentido)

TDPA proyecto (2020) = (1832) (0.5) (1.0) = 916 vehículos

Periodo de análisis = 20 años

Tasa de crecimiento obtenida por mínimos cuadrados (a partir de 2020) = 5.9%

Configuración vehicular:

A = 60.8 %

B2 = 1.5%

B3 = 1.2%

C2 = 3.6%

C3 = 4.7%

T3-S2 = 12.4%
 T3-S3 = 4.2%
 T3-S2-R4 = 10.4%
 Otros = 1.2%
 Total = 100%

De lo anterior, para el cálculo de los ejes sencillo equivalentes acumulados de 8.2 ton (ESALS) con el método AASHTO 93 se tiene:

- Porcentaje de vehículos ligeros = 63.5%
- Porcentaje de vehículos pesados = 36.5%
- Para los vehículos pesados y críticos en el diseño, se considerarán 80% cargados y 20% vacíos.

Para el cálculo de los ESALS se considerarán los siguientes valores adicionales:

- Confiabilidad = 90%
- $Z_r = -1.282$
- $S_o = 0.45$
- P_o (Índice de servicio inicial) = 4.2
- P_t (Índice de servicio final) = 2.5

Los factores de daño para cada uno de los vehículos considerado en el diseño y el cálculo de los ESALS para el periodo de 20 años de servicio, siendo de 17,299,588 (recuadro amarillo).

Tabla 19.- Diseño del pavimento con base espumada con método AASHTO 93.

Tránsito de diseño				Tránsito de la Estructura				
Esal_{req} =	17,299,588	S_{Nreq} =	3.26	Esal_{adm} =	24,134,591	6,835,003	Cumple	
Diseño estructural del Pavimento								
Capa del pavimento	E psi	a*	m**	CBR %	Estructura			
					Espesor in	Espesor (cm)	S _N ***	
Carpeta Asfáltica	435,113	0.430			3.15	8.00	1.35	
Base Espumada	174,075	0.205	1.10		4.72	12.00	1.07	
Sub-base hidráulica	32,441	0.130	1.10	60.0	5.91	15.00	0.84	
Subrasante	34,833			66.3				
						Total =	3.26	

Valores de diseño utilizados

Zr = -1.282 (90% confiabilidad)

So = 0.45

Po = 4.2

Pt = 2.5

The screenshot shows the 'Análisis Probabilista' (Probabilistic Analysis) window of the IMT-PAVE 3.0 software. The window title is 'IMT-PAVE 3.0' and it has a menu bar with 'Archivo', 'Modelos de Deterioro', and 'Herramientas'. The main area is titled 'ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO' and contains a table with the following data:

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Variación, %
1	Carpeta Asfáltica	8	5000	15
2	Base estabilizada	15	1200	15
3	Sub Base	15	224	15
4	Sub rasante	25	240	15
5	Sub rasante	30	126	15
6	Capa semi-infinita		147	15

Below the table, there are two buttons: 'Análisis Probabilista' (highlighted in blue) and 'Reporte' (highlighted in green). To the right of the table, there is a 'CONFIABILIDAD' section with a dropdown menu set to '90%'. Below that, the 'RESULTADOS' section shows 'Vida por fatiga (años)' and 'Vida por deformación (años)', both with a value of '> 20'.

Figura 29.- Diseño de pavimento con base espumada utilizando programa IMT PAVE 3.0. [6]

4.-Propuestas de Solución con la capa de asfalto espumado

Una vez efectuados los estudios de pavimentos en la estructura actual del segmento 2 y haber llevado a cabo la revisión de calidades de los materiales que componen dicha estructura de pavimentos se definieron dos propuestas de solución:

La Alternativa 1 brinda solución a la estructura del pavimento y comprende los siguientes alcances:

- Bacheo Profundo Aislado.
- Reconstrucción de Estructura de Pavimento.
- Construcción de Subdrenes Longitudinales y Transversales.

La Alternativa 2 brinda una solución integral y comprende los siguientes alcances:

- Retiro de las capas actuales de terracerías y estructura de pavimento.
- Reconstrucción de terracerías: construcción de pedraplen, subyacente y subrasante.
- Reconstrucción de Estructura de Pavimento: subbase hidráulica, base estabilizada con asfalto espumado, carpeta asfáltica y capa de rodadura tipo CASSA.
- Construcción de obras de drenaje y obra complementaria.

4.1.-Vida Remanente Alternativa 1 y 2

Los resultados de vida remanente por fatiga y por deformación permanente para la alternativa 1 y 2, dieron como resultado un incremento de 13.1 años, respecto al estado actual. La vida reamente está gobernada por la deformación permanente o rodera plástica, lo cual corresponde a una zona con presencia de humedad producto de lluvias estacionales. Tabla 20

Tabla 20.- Vida Remanente Secciones Propuestas.

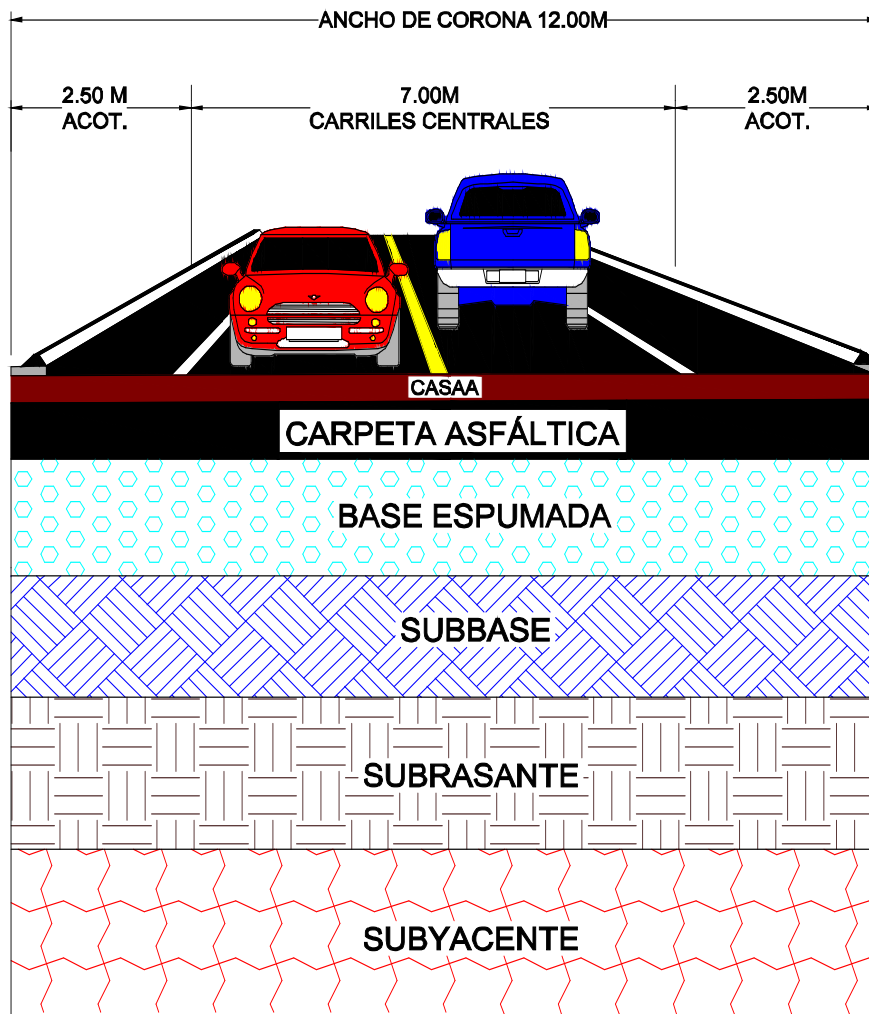
S.H	Km Inicial	Km Final	Longitud (km)	Vida remanente fatiga (años)	Vida remanente por deformación (años)
1	100+000	112+192	12.19	13.1	13.1
2	112+192	116+920	4.73	13.1	13.1
3	116+920	119+820	2.9	13.1	13.1

4.2.-Propuesta de Solución Alternativa 1

Para dar solución al segmento 2 y proporcionar una mayor resistencia a la estructura del pavimento como Alternativa 1 de solución, se propone realizar un Fresado de 9 cm de espesor (que incluye la capa tipo CASAA de 3 cm y Carpeta Asfáltica de 6 cm), el producto del fresado se lleva al banco de almacenamiento para ser aprovechado como material tipo RAP (Reciclado de Pavimento Asfáltico), después se procede con el fresado de la capa PowerCem de 25 cm; dicho material será enviado a un banco de desperdicio.

Una vez descubierta la capa subrasante se procederá a su fresado; se acarreará a la planta estabilizadora de pétreos, para que se realice un proceso de estabilización con cal viva de 3%, una vez dosificada se regresara al sitio para la colocación y compactación al 100% de PVSM (Peso Volumétrico Seco Máximo).

Posteriormente se procederá a construir la nueva de estructura pavimentos la cual se integra con una capa de Subbase Hidráulica de 15 cm compactada al 100% de su PVSM, posteriormente se aplicará un Riego de Impregnación a razón de 1 litro sobre metro cuadrado, para después colocar una Base Estabilizada con Asfalto Espumado (AC-20 normal) de 15 cm, considerando como material de aporte un 20% de Material Virgen y 80 % material RAP, luego se procederá a tender una Carpeta Asfáltica de 8 cm,; finalmente para proteger la estructura se deberá colocar una Capa de Rodadura tipo CASAA de 3 cm de espesor. Figura 30



- CASAA = 3 CM
- CARPETA = 8 CM
- BASE ESPUMADA = 15 CM
- SUBBASE = 15 CM
- SUBRASANTE 3% CAL= 25 CM
- SUBYACENTE = 30 CM

Figura 30.- Estructura Propuesta de Pavimento, Alternativa 1.

4.3.-Tramos por Ejecutar de Subdrenaje Longitudinal y Transversal

Derivado de la revisión de las condiciones superficiales del pavimento y con el objetivo de prevenir deterioros tempranos a causa de humedad presente en las capas de terracerías debido a las infiltraciones del terreno adyacente mediante redes de flujos subterráneos, se tienen los siguientes tramos a considerar para la construcción de subdrenes longitudinales y transversales:

Tabla 21.- Subdrenaje Longitudinal.

CONCEPTO SUBDRENAJE LONGITUDINAL.

No.	CADEMAMIENTO		SENTIDO	CARRIL	LONG. (M)	LONG. ACUMULADA	DIAMETRO TUBO	POZO DE VISITA	OBSERVACIONES
	DEL KM	AL KM							
1	103+097	103+393	SENTIDO UNO	DERRECHO	296	296	6"	6	PERFIL SOBRE CUNETETA
2	103+371	103+082	SENTIDO DOS	IZQUIERDO	289	585	6"	6	PERFIL SOBRE CUNETETA
3	106+380	106+620	SENTIDO UNO	DERRECHO	240	825	6"	5	PERFIL SOBRE CUNETETA
4	106+640	106+390	SENTIDO DOS	IZQUIERDO	250	1075	6"	5	PERFIL SOBRE CUNETETA
5	110+370	110+565	SENTIDO UNO	DERRECHO	195	1270	6"	4	PERFIL SOBRE TALUD
6	117+910	118+265	SENTIDO UNO	DERRECHO	355	1625	6"	7	PERFIL SOBRE CUNETETA
7	118+165	117+790	SENTIDO DOS	IZQUIERDO	375	2000	6"	8	PERFIL SOBRE CUNETETA
					SUMA	2000		41	

Longitud de Subdrenaje longitudinal: 2,000 m

Tabla 22.- Subdrenaje Transversal.

CONCEPTO SUBDRENAJE TANSVERSAL.

No.	CADEMAMIENTO	LONG. (M)	LONG. ACUMULADA	DIAMETRO TUBO	POZO DE VISITA	OBSERVACIONES
	DEL KM					
1	110+370	17	17	4"	2	TRANSVERSAL
2	110+400	17	34	4"	2	TRANSVERSAL
3	110+540	17	51	4"	2	TRANSVERSAL
		SUMA	51		6	

Longitud de Subdrenaje transversal: 51 m

4.3.1.-Sección Tipo Subdren Longitudinal

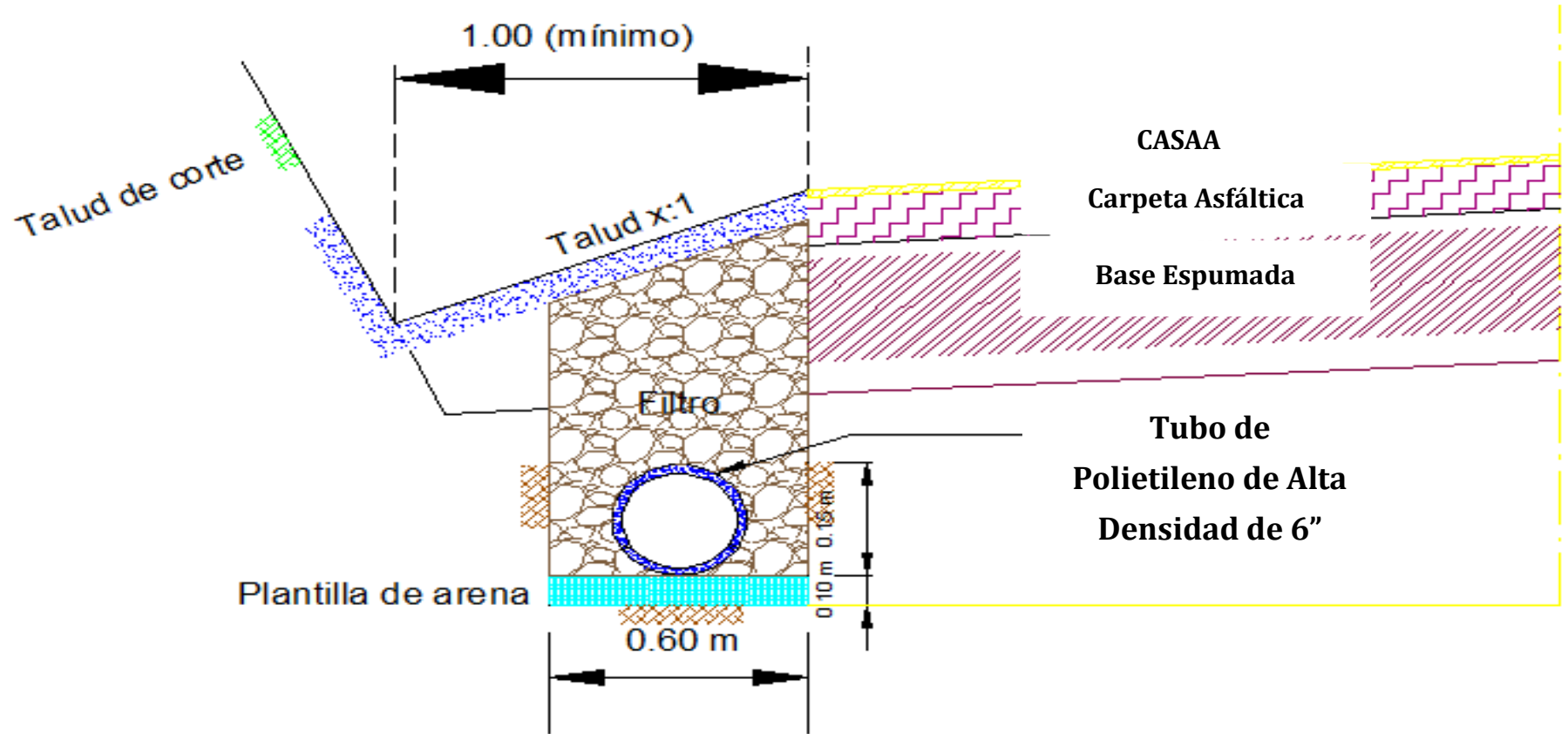


Figura 31.- Sección tipo Subdren Longitudinal.

4.3.2.-Sección Tipo Subdren Transversal

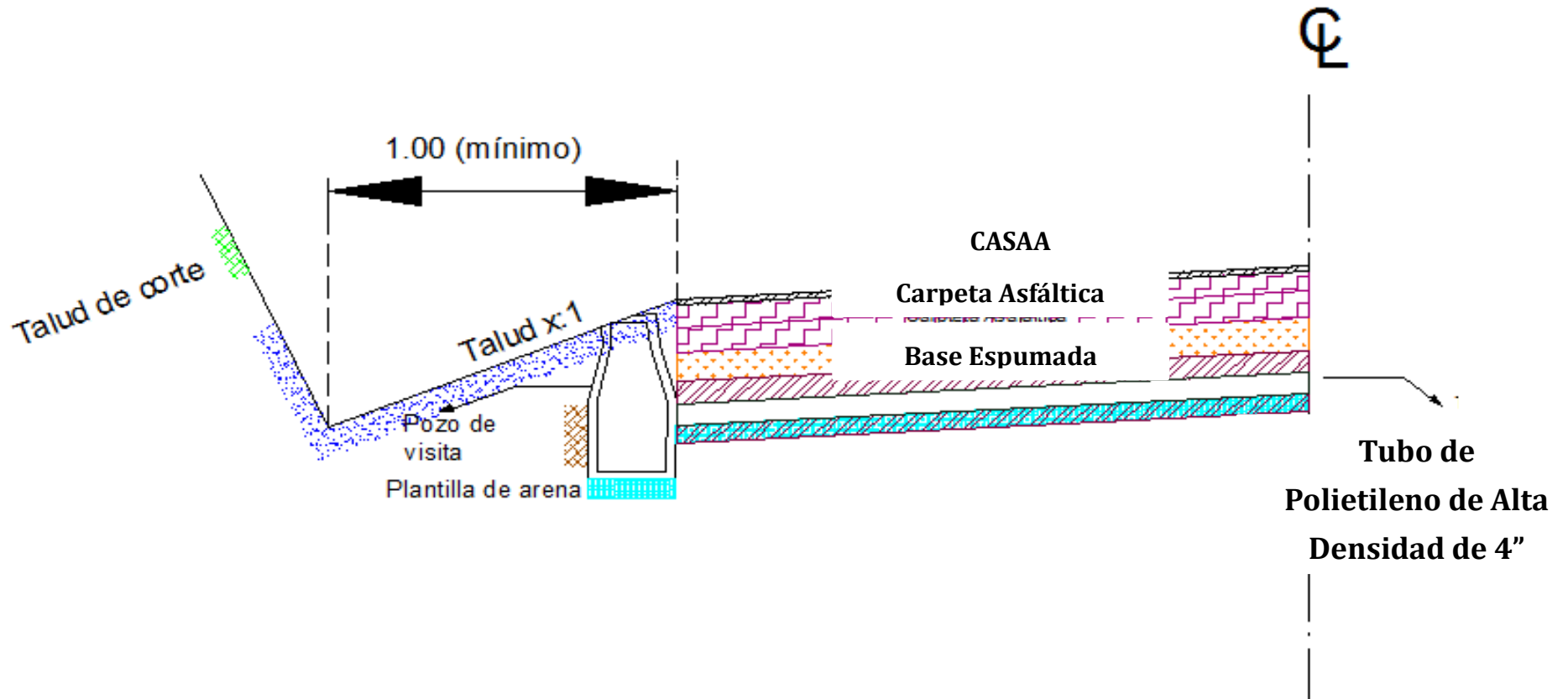


Figura 32.- Sección tipo Subdren Transversal

4.4.-Bacheo Profundo

Los trabajos de bacheo necesarios para mantener un adecuado nivel de servicio de la carretera evitando deterioros tempranos en zonas puntuales a causa de humedad subterránea, se realizan en tramos aislados de la autopista.

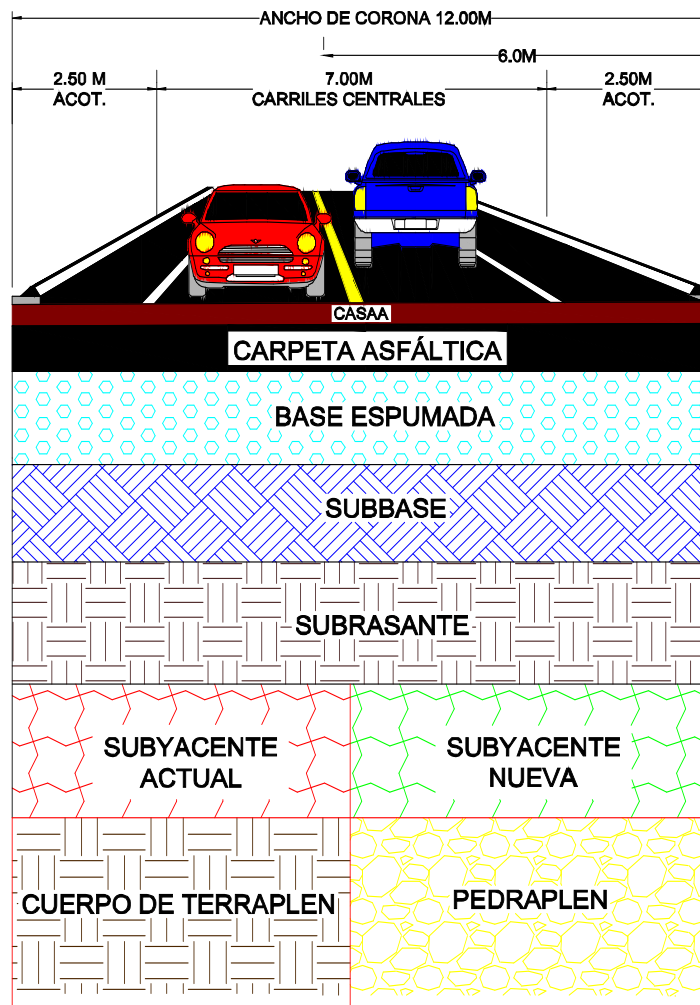
Los trabajos por ejecutar consisten en la realización de trabajos de bacheo profundo donde se requiera en el camino en construcción.

El bacheo profundo consistirá en el fresado de hasta 1 m de profundidad por debajo de la capa subrasante, en zonas puntuales mayores a 40 m de largo y con un ancho de 6m, para realizar la reposición de la estructura de terraplén se deberá colocar un pedraplen de 70 cm de espesor y una capa subyacente de 30 cm. Figura 33

Tabla 23.- Bacheo Profundo.

Segmento 2 del Km 100+000 al Km 118+640								
No. Deterioro	Cadenamiento Inicial	Cadenamiento Final	Sentido	Longitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen (m3)	Observaciones
1	101+795	101+835	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
2	104+825	104+865	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
3	105+545	105+585	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
4	107+400	107+440	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
5	107+390	107+430	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
6	109+875	109+915	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
7	110+500	110+540	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
8	110+595	110+635	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
9	111+100	111+140	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
10	113+085	113+125	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
11	114+100	114+140	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
12	114+945	114+985	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
13	115+700	115+740	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
14	115+850	115+890	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
15	117+300	117+340	2	40	6	1	240	Bacheo Profundo
Total							3600	

4.4.1.-Sección tipo Bacheo Profundo



CASAA = 3 CM	CASAA = 3 CM
CARPETA = 8 CM	CARPETA = 8 CM
BASE ESPUMADA = 15 CM	BASE ESPUMADA = 15 CM
SUBBASE = 15 CM	SUBBASE = 15 CM
SUBRASANTE = 25 CM	SUBRASANTE = 25 CM
SUBYACENTE = 30 CM	SUBYACENTE = 30 CM
	PEDRAPLEN = 70 CM

Figura 33.- Sección tipo Bacheo Profundo.

4.5.-Propuesta de Solución Alternativa 2

La **Alternativa 2** contempla los trabajos necesarios para reconstruir en un 100% el tramo de la vialidad afectada por aparentes fallas en el diseño y construcción tanto de las terracerías como de la estructura de pavimento.

De manera tal que la solución propuesta contempla retirar la estructura actual conformada por: (i) capa de rodadura tipo CASAA de 3 cm de espesor, (ii) carpeta asfáltica de 6 cm, (iii) una Base Estabilizada PowerCem de 25 cm, (iv) Subrasante de 25 cm y (v) Subyacente de 30 cm. Sin embargo, con la finalidad de garantizar la integridad del cuerpo de terraplén, así como alcanzar una vida remanente superior a los 20 años, se realizará una excavación mayor con la finalidad de integrar a la estructura una capa de pedraplen (rompedora de capilaridad) así como incrementar los espesores de las diversas capas que comprende el cuerpo de las terracerías y la estructura de pavimentos. De vital importancia resulta el diseño y construcción del sistema de drenaje que complemente la función del pedraplen; dicho sistema debe estar compuesto por reconstrucción, ampliación de alcantarillas, construcción de cunetas y bordillos, así como drenes y subdrenes tanto longitudinal como transversal.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

Consiste en la reconstrucción de las capas de Terracerías y pavimentos, para lo cual se realizarán trabajos de corte en frío de las capas de pavimento existente, micro carpeta y carpeta asfálticas, con espesor total variable de hasta 10 cm. Posteriormente se realizará la excavación en caja con excavadora sobre orugas en los frentes necesarios hasta alcanzar el nivel de desplante de las capas indicadas en la sección transversal consistentes en una capa de pedraplen de 50 cm de espesor con tamaños de roca (tamaño de roca de 10") chicos y medianos para estabilizar las capas subyacentes hacer la función de capa drenante, la cual se acomodará con tractor o excavadora sobre orugas con un peso mayor a 30 ton.

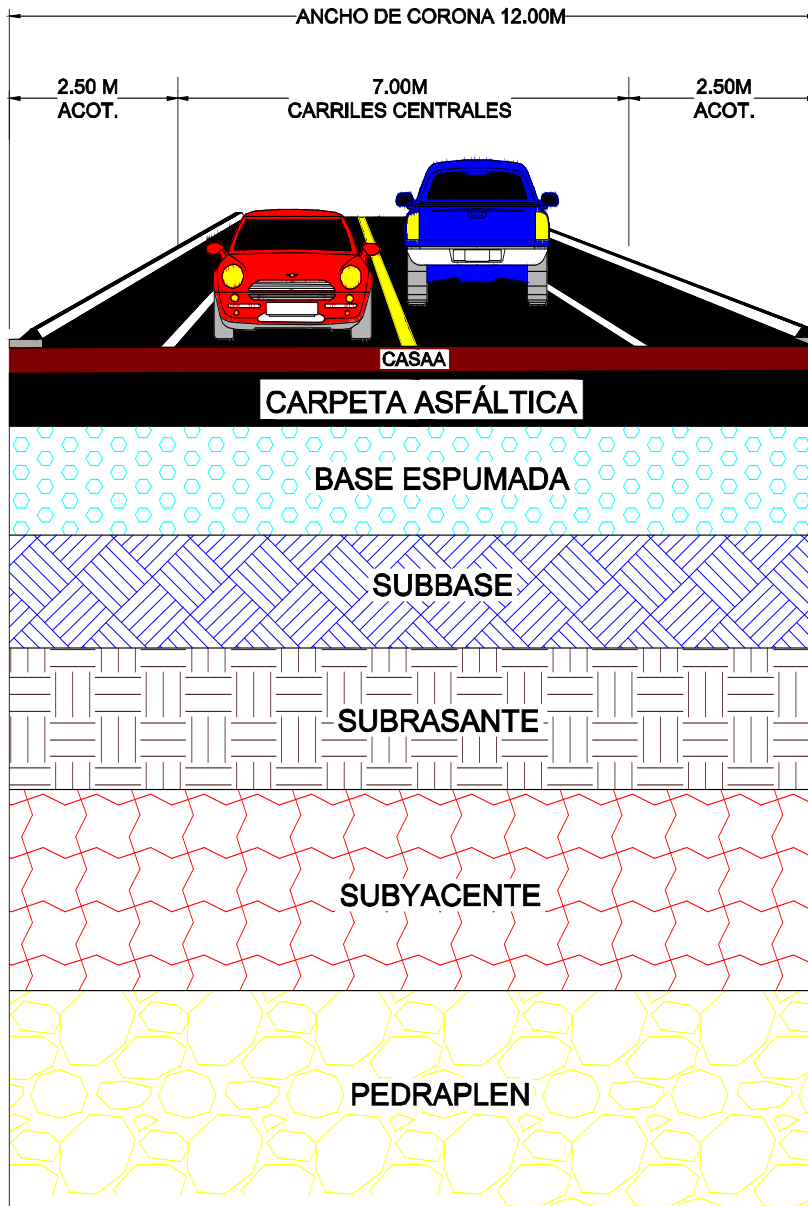
Se construirá una capa subyacente de 50 cm y una capa subrasante de 30 cm de espesor con material de banco. Después de esto se construirá una capa de subbase hidráulica de 20 cm de espesor con material producto de trituración total para la máxima demanda de tráfico señaladas en las normas de SCT. Sobre esta capa se construirá una capa de base

estabilizada con asfalto espumado de 15 cm de espesor elaborada en planta móvil KMA-220 de la marca Wirtgen empleando un 80% de material recuperado proveniente del corte en frío y 20% de material de 1 ½" producto de trituración total para lograr los requisitos de calidad señaladas en las normas de SCT para un tránsito mayor a 10 millones de ejes equivalente, en cuanto a granulometría y calidad de los materiales individuales y mezclados; a la cual se adicionará cemento asfáltico AC-20 Normal y agua en las proporciones que señale el diseño.

Sobre esta base, se construirá una capa de carpeta asfáltica de 8 cm. con tamaño nominal de ¾" producto de trituración total empleando asfalto modificado PG 76-22 la cual se tenderá con equipo de tendido con riego sincronizado utilizando emulsión de rompimiento rápido.

Antes de realizar la apertura al tráfico se debe tener concluida esta capa en su totalidad con señalamiento horizontal y vialetas provisionales. La última capa será la capa de rodadura de granulometría abierta tipo CASAA, elaborada y compactada en caliente de 3 cm de espesor, la cual se producirá en planta en caliente con los aditamentos para la incorporación de filler y fibras necesarias de acuerdo con el diseño. Se debe considerar invariablemente agregado de origen basáltico. Figura 34

De forma paralela se realizarán trabajos complementarios consistentes en recubrimiento de concreto $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ en los taludes del terraplén, lavaderos bordillos con concreto de $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$, retiro y colocación de defensa metálica de forma paralela al avance de la rehabilitación; así como subdrenes longitudinales y transversales a base de tubería PAD corrugada recubierta con geotextil, de 6" y 4" de diámetro respectivamente y pozos de visita. En los puentes se realizará el remplazo de las juntas y serán sustituidas por las del tipo Frey-MexT-50.



CASAA =	3 CM
CARPETA =	8 CM
BASE ESPUMADA =	15 CM
SUBBASE =	20 CM
SUBRASANTE =	30 CM
SUBYACENTE =	50 CM
PEDRAPLEN =	50 CM

Figura 34.- Estructura Propuesta de Pavimentos Alternativa 2.

5.- Análisis financiero y programas de intervención con la capa de asfalto espumado

De acuerdo a las alternativas de solución anteriormente expuestas se realizaron programas de intervención, así como se realizó un análisis financiero para determinar económicamente cuál es la mejor alternativa.

Financieramente la alternativa 1 Tabla 24, resulta más factible ya que minimiza los costos de construcción el análisis se realizó con precios lo más apegados a la realidad considerando todos los insumos, materiales, maquinaria, personal, acarreo que son los factores que más nos pegan en el presupuesto, se presenta en la tabla 30 una comparativa entre las dos alternativas.

En cuanto al programa de obra también resulta conveniente la alternativa 1 ya que de acuerdo al programa presentado en la tabla 25 y haciendo una comparativa con el programa de la tabla 28 resulta factible el primero, minimizando los trabajos de ejecución hasta siete meses menos.

Además, se realizó un análisis con el programa Project para poder determinar cuál es nuestra mejor ruta crítica, con el fin de poder planificar mejor la ejecución de los trabajos y limitarnos a un tiempo estimado de terminación, la Tabla 26 nos muestra que debemos comenzar con el fresado de la superficie y continuar con la construcción de las demás capas, tomando como medida de protección la última capa tipo Casaa, ya que se nos recorre en ejecución y terminación de los trabajos a tres meses.

Como análisis financiero, resulta factible la construcción de base espumada ya que comparándola con una capa de base convencional notamos un ahorro significativo de hasta un 31%, Figura 35 lo que repercute económicamente más factible.

5.1.-Presupuesto Alternativa 1

Tabla 24.- Presupuesto Alternativa 1.

PRESUPUESTO ALTERNATIVA 1				
CATALOGO DE CONCEPTOS				
	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
PAVIMENTOS				
FRESADO DE CONCRETO ASFALTICO	M3	25,052.77	\$306.78	\$ 7,685,688.78
RETIRO Y ACARREO DE CAPA POWER CEM	M3	111,830.91	\$213.47	\$ 23,872,544.36
ESTABILIZACION DE SUBRASANTE CON CAL VIVA (3%)	M3	55,617.13	\$630.17	\$ 35,048,246.81
SUBBASE HIDRAULICA	M3	32,998.67	\$791.65	\$ 26,123,397.11
BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO	M3	32,239.38	\$1,618.98	\$ 52,194,911.43
RIEGO DE IMPREGNACION CON EMULSION	LT	224,075.00	\$13.86	\$ 3,105,679.50
CARPETA ASFALTICA	M3	20,846.31	\$3,564.34	\$ 74,303,336.59
CASAA	M3	7,759.09	\$4,988.49	\$ 38,706,142.87
BACHEO PROFUNDO	M3	3,600.00	\$1,151.08	\$ 4,143,888.00
			PAVIMENTOS	\$265,183,835.45

5.2.-Programa de Obra Alternativa 1

Tabla 25.- Programa de Obra Alternativa 1.

No.	E.P. Particulares	Descripción del Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	jul-22	ago-22	sep-22	oct-22	nov-22	dic-22	ene-23	feb-23	mar-23	abr-23	may-23	jun-23	jul-23	ago-23	sep-23	TOTAL	
PAVIMENTOS																							
1	E.P.1	RECORTE DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE 9 CM DE ESPESOR, P.U.O.T.	M3	25,052.77	\$ 306.78	\$ 7,685,688.78	430.13	2,795.82	2,150.63	3,297.63	3,010.88	2,222.31	2,939.19	3,082.57	3,297.63	1,826.00						25,052.77	
2	E.P.2	RETRO Y ACARREO DE CAPA POWER CEM DE 25 CM DE ESPESOR, P.U.O.T.	M3	111,830.91	\$ 213.47	\$ 23,872,544.36	1,920.00	12,480.00	9,600.00	14,720.00	13,440.00	9,920.00	13,120.00	13,760.00	14,720.00	8,150.91							111,830.91
3	E.P.3	CONSTRUCCIÓN DE SUBRASANTE CON CAL VIVA (3%) DE 30 CM DE ESPESOR. INCLUYE RECUPERACIÓN DE LA CAPA ACTUAL Y APLICACIÓN DE CON CAL VIVA (3%), P.U.O.T.	M3	55,617.13	\$ 630.17	\$ 35,048,246.81		5,576.01	4,289.24	6,576.83	6,004.93	4,432.21	5,861.96	6,147.91	6,576.83	3,717.34	6,433.86						55,617.13
4	E.P.4	CONSTRUCCIÓN DE SUBBASE HIDRÁULICA, COMPACTADA AL 100 % DE SU MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA DE LA PRUEBA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. INCLUYE MATERIAL DE BANCO, COMPACTACIÓN, ACARREOS Y FORMACIÓN, P.U.O.T.	M3	32,998.67	\$ 791.65	\$ 26,123,397.11		3,308.35	2,544.88	3,902.16	3,562.84	2,629.71	3,478.01	3,647.67	3,902.16	2,205.57	3,817.33						32,998.67
5	E.P.5	BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO, P.U.O.T.	M3	32,239.38	\$ 1,618.98	\$ 52,194,911.43		3,232.23	2,486.33	3,812.37	3,480.86	2,569.21	3,397.98	3,563.74	3,812.37	2,154.82	3,729.49						32,239.38
6	E.P.6	RIEGO DE IMPREGNACIÓN CON EMULSION ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO ECH-60 A RAZÓN DE 1.0 LITROS/M ² . INCLUYE: SUMINISTRO, APLICACIÓN Y ACARREOS, P.U.O.T.	LT	224,075.00	\$ 13.86	\$ 3,105,679.50		22,465.10	17,280.85	26,497.30	24,193.19	17,856.88	23,617.16	24,769.22	26,497.30	14,976.74	25,921.27						224,075.00
7	E.P.7	CONSTRUCCIÓN DE CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 8 cm DE ESPESOR, DE GRANULOMETRÍA Densa DE ALTO DESEMPEÑO, ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ASFALTO GRADO PG 76-22 TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE 19 mm (¾"), INCLUYE RIEGO DE LIGA Y ACARREOS, P.U.O.T.	M3	20,846.31	\$ 3,564.34	\$ 74,303,336.59			1,571.33	2,409.37	2,199.86	1,623.71	2,147.48	2,252.24	2,409.37	1,361.82	2,356.99	2,514.13					20,846.31
8	E.P.8	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CAPA DE RODADURA DE GRANULOMETRÍA DISCONTINUA TIPO CASAS ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ESPESOR DE 30 mm COMPACTOS INCLUYE RIEGO DE LIGA CON EMULSION MODIFICADA CON POLIMERO ECR - 1P, CEMENTO ASFÁLTICO PG 76-22 Y MATERIAL PETREOL. P.U.O.T.	M3	7,759.09	\$ 4,988.49	\$ 38,706,142.87												4,232.23	3,526.86				7,759.09
9	E.P.9	E.P.9 BACHEO PROFUNDO. INCLUYE EXCAVACIÓN DE LAS CAPAS INFERIORES A SUBRASANTE HASTA UNA PROFUNDIDAD DE 1 M. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE PEDRAPLEN CON TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO DE 10". SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CAPA SUBYACENTE, P.U.O.T.	M3	3,600.00	\$ 1,151.08	\$ 4,143,888.00		360.93	277.63	425.71	388.69	286.89	379.43	397.94	425.71	240.62	416.45						3,600.00
						\$ 265,183,835.45	\$ 2,350.13	\$ 50,218.43	\$ 40,200.89	\$ 61,641.37	\$ 56,281.25	\$ 41,540.92	\$ 54,941.22	\$ 57,621.28	\$ 61,641.37	\$ 34,633.80	\$ 42,675.40	\$ 6,746.36	\$ 3,526.86			514,019.26	

5.3.-Programa de Obra Project Alternativa 1

Tabla 26.- Programa Projet de Obra Alternativa 1.

Id	E.P. Particulares	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Unidades	CANTIDAD	P.U	Importe	Gantt Chart Timeline												
										01 mayo 02/05	27/06	01 septiembre 22/08	17/10	01 enero 12/12	06/02	01 mayo 03/04	29/05	24/07				
1		INICIO DE TRABAJOS	0 días	vie 01/07/22	vie 01/07/22				\$0.00	\$0.00	◆ 01/07											
2									\$0.00	\$0.00												
3		PAVIMENTOS	278.58 días	vie 01/07/22	vie 21/07/23				\$13,278.82	\$0.00												
4	E.P. 1	RECORTE DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE 9 CM DE ESPESOR, P.U.O.T.	204 días	vie 01/07/22	lun 10/04/23	M3	25,052.77	\$306.78	\$7,685,688.78	[Red bar]												
5	E.P. 2	RETIRO Y ACARREO DE CAPA POWER CEM DE 25 CM DE ESPESOR, P.U.O.T.	204 días	vie 08/07/22	lun 17/04/23	M3	111,830.91	\$213.47	\$23,872,544.36	[Red bar]												
6	E.P. 3	E.P. 9 BACHEO PROFUNDO, INCLUYE EXCAVACIÓN DE LAS CAPAS INFERIORES A SUBRASANTE HASTA UNA PROFUNDIDAD DE 1 M, SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE PEDRAPLEN CON TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO DE 10", SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CAPA SUBYASENTE, P.U.O.T.	203.25 días	mar 12/07/22	mié 19/04/23	M3	3,600.00	\$1,151.08	\$4,143,888.00	[Red bar]												
7	E.P. 4	CONSTRUCCIÓN DE SUBRASANTE CON CAL VIVA (3%) DE 30 CM DE ESPESOR, INCLUYE RECUPERACIÓN DE LA CAPA ACTUAL Y APLICACIÓN DE CON CAL VIVA (3%), P.U.O.T.	203.25 días	vie 05/08/22	sáb 13/05/23	M3	55,617.13	\$630.17	\$35,048,246.81	[Blue bar]												
8	E.P. 5	CONSTRUCCIÓN DE SUBBASE HIDRAULICA, COMPACTADA AL 100 % DE SU MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA DE LA PRUEBA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, COMPACTACIÓN, ACARREOS Y FORMACIÓN, P.U.O.T.	203.25 días	vie 12/08/22	sáb 20/05/23	M3	32,998.67	\$791.65	\$26,123,397.11	[Red bar]												
9	E.P. 6	BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO, P.U.O.T.	203.25 días	vie 26/08/22	sáb 03/06/23	M3	32,239.38	\$1,618.98	\$52,194,911.43	[Red bar]												
10	E.P. 7	RIEGO DE IMPREGNACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO ECI-60 A RAZÓN DE 1.0 LTS/MF, INCLUYE, SUMINISTRO, APLICACIÓN Y ACARREOS, P.U.O.T.	203.25 días	vie 02/09/22	sáb 10/06/23	LT	224,075.00	\$13.86	\$3,105,679.50	[Red bar]												
11	E.P. 8	CONSTRUCCIÓN DE CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 8 cm DE ESPESOR, DE GRANULOMETRÍA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO, ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ASFALTO GRADO PG 76-22 TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE 19 mm (¾"), INCLUYE RIEGO DE LIGA Y ACARREOS, P.U.O.T	202.3 días	vie 02/09/22	vie 09/06/23	M3	20,846.31	\$3,564.34	\$74,303,336.59	[Red bar]												
12	E.P. 9	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CAPA DE RODADURA DE GRANULOMETRÍA DISCONTINUA TIPO CASAA ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ESPESOR DE 30 mm COMPACTOS (INCLUYE RIEGO DE LIGA CON EMULSION MODIFICADA CON POLIMERO ECR -1P, CEMENTO ASFALTICO PG 76-22 Y MATERIA	41.5 días	jue 25/05/23	vie 21/07/23	M3	7,759.09	\$4,988.49	\$38,706,142.87	[Red bar]												

Proyecto: Project Cd Valles Cocon Fecha: vie 10/06/22	Tarea [Blue bar] División [Dotted bar] Hito [Diamond] Resumen [Black bar] Resumen del proyecto [Grey bar] Tarea inactiva [White bar]	Hito inactivo [Diamond] Resumen inactivo [Dotted bar] Tarea manual [Green bar] solo duración [Black bar] Informe de resumen manual [Green bar] Resumen manual [White bar]	solo el comienzo [Diamond] solo fin [Bracket] Tareas externas [Green bar] Hito externo [Green bar] Fecha límite [Green bar] Tareas críticas [Red bar]	División crítica [Dotted bar] Progreso [Blue bar] Progreso manual [Green bar]
--	---	--	--	---

Página 1

5.4.-Presupuesto Alternativa 2

Tabla 27.- Presupuesto Alternativa 2.

PRESUPUESTO ALTERNATIVA 2				
CATALOGO DE CONCEPTOS				
	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
PAVIMENTOS				
FRESADO DE CONCRETO ASFALTICO	M3	25,052.77	\$306.78	\$ 7,685,688.78
EXCAVACIÓN Y ACARREO DE LA CAPA DE BASE Y TERRACERIAS	M3	360,344.04	\$246.87	\$ 88,958,133.15
SUBBRASANTE	M3	66,740.56	\$643.10	\$ 42,920,854.14
SUBYACENTE	M3	118,209.27	\$605.08	\$ 71,526,063.07
BASE HIDRÁULICA	M3	43,998.23	\$791.65	\$ 34,831,198.78
BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO	M3	32,239.38	\$1,618.98	\$ 52,194,911.43
RIEGO DE IMPREGNACION CON EMULSION	LT	224,075.00	\$13.86	\$ 3,105,679.50
CARPETA ASFALTICA	M3	20,846.31	\$3,564.34	\$ 74,303,336.59
CASAA	M3	7,759.09	\$4,988.49	\$ 38,706,142.87
PEDRAPLEN	M3	120,720.27	\$745.82	\$ 90,035,589.29
			PAVIMENTOS	\$ 504,267,597.60

5.5.-Programa de Obra Alternativa 2

Tabla 28.- Programa de Obra Alternativa 2.

No.	E.P. Particular	Descripción del Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	jul-22	ago-22	sep-22	oct-22	nov-22	dic-22	ene-23	feb-23	mar-23	abr-23	may-23	jun-23	jul-23	ago-23	sep-23	oct-23	nov-23	dic-23	ene-24	feb-24	mar-24	TOTAL		
PAVIMENTOS																														
1	E.P.1	RECORTE DE LA CARPETA ASFALTICA DE 9 CM DE ESPESOR, P.U.O.T.	M3	25,052.77	\$ 306.78	\$ 7,685,688.78	\$106,169.79	\$690,103.63	\$530,848.95	\$813,968.38	\$743,188.53	\$548,543.91	\$725,493.59	\$760,863.49	\$813,968.38	\$460,069.09	\$796,273.42	\$696,177.65											\$7,685,688.78	
2		EXCAVACION Y ACARREO AL BANCO DE DESPERDICIO DE LA CAPA DE BASE Y TERRACERIAS, P.U.O.T.	M3	360,344.04	\$ 246.87	\$ 88,958,133.15	\$1,228,864.00	\$7,887,616.00	\$6,144,320.00	\$9,421,290.67	\$8,602,048.00	\$6,349,130.67	\$8,397,237.33	\$8,806,858.67	\$9,421,290.67	\$5,325,077.33	\$9,216,480.00	\$8,057,919.62											\$88,958,133.15	
3		FORMACION Y COMPACTACION DE SUBRASANTE DE 30 CM DE ESPESOR, COMPACTADA AL 100% DE LA M.V.S.M. DETERMINADO CON LA PRUEBA AASHTO ESTANDAR, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, COMPACTACION, ACARREOS Y FORMACION, P.U.O.T.	M3	66,740.56	\$ 643.10	\$ 42,920,854.14	\$3,099,839.47	\$2,384,491.90	\$3,656,220.91	\$3,338,288.66	\$2,463,974.96	\$3,258,805.59	\$3,417,771.72	\$3,656,220.91	\$2,066,559.64	\$3,576,737.94	\$3,815,187.03	\$3,179,322.53	\$2,622,941.09	\$2,384,491.90										\$42,920,854.14
4		FORMACION Y COMPACTACION DE SUBYACENTE DE 50 CM DE ESPESOR COMPACTADA AL 95% DE LA M.V.S.M. DETERMINADO CON LA PRUEBA AASHTO ESTANDAR, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, ACARREOS, FORMACION Y COMPACTACION, P.U.O.T.	M3	118,209.27	\$ 605.08	\$ 71,526,063.07	\$5,469,640.12	\$4,207,415.47	\$6,451,370.39	\$5,890,381.66	\$4,347,662.66	\$5,750,134.48	\$6,030,628.85	\$6,451,370.39	\$3,646,426.74	\$6,311,123.21	\$6,731,884.76	\$5,609,887.30	\$4,628,157.02											\$71,526,063.07
5	E.P.4	CONSTRUCCION DE SUBBASE HIDRAULICA COMPACTADA AL 100 % DE SU MASA VOLUMETRICA SECA MAXIMA DE LA PRUEBA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, COMPACTACION, ACARREOS Y FORMACION, P.U.O.T.	M3	43,998.23	\$ 791.65	\$ 34,831,198.78			\$1,920,838.17	\$2,945,285.19	\$2,689,173.44	\$1,884,866.11	\$2,625,145.50	\$2,753,201.37	\$2,945,285.19	\$1,684,726.41	\$2,881,257.25	\$3,073,341.07	\$2,561,117.56	\$2,112,921.98	\$1,920,838.17	\$2,753,201.37								\$34,831,198.78
6	E.P.5	BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO, P.U.O.T.	M3	32,238.38	\$ 1,618.98	\$ 52,194,911.43			\$2,672,094.44	\$4,097,211.48	\$3,740,932.22	\$2,761,164.26	\$3,651,882.40	\$3,830,002.03	\$4,097,211.48	\$2,315,815.18	\$4,008,141.66	\$4,275,351.11	\$3,562,792.59	\$2,939,303.89	\$2,672,094.44	\$3,830,002.03	\$3,740,932.22						\$52,194,911.43	
7	E.P.6	RIEGO DE IMPREGNACION CON EMULSION ASFALTICA DE ROMPIMIENTO LENTO ECH60 A RAZON DE 1.0 LTS/M. INCLUYE, SUMINISTRO, APLICACION Y ACARREOS, P.U.O.T.	LT	224,075.00	\$ 13.86	\$ 3,105,679.50			\$158,993.83	\$243,790.54	\$222,591.36	\$164,293.63	\$217,291.57	\$227,891.16	\$243,790.54	\$137,794.65	\$238,490.75	\$254,380.10	\$211,991.77	\$174,893.21	\$158,993.83	\$227,891.16	\$222,591.36						\$3,105,679.50	
8	E.P.7	CONSTRUCCION DE CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO DE 8 cm DE ESPESOR, DE GRANULOMETRIA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO, ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ASFALTO GRADO PG 76-22 TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE 19 mm (¾"), INCLUYE, RIEGO DE LIGA Y ACARREOS, P.U.O.T.	M3	20,846.31	\$ 3,564.34	\$ 74,303,336.59			\$3,618,668.99	\$5,548,625.78	\$5,066,136.59	\$3,739,291.29	\$4,945,514.29	\$5,186,759.89	\$5,548,625.78	\$3,136,179.79	\$5,428,003.48	\$5,789,870.38	\$4,824,891.99	\$3,980,535.89	\$3,618,668.99	\$5,186,759.89	\$5,066,136.59		\$3,618,668.99				\$74,303,336.59	
9	E.P.8	SUMINISTRO Y COLOCACION DE CAPA DE ROCHERA DE GRANULOMETRIA DISCONTINUA TIPO CASAS ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ESPESOR DE 30 mm COMPACTOS (INCLUYE RIEGO DE LIGA CON EMULSION MODIFICADA CON POLIMERO ECR-1P, CEMENTO ASFALTICO PG 76-22 Y MATERIAL PETREO), P.U.O.T.	M3	7,759.09	\$ 4,988.49	\$ 38,706,142.87																		\$11,058,897.96	\$12,164,787.78	\$15,482,457.15			\$38,706,142.87	
10	E.P.9	E.P.9 PEDRAPLEN EN UN ESPESOR DE 50 CM INCLUYE SUMINISTRO Y COLOCACION DE PEDRAPLEN CON TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO DE 10" P.U.O.T.	M3	120,720.27	\$ 745.82	\$ 90,035,589.29	\$7,361,400.38	\$5,662,615.68	\$8,682,677.37	\$7,927,661.95	\$5,661,369.53	\$7,738,908.09	\$8,116,415.81	\$8,682,677.37	\$4,907,600.25	\$8,493,923.52	\$9,060,185.09	\$7,550,154.24											\$90,035,589.29	
						\$ 504,267,597.60	\$1,335,033.79	\$24,608,599.60	\$27,300,287.43	\$41,860,440.72	\$38,220,402.40	\$28,210,297.01	\$37,310,392.82	\$39,130,411.98	\$41,860,440.72	\$23,660,249.10	\$40,950,431.14	\$41,754,287.04	\$27,500,157.97	\$16,458,753.08	\$10,755,087.33	\$11,997,853.45	\$9,029,660.17	\$14,677,566.95	\$12,164,787.78	\$15,482,457.15			\$504,267,597.60	
							\$1,335,033.79	\$25,943,633.36	\$33,243,920.81	\$95,104,361.63	\$133,324,763.93	\$161,535,060.94	\$198,845,453.76	\$237,975,865.73	\$279,836,306.46	\$303,496,555.56	\$344,446,986.70	\$386,201,273.74	\$413,701,431.71	\$430,160,184.79	\$400,915,272.12	\$452,913,125.57	\$461,942,785.74	\$476,620,352.69	\$488,785,140.45	\$504,267,597.60	\$504,267,597.60			\$504,267,597.60
							0.26%	4.89%	5.41%	8.30%	7.58%	5.59%	7.40%	7.78%	8.30%	4.69%	8.12%	8.28%	5.45%	3.26%	2.13%	2.38%	1.79%	2.91%	2.41%	3.07%			100.00%	
							0.26%	5.14%	10.56%	18.86%	26.44%	32.03%	39.43%	47.19%	55.49%	60.19%	68.31%	76.59%	82.04%	85.30%	87.44%	89.82%	91.61%	94.52%	96.93%	100.00%			100.00%	

5.6.-Programa de Obra Project Alternativa 2

Tabla 29.- Programa Project de Obra Alternativa 2.

Id	E.P. Particulares	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Unidades	CANTIDAD	P.U	Gantt Chart Timeline																							
									01 abril	01 julio	01 septiembre	01 noviembre	01 febrero	01 abril	01 junio	01 septiembre	01 noviembre	01 enero	02/05	06/05	11/07	15/08	19/09	24/10	28/11	02/01	06/02	13/03	17/04	22/05	26/06	31/07
1		INICIO DE TRABAJOS	0 días					\$0.00	01/07																							
2		PAVIMENTOS	432.88 días	vie 01/07/22	lun 19/02/24			\$13,524.97	[Gantt bar for PAVIMENTOS]																							
3	E.P. 1	RECORTE DE LA CARPETA ASFALTICA DE 9 CM DE ESPESOR, P.U.O.T.	262.91 días	vie 01/07/22	jue 29/06/23	M3	25,052.77	\$306.78	[Gantt bar for RECORTE DE LA CARPETA]																							
4	E.P. 2	EXCAVACION Y ACARREO AL BANCO DE DESPERDICIO DE LA CAPA DE BASE Y TERRACERIAS, PUOT.	241.18 días	vie 08/07/22	mié 07/06/23	M3	360,344.04	\$246.87	[Gantt bar for EXCAVACION Y ACARREO]																							
5	E.P. 3	PEDRAPLEN EN UN ESPESOR DE 50 CM INCLUYE SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE PEDRAPLEN CON TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO DE 10", P.U.O.T.	190.44 días	lun 01/08/22	jue 20/04/23	M3	120,720.27	\$745.82	[Gantt bar for PEDRAPLEN]																							
6	E.P. 4	FORMACION Y COMPACTACION DE SUBYACENTE DE 50 CM DE ESPESOR COMPCTADA AL 95% DE LA M.V.S.M. DETERMINADO CON LA PRUEBA AASHTO ESTANDAR, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, ACARREOS, FORMACION Y COMPACTACION, P.U.O.T.	284.5 días	lun 01/08/22	lun 28/08/23	M3	118,209.27	\$605.08	[Gantt bar for FORMACION Y COMPACTACION DE SUBYACENTE]																							
7	E.P. 5	FORMACION Y COMPACTACION DE SUBRASANTE DE 30 CM DE ESPESOR, COMPACTADA AL 100% DE LA M.V.S.M. DETERMINADO CON LA PRUEBA AASHTO ESTANDAR, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, COMPACTACION, ACARREOS Y FORMACION, P.U.O.T.	306.73 días	vie 12/08/22	mar 10/10/23	M3	66,740.56	\$643.10	[Gantt bar for FORMACION Y COMPACTACION DE SUBRASANTE]																							
8	E.P. 6	CONSTRUCCIÓN DE SUBBASE HIDRÁULICA, COMPACTADA AL 100 % DE SU MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA DE LA PRUEBA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, INCLUYE, MATERIAL DE BANCO, COMPACTACIÓN, ACARREOS Y FORMACIÓN, P.U.O.T.	307.09 días	dom 21/08/22	mié 18/10/23	M3	43,998.23	\$791.65	[Gantt bar for CONSTRUCCIÓN DE SUBBASE HIDRÁULICA]																							
9	E.P. 7	BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO, P.U.O.T.	327.91 días	vie 05/08/22	mié 01/11/23	M3	32,239.38	\$1,618.98	[Gantt bar for BASE ESTABILIZADA]																							
10	E.P. 8	RIEGO DE IMPREGNACION CON EMULSION ASFALTICA DE ROMPIMIENTO LENTO ECI-60 A RAZÓN DE 1.0 LTS/M², INCLUYE, SUMINISTRO, APLICACIÓN Y ACARREOS, P.U.O.T.	327.91 días	lun 15/08/22	jue 09/11/23	LT	224,075.00	\$13.86	[Gantt bar for RIEGO DE IMPREGNACION]																							
11	E.P. 9	CONSTRUCCIÓN DE CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO DE 8 cm DE ESPESOR, DE GRANULOMETRIA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO, ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ASFALTO GRADO PG 76-22 TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE 19 mm (%4), INCLUYE RIEGO DE LIGA Y ACARREOS, P.U.O.T	351.09 días	lun 15/08/22	mar 12/12/23	M3	20,846.31	\$3,564.34	[Gantt bar for CONSTRUCCIÓN DE CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO]																							
12	E.P. 10	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CAPA DE RODADURA DE GRANULOMETRIA DISCONTINUA TIPO CASAA ELABORADA Y COMPACTADA EN CALIENTE CON ESPESOR DE 30 mm COMPACTOS (INCLUYE RIEGO DE LIGA CON EMULSION MODIFICADA CON POLIMERO ECR -1P, CEMENTO ASFALTICO PG 76-22 Y MATERIA	46.55 días	sáb 16/12/23	lun 19/02/24	M3	7,759.09	\$4,988.49	[Gantt bar for SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CAPA DE RODADURA]																							

Proyecto: Project Cd Valles Cocon Fecha: vie 10/06/22	Tarea		Tarea inactiva		Informe de resumen manual		Hito externo		Progreso manual	
	División		Hito inactivo		Resumen manual		Fecha límite			
	Hito		Resumen inactivo		solo el comienzo		Tareas críticas			
	Resumen		Tarea manual		solo fin		División crítica			
	Resumen del proyecto		solo duración		Tareas externas		Progreso			

Página 1

5.7.- Análisis y Comparativa de las Alternativas 1 y 2 de Rehabilitación

A continuación, se presenta una tabla comparativa con los atributos, ventajas y desventajas de ambas alternativas de rehabilitación con el objetivo de determinar la que represente las mejores condiciones técnicas, económicas y de seguridad para el Fiduciario y el usuario final de la Autopista

Tabla 30.- Análisis y Comparativa Alternativas 1 y 2.

Núm.	Descripción:	Alternativa 1			Alternativa 2			Conclusiones:
		Descripción:	Ventajas:	Desventajas:	Descripción:	Ventajas:	Desventajas:	
1	Costo:	\$265,183,835.45 Más IVA	Opción que ofrece el menor costo de ejecución.		\$504,267,597.60 Más IVA		Costo de \$239,083,762.15 por arriba de la opción 1, que representa un -66% de costo adicional.	La alternativa 1 es económicamente más conveniente para el Fiduciario, pues implica economías importantes resultado de una reestructuración acorde a las necesidades del contrato en cuanto a la vigencia que los estándares de desempeño deben tener.
2	Plazo de ejecución:	01 de julio de 2022 al 21 de julio de 2023 386 días naturales 13 meses	Menor tiempo de ejecución.		01 de julio de 2022 al 19 de febrero de 2024 599 días naturales 20 meses		Mayor plazo de ejecución, 44% adicional.	La alternativa 1 presenta mayores ventajas en términos del menor plazo de ejecución que implica no realizar desvíos de tráfico a causa de las obras durante dos periodos vacacionales, dic22 y mar23.
3	Reestructuración del pavimento y terracerías:	3 cm CASAA 8 cm Carpeta 15 cm Base espumada. 15 cm Subbase 25 cm Subrasante estabilizada con cal. Bacheo aislado en su caso.	El espesor total de 66 cm cumple satisfactoriamente con el ciclo de vida remanente para efectos de la vigencia del contrato.		3 cm CASAA 8 cm Carpeta. 15 cm Base espumada. 20 cm Subbase 30 cm Subrasante de banco 50 cm Subyacente de banco 50 cm Pedraplén.	El espesor total de 126 cm cumple satisfactoriamente con el ciclo de vida remanente para efectos de la vigencia del contrato.	Se tiene una profundidad de excavación tal que incrementa el riesgo de derrumbes o desprendimiento de material de las paredes del corte debido al tráfico e inestabilidad del propio material.	La alternativa 1 resulta más viable debido a que otorga capacidad de carga y estabilidad a la capa de terracería al estabilizarse la capa de subrasante existente con cal viva reduciendo la profundidad de excavación, considerando bacheo adicional en los casos que lo ameriten.

Núm.	Descripción:	Alternativa 1			Alternativa 2			Conclusiones:
		Descripción:	Ventajas:	Desventajas:	Descripción:	Ventajas:	Desventajas:	
4	Seguridad para el usuario.		Menor altura de excavación que reduce la posibilidad de derrumbes e inestabilidad del corte. Menor plazo de ejecución y reducción de molestias.				Mayor altura de excavación y prolongación de las afectaciones y molestias al usuario por una mayor duración de los trabajos.	La alternativa 1 representa una mayor seguridad y reducción de incomodidades al usuario.

5.8.- Costo Beneficio

De acuerdo con los valores de estructura de pavimentos que se obtuvieron anteriormente podemos hacer un análisis financiero Figura 35, los ahorros en construcción con una base espumada pueden llegar hasta un 31%, en comparación con una estructura convencional como lo es la base asfáltica.

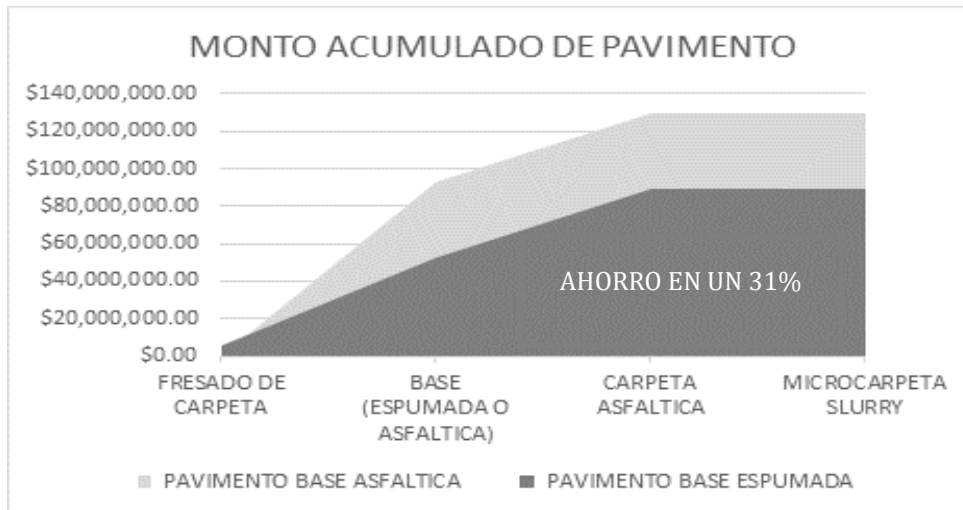


Figura 35 – Monto Acumulado de Pavimento.

En la Figura 36, se puede observar que el costo de una base asfáltica convencional está muy por arriba de una base espumada, con el consumo a menor cantidad de materiales de banco virgen y asfalto se pueden lograr cambios importantes en cuestión financiera.

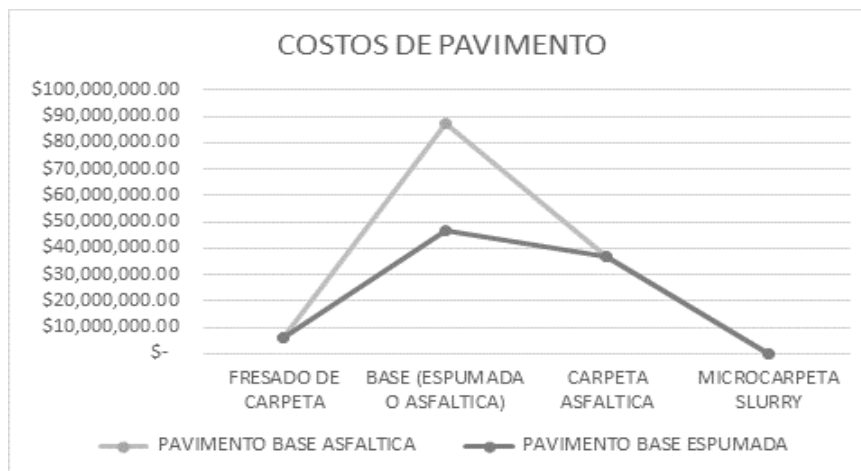


Figura 36 – Costo de Pavimento.

Haciendo un análisis histórico del precio de consumo de asfalto (el mismo asfalto para ambas bases), la gráfica de la Figura 37 muestra una tendencia al incremento en los costos por lo que el trabajar con un proceso constructivo como el asfalto espumado beneficia de una forma muy significativa.

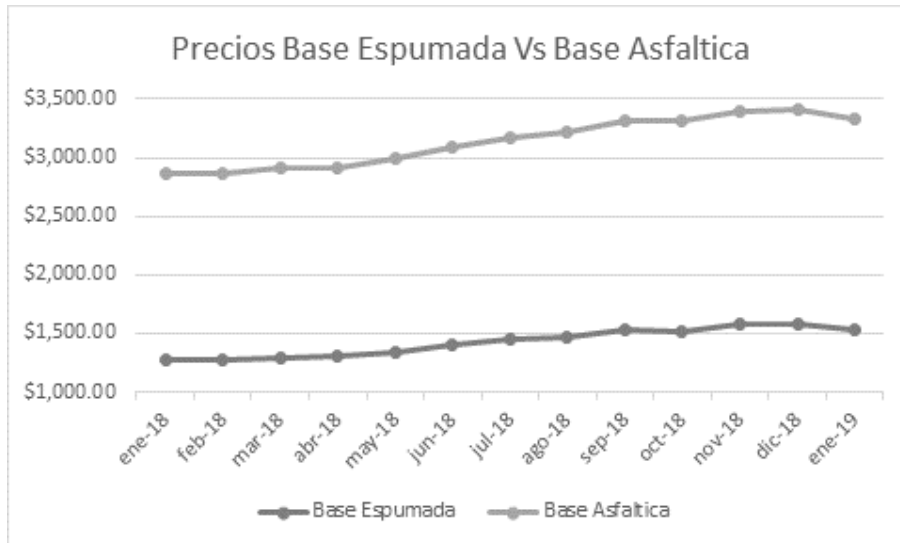


Figura 37 – Precio Base Espumada Vs Base Asfáltica.

6.- Recomendaciones

En cuanto a las recomendaciones es importante mantener en buenas condiciones la estructura del tramo; para ello hay factores que pueden ayudar a prevenir los deterioros del pavimento entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

- La incidencia de los vehículos pesados, sobre todo aquellos vehículos que podrían estar transitando con niveles de sobrecarga.

Se recomienda efectuar aforos de pesaje dinámico en el transcurso de un día (00:01 a 23:59), con esta información es posible elaborar espectros de carga los cuales representan histogramas de frecuencia de cada uno de los pesos de los ejes.

- El cuidar y preservar los activos carreteros que pueden incidir en el comportamiento de la estructura.

Se recomienda mantener las obras de drenaje superficiales y subterráneas de este subtramo carretero en condiciones operativas favorables, evitando la acumulación de azolve, el taponamiento de alcantarillas y con ello la canalización de agua hacia las capas inferiores del pavimento ocasionando el incremento de esfuerzos de poro y la disminución de la capacidad portante de la cimentación del pavimento.

- Revisión de la estructura de pavimentos.

Se recomienda mantener en buenas condiciones la estructura del pavimento, cada año se debe revisar la estructura si las capas presentan daños tales como desprendimiento de carpeta, fisuras y baches en cuyo caso es importante realizar una rehabilitación, lo anterior para lograr cumplir con los estándares de desempeño.

Conclusiones

SITUACIÓN ACTUAL:

- La Estructura Actual del Pavimento presenta una falla estructural por la falta de capacidad y de espesor, fundamentalmente en la base estabilizada con “PowerCem”.
- La sección analizada presenta variaciones en la capacidad estructural, teniendo como resultado el fenómeno de fatiga en las capas estabilizadas con “PowerCem”.
- Lo anterior genera fallas en la carpeta asfáltica, provocando la presencia de humedad y por consiguiente deterioros en el pavimento de forma constante a lo largo de tramo.
- Se obtuvieron valores de módulos elásticos por debajo de la Norma tanto para la base estabilizada como para la carpeta asfáltica.
- La sección actual presenta una Vida Remanente por Fatiga de 1 año.
- El cálculo de la Vida Remanente por Deformación arroja un valor de 13 años.
- **Debe reconstruirse estructuralmente el pavimento para cumplir por fatiga en los materiales estabilizados con asfalto.**

PROPUESTAS DE SOLUCIÓN:

- ✓ **Alternativa 1**, la cual garantiza una VIDA REMANENTE INTEGRAL.
- ✓ El alcance de la reconstrucción contempla el retiro de la base estabilizada, así como de la subrasante actual. En su lugar, se construirá una subrasante estabilizada con cal; capa de subbase hidráulica; capa de base estabilizada con asfalto espumado y finalmente la carpeta asfáltica y capa de rodadura. Adicionalmente se realizarán trabajos de Bacheo profundo Aislado con la inclusión de un pedraplén.
- ✓ **El monto de la intervención asciende a la cantidad de \$ 265.18 millones + IVA y requiere un período de construcción de 15 meses.**
- ✓ **Alternativa 2**, la cual garantiza una VIDA REMANENTE INTEGRAL por encima de los 20 años.
- ✓ Garantiza la estabilidad de las terracerías, así como la capacidad de carga de la estructura de pavimento.

- ✓ El alcance de la reconstrucción contempla el retiro TOTAL de la sección construida, es decir, desde las terracerías, para proceder a la construcción de una capa de pedraplén a todo lo largo y ancho de la sección afectada. Sobre esta capa se procede a construir las nuevas capas de terracerías y pavimento de acuerdo con el diseño estructural sugerido.
- ✓ **El monto de la intervención asciende a la cantidad de \$ 504.27 millones + IVA y requiere un período de construcción de 21 meses.**

CONCLUSIÓN:

1. El tramo presenta una falla estructural que no puede ser corregida a nivel de la estructura de pavimento.
2. Fallas en calidad de materiales y en el diseño provocaron colapso de la base estabilizada con PowerCem.
3. Se debe proceder a la reconstrucción de la sección con intervención a nivel de estructura de pavimento o desde las terracerías.
- 4. Desde el punto de vista costo-beneficio, la mejor alternativa es la segunda, es decir, intervenir desde las terracerías.**
5. Por cuestiones presupuestales, la opción más conveniente resulta la primera alternativa.
6. En ambos casos se sugiere sustituir la base estabilizada con PowerCem por una Base Estabilizada con Asfalto Espumado y reutilizando parte del material fresado.

Bibliografía

1. AASHTO T180, (2018), American Association of state Highway and Transportation Oficial-AASHTO Standards.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1993),” Guide for design of Pavement structures”, Washington DC, EUA.
3. ASTM D422, (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Withdrawn 2016, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
4. ASTM D4123-82 (1995) “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures”.
5. Cal R. y Cárdenas J. (2007). “Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones”, Octava edición, Editorial Alfaomega, México DF.
6. G. Anguas, P., & H. Domínguez, R. (2013). Manual de Usuario IMTPAVE 1.1. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.
7. G. de Rus, J. Campos y G. Nombela. (2003) Economía de transporte, Antoni Bosch Editor, Barcelona, España.
8. Hugo R. Q, Fredy Reyes. L. (2015) Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño 1a. ed. – Bogotá : Ecoe Ediciones, 2015.
9. Instituto Mexicano del Transporte IMT (2018). “Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado”, Post-profesional, Sanfandila Querétaro, México.
10. Instituto Mexicano del Transporte IMT (2014). “Análisis y diseño mecanicista de pavimentos en carreteras mexicanas”, Curso de actualización Post-profesional, Sanfandila Querétaro, México.
11. M-MMP-4-07-020/17 MMP. Métodos de muestreo y pruebas de materiales, materiales para Pavimentos.
12. N.CMT.1.01/02 Características de los materiales, materiales para terracerías, materiales para Terraplen.
13. N.CMT.1.02/02 Características de los materiales, materiales para terracerías, materiales para Subyacente.
14. N CMT 1 03/02. CMT Características de los materiales, materiales para terracerías, materiales para Subrasante.
15. N-CMT-1-04-19 CMT Características de los materiales, materiales para terracerías, materiales tratados con cal para terracerías.
16. N.CMT.4.02.001/11. CMT Característica de los materiales, materiales para pavimentos, materiales para subbases y bases, materiales para subbases.
17. N.CMT.4.02.001/16 CMT Característica de los materiales, materiales para pavimentos, materiales para subbases y bases, materiales para subbases.

18. N-CTM-4-05-004/18 Característica de los materiales, materiales para pavimentos, materiales asfálticos y mezclas. Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG).
19. N-CSV-CAR-1-03-010-17 CSV. Conservación, Car. Carreteras Evaluación. Determinación de las Deflexiones en un pavimento (DEF).
20. Mohammad L., Abadie C. y Farsakh M. (2003). "Louisiana Experience with Foamed Recycled Asphalt Pavement Base Materials", Louisiana Transportation Research Center, Transportation Research Board (TRB), Washington, EUA.
21. Ruckel P.J., Accott S.M. y Bowering R.H., (1982), Foamed asphalt paving mixture: preparation of design mixes and treatment of test specimens, Transportation Research Board (Transportation Research Record 911), Washington DC.
22. Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT (2014). "Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal", Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014, México, DF
23. TG2 (2009), Technical Guideline, Bitumen Stabilised Materials, Pretoria. Vol. 2.
24. Wirgen GMBH, (2016). Analisis preliminaries para determinar la calidad del material aglomerado, Wirgen GmbH, Windhagen, Alemania. Vol.1, pp.12-13
25. Wirgen GMBH, (2016). Betún Espumado, Wirgen GmbH, Windhagen, Alemania. Vol.1, pp. 08-09
26. Wirgen GMBH, (2012). Cold Recycling Manual, Wirgen GmbH, Windhagen, Germany. Vol.1
27. www.academia.edu.-Catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la república mexicana SCT.
28. Zarate M. (2009). "Análisis de la respuesta de pavimentos flexibles, utilizando el deflectómetro de impacto HWD", Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC, Revista técnica Asfáltica, No. 19, pp.3-18, México DF.

Anexos

MEMORIAS DE CÁLCULO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS (PROPUESTA DE REHABILITACIÓN EN TRAMO II, KM 100+000 AL KM 118+640 (A2))

A) MÉTODO AASHTO 93 (Rehabilitación con base espumada y estabilización de subrasante con cal)

A continuación, se presenta la secuencia de cálculo para la revisión de espesores del pavimento de la rehabilitación del tramo km 100+000 al km 118+300.

Los datos de tránsito y configuración vehicular se muestran a continuación:

De lo anterior, para el cálculo de los ejes sencillo equivalentes acumulados de 8.2 ton (ESALS) con el método AASHTO 93 se tiene:

Porcentaje de vehículos ligeros = 63.5%

Porcentaje de vehículos pesados = 36.5%

Para los vehículos pesados y críticos en el diseño, se considerarán 80% cargados y 20% vacíos.

Para el cálculo de los ESALS se considerarán los siguientes valores adicionales:

Confiability = 90%

$Z_r = -1.282$

$S_o = 0.45$

P_o (Índice de servicio inicial) = 4.2

P_t (Índice de servicio final) = 2.5

En la Tabla 31, se muestran los factores de daño para cada uno de los vehículos considerado en el diseño y el cálculo de los ESALS para el periodo de 20 años de servicio, siendo de 17,299,588 (recuadro amarillo).

Tabla 31.-. Cálculo de Ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALS).

Tipo de vehículo	Comp. Vehic.	Porcentaje Cargado/Vacío		Tráfico presente	Coefficiente ESAL	ESALS anuales	ESALS de diseño
A2	0.608	Cargado	1.00	203,279	0.0008	159	5,795
		Vacío	0.00	0	0.0004	0	0
A'2	0.000	Cargado	1.00	0	0.0605	0	0
		Vacío	0.00	0	0.0017	0	0
B2	0.015	Cargado	0.80	4,012	3.5540	14,259	518,924
		Vacío	0.20	1,003	0.6106	612	22,290
B3	0.012	Cargado	0.80	3,210	3.2315	10,372	377,460
		Vacío	0.20	802	0.1725	138	5,039
B4	0.000	Cargado	0.80	0	3.1367	0	0
		Vacío	0.20	0	0.1179	0	0
C2	0.036	Cargado	0.80	9,629	3.5540	34,222	1,245,418
		Vacío	0.20	2,407	0.0649	156	5,683
C3	0.047	Cargado	0.80	12,571	3.2315	40,623	1,478,384
		Vacío	0.20	3,143	0.0814	256	9,308
C2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	7.8398	0	0
		Vacío	0.20	0	0.0743	0	0
C2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	130.3392	0	0
		Vacío	0.20	0	51.3041	0	0
C3 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	7.5172	0	0
		Vacío	0.20	0	0.0908	0	0
C3 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	7.4361	0	0
		Vacío	0.20	0	0.0884	0	0
T2 - S1	0.000	Cargado	0.80	0	5.6969	0	0
		Vacío	0.20	0	0.1045	0	0
T2 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	5.6158	0	0
		Vacío	0.20	0	0.1195	0	0
T3 - S2	0.124	Cargado	0.80	33,167	5.2932	175,559	6,389,031

		Vacio	0.20	8,292	0.0842	699	25,422
T3 - S3	0.042	Cargado	0.80	11,234	4.5518	51,134	1,860,916
		Vacio	0.20	2,808	0.0818	230	8,356
T2 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	9.9827	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0913	0	0
T3 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	9.6601	0	0
		Vacio	0.20	0	0.1035	0	0
T3 - S2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.1134	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0964	0	0
T3 - S2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	6.1711	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0925	0	0
T3 - S2 - R4	0.116	Cargado	0.80	31,027	4.7140	146,260	5,322,793
		Vacio	0.20	7,757	0.0878	681	24,771
T3 - S3 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	4.1936	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0847	0	0
Totales				334,340		475,360	17,299,588

A continuación, se describen los coeficientes de capa empleados en las propuestas de rehabilitación:

- Carpeta Asfáltica (a_1) = 0.430

Para esta capa, se está considerando un valor de módulo resiliente (M_r) de 3000 MPa (435,113 psi). Con el nomograma AAHTO 93 correspondiente a las carpetas asfálticas, se introduce el valor de módulo resilientes de 3000 MPa (435,113 psi) en el eje horizontal, se levanta una vertical hasta interceptar la línea negra y después se proyecta una línea

horizontal al eje vertical para obtener el coeficiente de capa a_1 , que para este caso será 0.430.

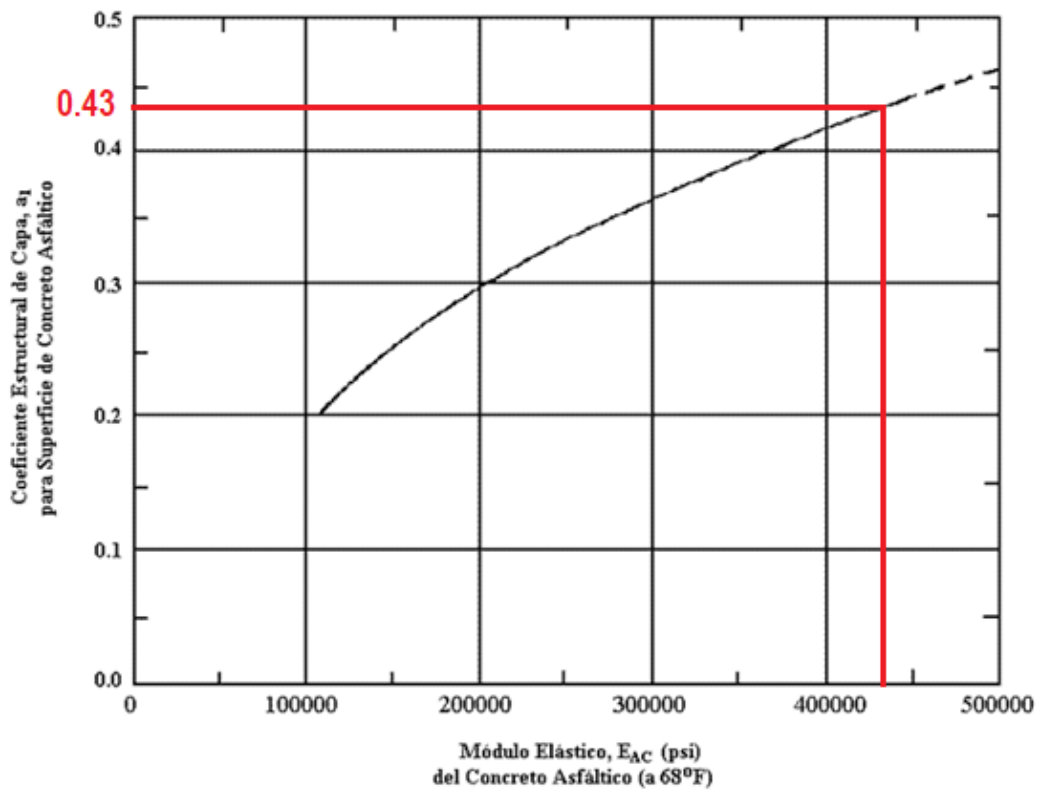


Figura 38.- Nomograma AASHTO 93 para determinación de coeficientes de capa para carpetas asfálticas. [2]

- Base espumada (a_2) = 0.205

Para esta capa, se está considerando un valor de módulo resiliente de 1200 MPa (174,075 psi). Con el nomograma AAHTO 93 de la Figura 39, correspondiente a las bases estabilizadas (base espumada), se introduce el valor de módulo resilientes de 1200 MPa (174,075 psi) en el eje vertical de la extrema derecha y se traza una horizontal hasta

interceptar la línea vertical de la extrema izquierda para obtener el coeficiente de capa a_2 , que para este caso será 0.205.

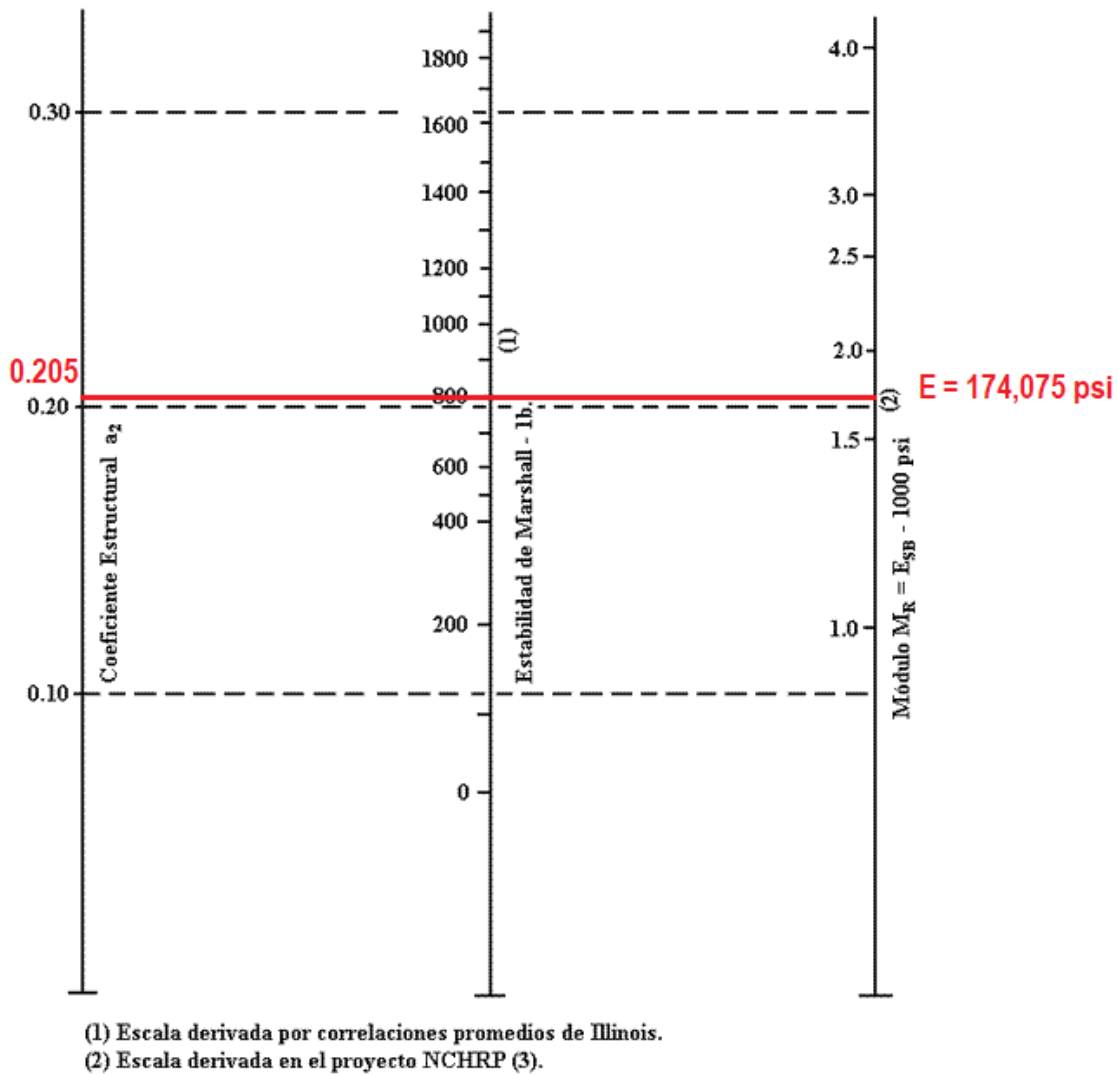


Figura 39.- Nomograma AASHTO 93 para determinación de coeficientes de capa para bases estabilizadas (bases espumadas). [2]

- Sub-base hidráulica (a_3) = 0.13

Para esta capa, se está considerando un valor de CBR de 60%. Con el nomograma AAHTO 93 de la Figura 40, correspondiente a las subbases hidráulicas, se introduce el valor de CBR de 60% en el eje vertical correspondiente al CBR y se traza una horizontal hasta interceptar

la línea vertical de la extrema izquierda para obtener el coeficiente de capa a3, que para este caso será 0.13.

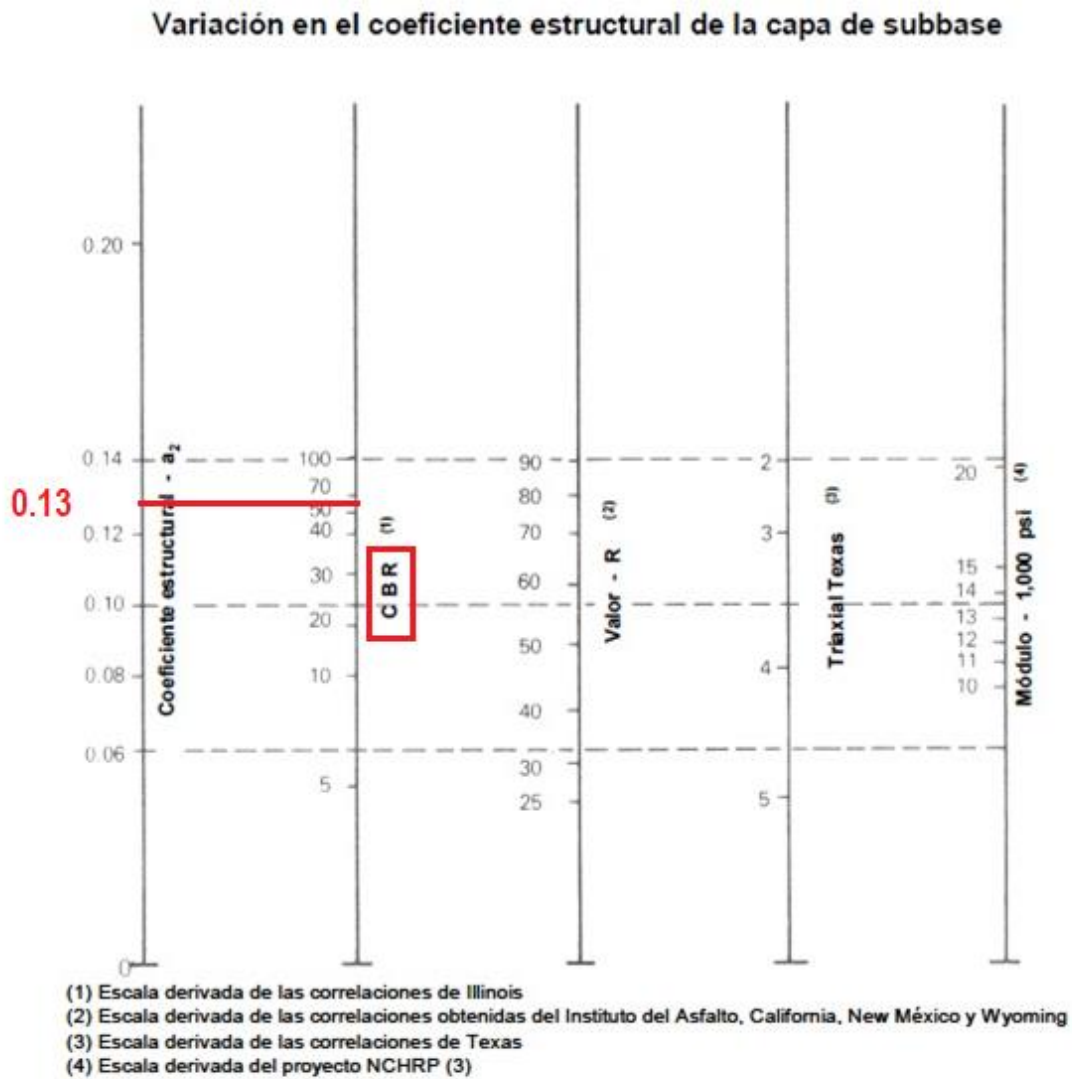


Figura 40.- Nomograma AASHTO 93 para determinación de coeficientes de capa para bases estabilizadas (subbase hidráulica). [2]

Para la subbase y utilizando la correlación del Instituto de Ingeniería de la UNAM que transforma CBR a Módulo resiliente se tiene lo siguiente:

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (CBR)}^{0.7}$$

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (60)}^{0.7}$$

$$Mr = 2284 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mathbf{Mr = 32,472 \text{ psi}}$$

Para la subrasante estabilizada con 3% de cal y de las pruebas de CBR obtenidas por Calidra, se utilizará un CBR = 66.3%

Al igual que para la subbase, si se utiliza la correlación del Instituto de Ingeniería de la UNAM que transforma CBR a Módulo resiliente se tiene lo siguiente:

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (CBR)}^{0.7}$$

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (66.3)}^{0.7}$$

$$Mr = 2449 \text{ kg/cm}^2$$

Mr = 34,833 psi

Para los coeficientes de drenaje, se considerará que el porcentaje de tiempo en el que el pavimento estará expuesta al nivel de humedad será de 5-25% por las variaciones estacionales del año.

Para la capa de base espumada y subbase hidráulica se consideran los siguientes valores de acuerdo con la Tabla 32

Base espumada (m_2) = **1.10**

Subbase hidráulica (m_3) = **1.10**

Tabla 32.- Coeficientes de drenaje (m) según AASHTO 93.

Características del drenaje	Agua evacuada en	Porcentaje de tiempo en el año que la estructura de pavimento está expuesta a un nivel de humedad			
		<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	2 horas	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.2
Bueno	1 día	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1
Regular	1 semana	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.8
Pobre	1 mes	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.6
Muy malo	No drena	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.4

En la Tabla 33, se muestra el resumen de resultados de diseño con la incorporación de todos los coeficientes de capa y de drenaje descritos con anterioridad. En el recuadro amarillo se tiene los ESALS de tránsito que debe de resistir la estructura de pavimento en función del número estructural requerido (SN_{req}). En el recuadro azul se muestran los ESALS que son capaces de soportar la estructura del pavimento, los cuales son mayores a los requeridos por tránsito. Por tanto, la estructura de pavimento cumple para los

requerimientos de tránsito de proyecto de 20 años y calidades planteadas de los materiales.

Tabla 33.-. Resumen Final de diseño AASHTO 93 para base espumada.

Tránsito de diseño				Tránsito de la Estructura			
Esal_{req} =	17,299,588	SN_{req} =	3.26	Esal_{adm} =	24,134,591	6,835,003	Cumple
Diseño estructural del Pavimento							
Capa del pavimento	E psi	a*	m**	CBR %	Estructura		
					Espesor in	Espesor (cm)	SN***
Carpeta Asfáltica	435,113	0.430			3.15	8.00	1.35
Base Espumada	174,075	0.205	1.10		4.72	12.00	1.07
Sub-base hidráulica	32,441	0.130	1.10	60.0	5.91	15.00	0.84
Subrasante	34,833			66.3			
						Total =	3.26

B) MÉTODO IMT PAVE 3.0 (Rehabilitación con base espumada y estabilización de subrasante con cal)

Los datos de tránsito y configuración vehicular se muestran a continuación:

TDPA (2020) = 1832 vehículos

Factor sentido = 0.5 (2 carriles de circulación)

Factor carril = 1.0 (1 carril por sentido)

TDPA proyecto (2020) = (1832) (0.5) (1.0) = 916 vehículos

Periodo de análisis = 20 años

Tasa de crecimiento obtenida por mínimos cuadrados (a partir de 2020) = 5.9%

Configuración vehicular:

A = 60.8 %

B2 = 1.5%

B3 = 1.2%

C2 = 3.6%

C3 = 4.7%

T3-S2 = 12.4%

T3-S3 = 4.2%

T3-S2-R4 = 10.4%

Otros = 1.2%

Total = 100%

Para este análisis se considerará un espectro de carga legal, según la recomendación del programa del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). En Figura 41 y Figura 42, se muestran las carátulas de tránsito y espectro de carga respectivamente, comentado anteriormente.

TDPA (veh/día)

Factor de Distribución por:

Sentido









Carril

Horizonte de Proyecto:

Vida (años)

Tasa de crecimiento %

Clasificación Vehicular:

A	<input type="text" value="60.8"/>	
B2	<input type="text" value="1.5"/>	
B3	<input type="text" value="1.2"/>	
C2	<input type="text" value="3.6"/>	
C3	<input type="text" value="4.7"/>	
T3-S2	<input type="text" value="12.4"/>	
T3-S3	<input type="text" value="4.2"/>	
T3-S2-R4	<input type="text" value="10.4"/>	
Otros	<input type="text" value="1.2"/>	
SUMA	<input type="text" value="100.0"/>	

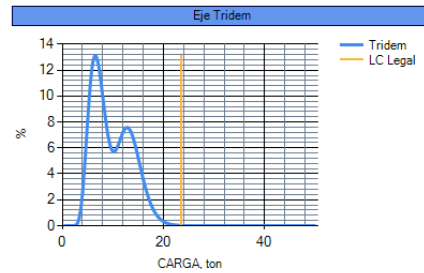
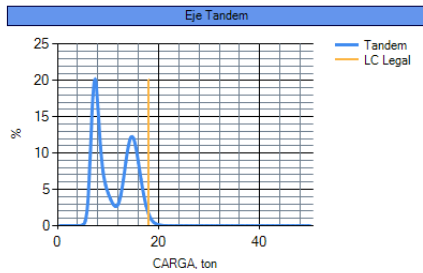
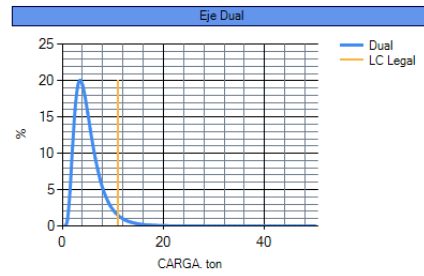
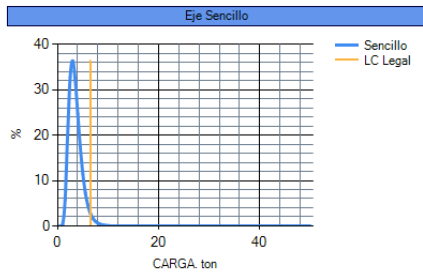


Volumen de tránsito para el horizonte de proyecto

Tipo de Eje	%	# Repeticiones
Sencillo	30.69	231,182.5
Dual	4.12	31,027.1
Tandem	61.79	465,406.8
Tridem	3.39	25,551.8

Figura 41.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Tránsito. [2]

NIVEL DE CARGA



*LC Legal = Límite de carga legal

Figura 42.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Espectro de carga. [6]

Para la carpeta asfáltica considerada, se tomará un valor de módulo dinámico de 5000 MPa (recordar que con esta prueba se encuentra calibrado el programa IMT PAVE).

Para la base espumada se considerará un valor de módulo resiliente de 1200 MPa.

Para la subbase y utilizando la correlación del Instituto de Ingeniería de la UNAM que transforma CBR a Módulo resiliente se tiene lo siguiente:

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (CBR)}^{0.7}$$

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (60)}^{0.7}$$

$$Mr = 2284 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mathbf{Mr = 224 MPa}$$

Para la subrasante estabilizada con 3% de cal y de las pruebas de CBR obtenidas por Calidra, se utilizará un **CBR = 66.3%**

Al igual que para la subbase, si se utiliza la correlación del Instituto de Ingeniería de la UNAM que transforma CBR a Módulo resiliente se tiene lo siguiente:

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (CBR)}^{0.7}$$

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (66.3)}^{0.7}$$

$$Mr = 2449 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mathbf{Mr = 240 MPa}$$

Para la capa subyacente, se tiene un valor promedio de CBR de 26.4%. Si se utiliza la correlación del Instituto de Ingeniería de la UNAM que transforma CBR a Módulo resiliente se tiene lo siguiente:

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (CBR)}^{0.7}$$

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (26.4)}^{0.7}$$

$$Mr = 1285 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mathbf{Mr = 126 MPa}$$

Para el cuerpo del terraplén, se tiene un valor promedio de CBR de 32.8%. Si se utiliza la correlación del Instituto de Ingeniería de la UNAM que transforma CBR a Módulo resiliente se tiene lo siguiente:

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (CBR)}^{0.7}$$

$$Mr \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 130 \text{ (32.8)}^{0.7}$$

$$Mr = 1496 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mathbf{Mr = 147 MPa}$$

En la Figura 43, se muestra la carátula del diseño espectral del pavimento donde se incorporan el valor de las rigideces en MPa antes mencionadas.

En la Figura 44, se muestra la carátula del diseño probabilista del pavimento donde se incorporan las variaciones estacionales de las rigideces de las capas del pavimento. Para

un nivel de confianza del 90%, la sección propuesta cumple para el periodo de diseño de 20 años.

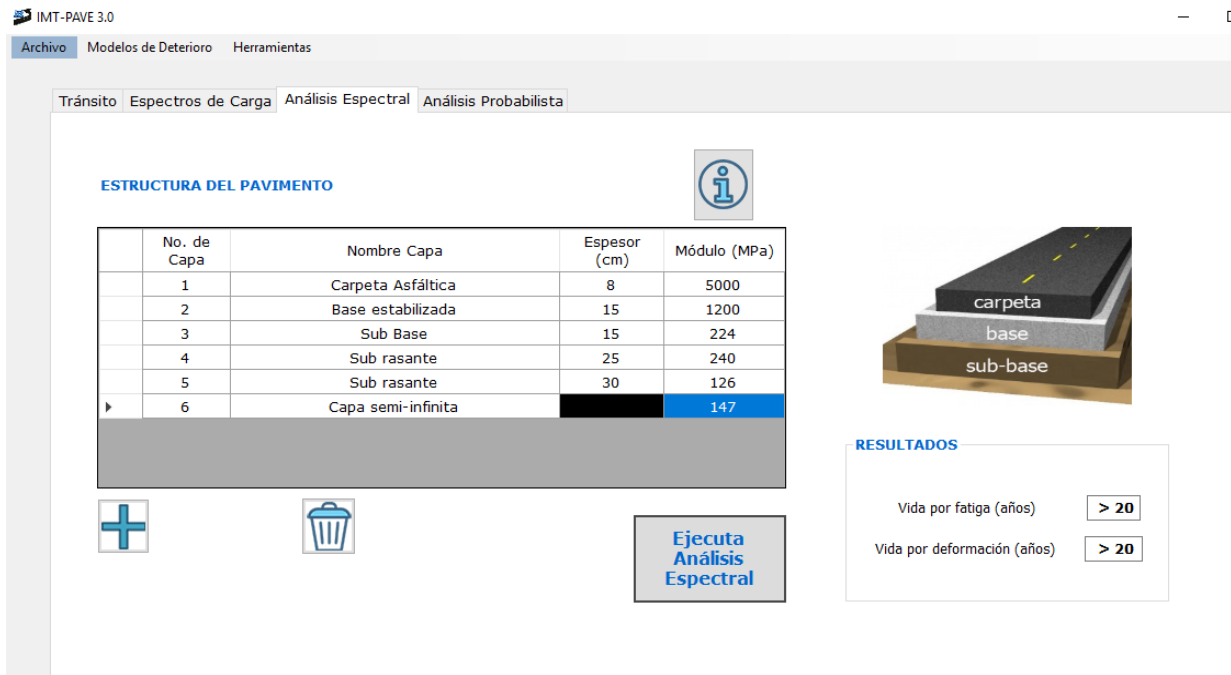


Figura 43.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Análisis Espectral. [6]

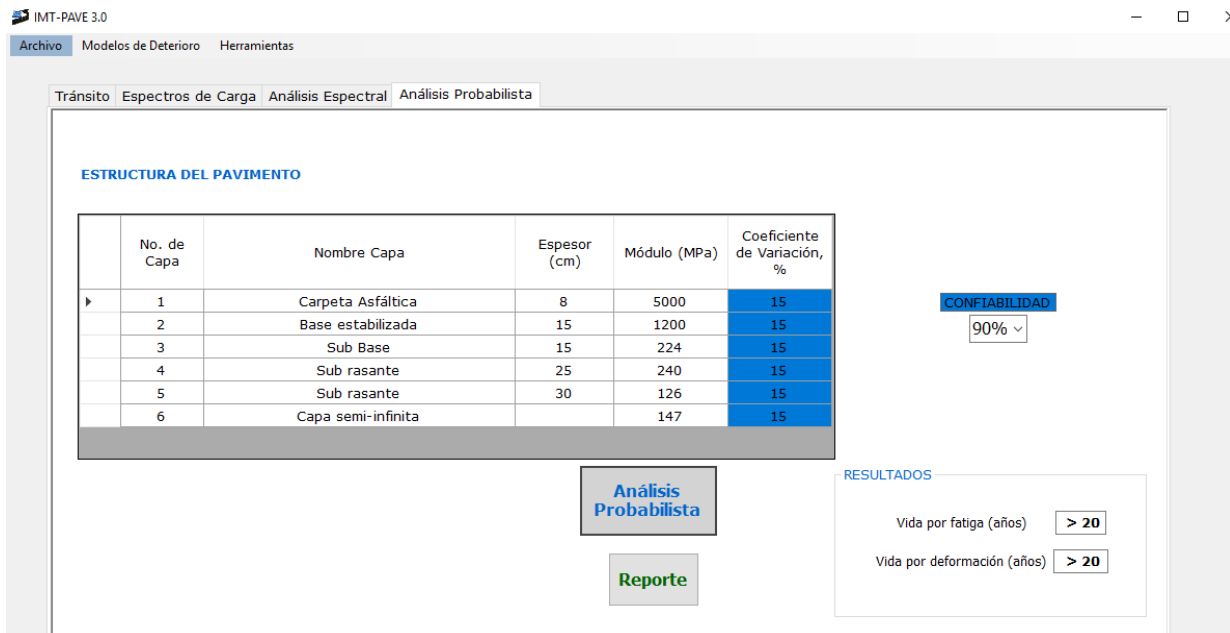


Figura 44.- Carátula IMT PAVE 3.0 correspondiente al Análisis Probabilista. [6]