

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Alejandro Medina Angulo, Ing. Álvaro Aguilar Dondi, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.


P/ Braulio E. Umaña Q.

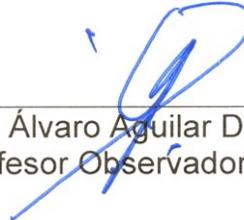
Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Guía



Ing. Alejandro Medina Angulo.
Profesor Lector



Ing. Álvaro Aguilar Dondi.
Profesor Observador

**Diseño de la estructura de pavimento
mediante la metodología
mecánica-empírica para tres rutas
cantonales ubicadas en Heredia**

Abstract

The Ministerio de Obras Públicas y Transportes through the Programa de Red Vial Cantonal seeks to provide road infrastructure to all the cantons of the country, to improve interconnection and accelerate the movement of products.

This project seeks to size the pavement structure for three sections that are part of the program PRVC-1 MOPT/BID and that are located in Santo Domingo, San Pablo and Santa Bárbara of Heredia.

For each section, the design of three types of pavement is proposed: flexible, semi-rigid and rigid; through the AASHTO 93 methodology to determine the required thicknesses and with the mechanistic-empirical methodology to check that the proposed dimensions meet the established thresholds.

For the specific case of flexible and semi-rigid pavement, the CR-ME software is used to verify that the thicknesses meet the acceptance criteria.

For the rigid pavement the revision is done using performance models found in the literature.

Finally, we analyze which type of pavement is best suited to each particular case, based on the results obtained and the preferences of each specific municipality.

Keywords: Pavement, AASHTO 93, Mechanism-Empirical, CR-ME, costs.

Resumen

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes por medio del Programa de Red Vial Cantonal busca dotar de infraestructura vial a todos los cantones del país, para mejorar la interconexión y acelerar el movimiento de productos.

Este proyecto busca dimensionar la estructura de pavimento para tres tramos que forman parte del programa PRVC-1 MOPT/BID y que se encuentran ubicados en Santo Domingo, San Pablo y Santa Bárbara de Heredia.

Para cada tramo se propone el diseño de tres tipos de pavimento: flexible, semi-rígido y rígido; por medio de la metodología AASHTO 93 para determinar los espesores requeridos y con la metodología mecanística-empírica para revisar que las dimensiones propuestas cumplan con los umbrales establecidos.

Para el caso específico del pavimento flexible y semi-rígido, se emplea el software CR-ME para verificar que los espesores encontrados cumplan con los criterios de aceptación.

Para el pavimento rígido la revisión se realiza empleando modelos de desempeño encontrados en la literatura.

Finalmente, se analiza cual tipo de pavimento se ajusta más a cada caso en particular, con base en los resultados obtenidos y las preferencias de cada municipalidad en específico.

Palabras claves: Pavimento, AASHTO 93, Mecánico-Empírico, CR-ME, costo.

Diseño de la estructura de pavimento mediante la metodología mecánica-empírica para tres rutas cantonales ubicadas en Heredia

MARÍA FERNANDA CERDAS VALVERDE

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2018

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

Índice

Índice de figuras	2
Índice de cuadros	4
Prefacio	7
Resumen Ejecutivo	9
Introducción	11
Marco Teórico	16
Metodología	36
Resultados	68
Análisis de los resultados	109
Conclusiones	121
Recomendaciones	123
Apéndices	124
Anexos	152
Referencias	163

Índice de figuras

1.	Ubicación geográfica del Tramo a diseñar, Santo Domingo.	11
2.	Ubicación geográfica del Tramo a diseñar, San Pablo.	12
3.	Ubicación geográfica del Tramo a diseñar, Santa Bárbara.	13
4.	Estructura de pavimento flexible.	17
5.	Estructura de pavimento semi-rígido.	17
6.	Estructura de pavimento rígido.	18
7.	Detalle del pavimento de concreto con juntas.	19
8.	Detalle del pavimento reforzado y con juntas.	20
9.	Detalle del pavimento continuamente reforzado.	20
10.	Ubicación de la prueba y los circuitos construidos en ella.	23
11.	Diseño Mecanístico-empírico.	28
12.	Sectorización en dos escenarios diferentes para el tramo de Santo Domingo. . .	37
13.	Sectorización en dos escenarios diferentes para el tramo de San Pablo.	38
14.	Transferencia de carga entre dovelas.	48
15.	CR-ME, interfaz principal.	54
16.	Módulo de Tránsito.	55
17.	Módulo de datos climáticos.	57
18.	Capas de la estructura de pavimento.	58
19.	Propiedades de la mezcla asfáltica.	58
20.	Propiedades del ligante asfáltico.	59
21.	Información de la base granular.	60
22.	Información de la base estabilizada con cemento.	60
23.	Información de la sub-rasante.	61
24.	PITRA PAVE, interfaz principal.	62
25.	Capas de la estructura de pavimento.	62
26.	Cargas sobre el pavimento.	62
27.	Puntos de medición en el pavimento.	63
28.	Resultados del modelo.	63
29.	AP-Rigid, interfaz principal.	64
30.	Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.	70
31.	Porcentaje de daño, de área agrietada y agrietamiento longitudinal para la car- peta asfáltica.	71
32.	Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.	71
33.	Resultados del modelo.	72
34.	Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.	73
35.	Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.	74
36.	Resultados del modelo.	74

37.	Respuestas mecánicas de la estructura de pavimento.	77
38.	Paquete estructural para cada tipo de pavimento.	78
39.	Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.	80
40.	Porcentaje de daño, de área agrietada y agrietamiento longitudinal para la carpeta asfáltica.	81
41.	Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.	81
42.	Resultados del modelo.	82
43.	Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.	83
44.	Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.	84
45.	Resultados del modelo.	84
46.	Respuestas mecánicas de la estructura de pavimento.	87
47.	Paquete estructural para cada tipo de pavimento.	88
48.	Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.	90
49.	Porcentaje de daño, de área agrietada y agrietamiento longitudinal para la carpeta asfáltica.	90
50.	Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.	91
51.	Resultados del modelo.	92
52.	Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.	92
53.	Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.	93
54.	Resultados del modelo.	93
55.	Respuestas mecánicas de la estructura de pavimento.	95
56.	Paquete estructural para cada tipo de pavimento.	96
57.	Variación de la inversión inicial según el tipo de pavimento.	100
58.	Variación de la inversión inicial según el tipo de pavimento.	102
59.	Variación de la inversión inicial según el tipo de pavimento.	104
60.	Variación del costo de mantenimiento según el tipo de pavimento.	105
61.	Variación del costo de mantenimiento según el tipo de pavimento.	107
62.	Variación del costo de mantenimiento según el tipo de pavimento.	108

Índice de cuadros

1.	Cumplimiento del material existente para ser utilizado con sub-base, graduación B	38
2.	Factores camión para pavimento flexible y semi-rígido	40
3.	Características de la sub-rasante para Santo Domingo	51
4.	Características de la sub-rasante para San Pablo	51
5.	Características de la sub-rasante para Santa Bárbara.	52
6.	Características de la sub-base granular.	52
7.	Características de la base granular.	53
8.	Características de la mezcla asfáltica.	53
9.	Tipos de deterioros y nivel de severidad	68
10.	Cálculo de ejes equivalentes de diseño para pavimento flexible y semi-rígido	69
11.	Estructura de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93	69
12.	Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93	70
13.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos	70
14.	Estructura de pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93	72
15.	Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93	72
16.	Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA	73
17.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos	73
18.	Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA	74
19.	Diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93	75
20.	Diseño de acero de refuerzo	75
21.	Modelo de Fatiga	76
22.	Modelo de bombeo y erosión	76
23.	Escalonamiento	76
24.	Modelo de Fatiga	77
25.	Modelo de bombeo y erosión	78
26.	Escalonamiento	78
27.	Cálculo de ejes equivalentes de diseño para pavimento flexible y semi-rígido	79
28.	Estructura de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93	79
29.	Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93	79
30.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos	80
31.	Estructura de pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93	82
32.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93	82
33.	Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA	83
34.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos	83
35.	Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA	84

36.	Diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93	85
37.	Diseño de acero de refuerzo	85
38.	Modelo de Fatiga	85
39.	Modelo de bombeo y erosión	86
40.	Escalonamiento	86
41.	Modelo de Fatiga	87
42.	Modelo de bombeo y erosión	87
43.	Escalonamiento	88
44.	Cálculo de ejes equivalentes de diseño para pavimento flexible y semi-rígido . .	88
45.	Estructura de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93 . .	89
46.	Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASH- TO 93	89
47.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos	89
48.	Estructura de pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93	91
49.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93	91
50.	Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA	92
51.	Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos	92
52.	Cumplimiento del modelo de PCA	93
53.	Diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93	94
54.	Diseño de acero de refuerzo	94
55.	Modelo de Fatiga	94
56.	Modelo de bombeo y erosión	94
57.	Escalonamiento	95
58.	Modelo de Fatiga	95
59.	Modelo de bombeo y erosión	96
60.	Escalonamiento	96
61.	Excavación	97
62.	Capa de concreto asfáltico preparado en planta colocada y compactada	97
63.	Base de agregados, graduación D	98
64.	Sub-base de agregados, graduación B	98
65.	Riego de imprimación	99
66.	Costo inicial del pavimento flexible	99
67.	Costo inicial del pavimento semi-rígido	100
68.	Costo inicial del pavimento rígido	100
69.	Costo inicial del pavimento flexible	101
70.	Costo inicial del pavimento semi-rígido	101
71.	Costo inicial del pavimento rígido	102
72.	Costo inicial del pavimento flexible	103
73.	Costo inicial del pavimento semi-rígido	103
74.	Costo inicial del pavimento rígido	103
75.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento flexible	104
76.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento semi-rígido	105

77.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento rígido	105
78.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento flexible	106
79.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento semi-rígido	106
80.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento rígido	106
81.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento flexible	107
82.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento semi-rígido	107
83.	Estimación del costo de mantenimiento para pavimento rígido	108

Prefacio

Costa Rica posee una de las redes viales más densas de América Latina pues cuenta con 76 kilómetros de vía por cada 100 kilómetros cuadrados de superficie. De esa totalidad, el 80 % es red vial cantonal, de la cual el 94 % se encuentra en un estado entre regular y malo. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2016b).

La cantidad de vehículos aumenta día con día y con ello la necesidad de dar mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción a las vías existentes.

Además, se debe considerar que el sistema de transporte terrestre es primordial para el desarrollo de las diferentes regiones; pues facilita la movilización de las personas, el transporte de productos, el comercio y la industria.

Resulta fundamental tratar el problema y buscar soluciones en todos los ámbitos, debido a que muchas veces se le da especial énfasis solo a la red vial nacional sin considerar que el 80 % de la totalidad de red vial forma parte de los diferentes cantones y que en algunas ocasiones las municipalidades no están capacitadas o no pueden afrontar las necesidades a nivel local.

Por todo lo mencionado anteriormente, es que en la actualidad el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) cuenta con el primer Programa de Red Vial Cantonal PRVC-1, el cual se encuentra en su segundo tracto. Dicho programa es financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo y busca dotar de infraestructura vial a todos los cantones del país, dar a las municipalidades la capacitación para su personal y herramientas tecnológicas para que posean las competencias necesarias y avancen de manera independiente.

El programa continúa ejecutándose con excelentes resultados y se invierten esfuerzos y recursos para el logro de sus objetivos pues como se sabe el país posee una gran deficiencia en este campo, son muchas las rutas que requieren intervención y con el paso del tiempo sino se les da mantenimiento, se tendrán más rutas que intervenir; no es un secreto el gran reto que afronta el país por lo que apuntar por este tipo de programas es una excelente alternativa.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, este proyecto busca dimensionar la estructura de pavimento para tres tramos que forman parte del programa PRVC-1 MOPT/BID, que se encuentran en Santa Bárbara, Santo Domingo y San Pablo de Heredia. A pesar de que los tres tramos se localizan en la misma provincia, cada uno tiene sus características particulares y de igual forma, cada municipalidad tiene preferencias, necesidades y requerimientos diferentes; por lo tanto, cada caso se analiza de forma independiente.

Para cada tramo se propone el diseño de tres tipos de pavimento: flexible, rígido y semi-rígido; por medio de la metodología mecánica-empírica para evaluar los espesores de las capas propuestas con un diseño previo realizado con el método empírico AASHTO 93. Además, se realiza una estimación del costo para cada tramo y se analiza cual tipo de pavimento se ajusta más a cada ruta en particular.

El proyecto busca apoyar el programa impulsado por el MOPT y otorgar un diseño completo de la estructura de pavimento para cada tramo, de manera que se solucione la problemática que existe actualmente, para proveer una superficie de ruedo cómoda y segura, en donde las personas se trasladen de una manera ágil y eficiente.

Al ser diseñado por medio de una metodología mecánica-empírica que considera las condiciones particulares del sitio, se asegura una mayor durabilidad de la estructura de pavimento. Finalmente, agradecer a las personas e instituciones involucradas en la ejecución de este proyecto; en primer lugar, a Dios y a la Virgen por haberme permitido llegar hasta este punto tan importante de mi formación profesional, a mi madre, Flory Cerdas, por levantarme todas las veces que he caído y por impulsarme a seguir adelante.

Al Tecnológico de Costa Rica y a la Escuela de Ingeniería en Construcción por la formación académica. En especial a mi profesor guía, el Ing. Sergio Fernández, por transmitirme sus conocimientos y ayudarme a concluir este proyecto de la mejor manera posible.

Al Ing. Hugo Chaves, al Ing. Juan Carlos Elizondo y al Ing. Jonathan Rojas del Ministerio de Obras Públicas y Transportes por sus consejos.

A la Unidad Técnica de Gestión Vial de cada cantón por el interés presentado y a LanammeUCR por las capacitaciones brindadas.

Resumen Ejecutivo

El MOPT con su Programa de Red Vial Cantonal financia obras de infraestructura vial en todos los cantones del país, lo que representa un gran apoyo para las municipalidades, no solo desde el punto de vista económico, sino que, también, las ha dotado de herramientas tecnológicas y de conocimiento.

En algunos casos existe un mayor interés por las rutas nacionales, por lo que se descuida de este modo las vías cantonales, precisamente esto es lo que trata de evitar el MOPT con su programa pues conoce de la importancia de estas rutas a nivel nacional. Con la ejecución del primer tracto se han obtenido innumerables beneficios a lo largo del país y se busca que el segundo tracto se comience a ejecutar en el presente año y continúe ayudando a diferentes cantones.

Este proyecto busca apoyar la iniciativa del MOPT y otorgar el diseño completo de la estructura de pavimento para tres tramos ubicados en Santo Domingo, San Pablo y Santa Bárbara de Heredia.

Para cada tramo se diseñó la estructura de tres tipos de pavimento: flexible, rígido y semi-rígido; por medio de la metodología AASHTO 93 y se revisó el diseño con la metodología mecanística-empírica. Ésta última al considerar datos más certeros y específicos del lugar como las características de los materiales presentes, el tránsito y el clima de la zona; garantiza con mayor seguridad que la estructura de pavimento se encontrará en buenas condiciones durante el periodo de diseño.

Adicionalmente, se estimaron los costos de construcción inicial y de mantenimiento para cada tipo de pavimento; esto para obtener un aproximado de los costos que acarrea cada estructura, no solo en la etapa constructiva sino también el mantenimiento que implica el emplear un tipo de pavimento o el otro.

Con base en los resultados obtenidos se recomendó el tipo de pavimento que más se ajusta a cada caso en particular.

Los tramos en cuestión constituyen caminos de mucha importancia pues son vías alternas de conexión entre cantones, sin embargo, sus malas condiciones ocasionan que la cantidad de usuarios sea mínima. Ante la situación planteada, para la realización de los diseños y la estimación del TPD se consideraron factores de expansión que toman en cuenta el aumento que se dará en el tránsito una vez que se intervenga la ruta.

Aunado a esto, para la realización correcta de los diseños fue necesario conocer las características del suelo en cada cantón; el MOPT fue la institución que proporcionó los informes de los ensayos de laboratorio que se requerían.

Como también fue necesario considerar el clima de la zona tomando en cuenta las precipitaciones y las temperaturas medias mensuales, se utilizó información suministrada por el Instituto Meteorológico Nacional de estaciones automáticas cercanas al lugar.

De igual forma, los otros datos necesarios para el diseño se obtienen de la literatura y de consultas a profesionales del área.

Al realizar el diseño de la estructura de pavimento se busca solucionar la problemática presente en los diferentes sitios pues al tener niveles tan altos de deterioro el camino deja de ser cómodo y seguro, lo que ocasiona excesivos costos de transporte y operación que generan descontento de la población e inconvenientes en el ámbito social.

Igualmente, al mejorar la condición de las rutas se busca lograr una adecuada interconexión cantonal con la generación de pasos alternos en buenas condiciones que mejoren y agilicen el transporte de productos y personas.

Por lo que es fundamental realizar un diseño adecuado para obtener el desempeño deseado durante su vida útil; además debe ser un proceso técnicamente balanceado, con un costo mínimo de modo que no se sobre-diseñe o que se diseñe con espesores menores a los requeridos y correctamente fundamentado para lograr que la inversión de recursos sea eficiente.

Una vez realizado el diseño de cada tipo de pavimento se consideran una serie de factores como: el costo económico, el tiempo de colocación, la facilidad constructiva, el tipo de tránsito que predomina y el desempeño general; para elegir el que mejor se adapta a cada caso en particular. Para los tres cantones se considera que la opción más adecuada es la construcción de un pavimento flexible pues se tienen rutas de bajo tránsito vehicular y, además, porque coincide con el tipo de pavimento que planeaban construir las municipalidades en el 2012. También se consideraron aspectos específicos de cada lugar que inciden en la toma de decisiones.

Para el cantón de Santo Domingo se recomendó la colocación de un pavimento flexible con 7 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 30 cm de sub-base; con un costo de construcción inicial de ₡226 679 683.550 y un costo de mantenimiento de ₡36 895 950.000.

Para San Pablo se consideró como la mejor opción un pavimento flexible con 5 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base granular y 30 cm de sub-base; lo que representa un costo inicial de ₡113 926 198.258 pues considera que se tiene un material en sitio que se decidió emplear como sub-base. De igual forma, se tiene un costo aproximado de mantenimiento de ₡36 659 815.920.

En Santa Bárbara se recomendó la construcción de una estructura de pavimento con 5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 15 cm de sub-base. El costo de construcción asciende a ₡151 477 896.128 y el de mantenimiento a ₡18 152 807.400.

Una de las ventajas que ofrece el pavimento flexible es que posee el menor costo de construcción inicial; si bien el costo de mantenimiento es el más alto como se tiene una cantidad muy pequeña de ejes equivalentes de carga se espera que las intervenciones requeridas para la conservación sean mínimas.

Los documentos realizados por la municipalidad en el 2012 poseen un peso significativo en la elección de la alternativa que más se ajusta a cada cantón, ya que corresponde a lo que los municipios planeaban construir pues consideraban que dicha solución sería suficiente y adecuada para cumplir con las solicitudes impuestas por el tránsito. Para todos los tramos, se evidencia el interés por el pavimento flexible.

De igual forma, tiene el tiempo de apertura al tránsito menor lo cual es fundamental para los usuarios de la vía. Otro aspecto importante es que posee mayor facilidad de reconstrucción o rehabilitación.

Además, una acera con ancho de 1.20 m y cordón y caño de 0.65 m. Luego posee 300 m de un tratamiento superficial, el cual se encuentra en mal estado pues hay presencia de huecos, y finalmente, se tiene lastre. Tanto el tratamiento como la sección con lastre poseen un ancho de calle de 7 m y ausencia de cordón, caño y acera. El segundo se ubica en San Pablo con una extensión total de 1242 m y corresponde a los códigos: Cod. 4-09-008, Cod. 4-09-010 y Cod. 4-09-012; con longitudes a intervenir de 572 m, 440 m y 230 m, respectivamente. Inicia en las Cruces y finaliza en Villa Adobe; cuenta en su mayoría con un pavimento flexible completamente deteriorado. Por lo general, posee un ancho de calle de aproximadamente 7 m y ausencia de cordón y caño.



Figura 2. Ubicación geográfica del Tramo a diseñar, San Pablo.
Fuente: Google Earth, 2018.

Finalmente, el tercer tramo se ubica en Santa Bárbara y posee el Cod. 4-04-009, corresponde a la Calle Mora, al frente del MaxiPalí de Santa Bárbara y posee una longitud de aproximadamente 1230 m. Con ancho de calle de aproximadamente 7 m y ausencia de cunetas. Con muy malas condiciones y difícil acceso para vehículos que no sean de doble tracción.



Figura 3. Ubicación geográfica del Tramo a diseñar, Santa Bárbara.
Fuente: Google Earth, 2018.

En las visitas que se realizaron a los cantones se conversó con algunas personas usuarias de las rutas en cuestión, por ejemplo: en el caso de San Pablo los vecinos comentaron la importancia de mejorar las condiciones del tramo, ya que constituye una ruta alterna y de conexión entre el cantón de San Pablo y Santo Domingo. Por otra parte, una considerable extensión está rodeada por zonas cafetaleras donde es necesario el acceso de vehículos para sacar el producto e indicaban lo difícil que resulta el ingreso al lugar por la cantidad de huecos presentes. Para el caso de Santo Domingo, de igual forma expresaban la urgencia por ser una ruta de conexión entre ambos cantones. Asimismo, manifestaban descontento por que las malas condiciones del camino ocasionan daño a los vehículos e incomodidad a las personas. Con respecto a Santa Bárbara, cabe recalcar que el tramo a intervenir se encuentra ubicado entre dos rutas nacionales, la ruta 123 y la 128, la primera comunica a Santa Bárbara con San Joaquín y la segunda permite comunicar a Santa Bárbara con Barva. El mejoramiento de las condiciones del camino es de gran importancia pues permite no solo comunicar de una manera más eficiente la ruta 123 con la 128, sino que también establece comunicación entre dos distritos importantes como son San Pedro de Barva y San Juan de Santa Bárbara. Sin embargo, las malas condiciones impiden a los habitantes transitarla cómodamente y ocasiona que muchas personas prefieran utilizar otra ruta. Como se mencionó anteriormente uno de los objetivos del programa establecido por el MOPT es mejorar la interconexión cantonal para agilizar el movimiento de personas y productos por medio de la utilización de pasos alternos, como se aprecia cada uno de los tramos expuestos

representan vías de conexión alternas que de encontrarse en buenas condiciones agilizarían considerablemente la comunicación entre poblaciones importantes.

Como expresaban los vecinos de la zona, esos caminos no son transitados por su mal estado, a pesar de que en muchas ocasiones el no utilizarlos implica recorrer distancias mayores.

Debido a las malas condiciones y a la importancia que presenta cada ruta para el respectivo cantón, dichos tramos se incluyeron dentro del Programa de Red Vial Cantonal desde inicios del 2012. Como antecedente en ese mismo año cada municipalidad prepara un documento para el MOPT que contiene la siguiente información referente al tramo a diseñar:

- Nombre del proyecto y número de propuesta.
- Localización geográfica.
- Datos del camino.
- Acabado final y evaluación.
- Descripción del proyecto.
- Impacto ambiental.
- Diseño necesario.
- Beneficiarios del proyecto.
- Plazo estimado de ejecución.
- Restricciones, limitaciones, riesgos.
- Responsables.

Las propuestas planteadas por las municipalidades solo contemplan un diseño de pavimento flexible, el cual debía ser revisado por el MOPT. A continuación, se presenta lo expuesto por cada municipalidad en el 2012:

- Para San Pablo se propone 5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 25 cm de sub-base para una sección y para la otra una sub-base granular de 30 cm.
- En Santo Domingo el documento establece una carpeta asfáltica de 7.5 cm, una base granular de 15 cm y una sub-base de 25 cm.
- Para Santa Bárbara la municipalidad no realiza el diseño de la estructura de pavimento y solo considera reacondicionar la sub-rasante y colocar una sub-base cuyo espesor no está indicado.

Por otra parte, el MOPT realiza el muestreo en los respectivos lugares y ejecuta los ensayos en su laboratorio cuyos resultados estuvieron listos a principios del año 2018, los mismos fueron suministrados para realizar el diseño de la estructura de pavimento.

Sin embargo, algunas limitaciones afectaron la realización del trabajo. Una de las primeras limitaciones fue que las longitudes de los tramos proporcionadas por el MOPT y establecidas inicialmente en la propuesta del proyecto, no coincidían con las longitudes que tenían las municipalidades. En los tres casos existe una variación respecto a la longitud del tramo, dando como resultado una reducción de 0.8 km de carretera.

Otra limitación que se debe señalar es que para la realización de los diseños se utilizaron características del material de base y sub-base que usualmente se utiliza en el cantón de San Pablo, sin embargo, no se puede asegurar que se va a emplear el mismo material para el presente proyecto. Para el caso de Santo Domingo y Santa Bárbara, las municipalidades no proporcionaron información de los materiales que comúnmente emplean por lo que se tuvo que realizar todos los diseños con los datos suministrados en San Pablo.

Con respecto a la estimación de costos, inicialmente se planeaba utilizar las mismas estructuras de costos que cada municipalidad había utilizado para elaborar el presupuesto del proyecto. No obstante, cuando se les solicita la información argumentaron que se trataba de cotizaciones que habían realizado y que no contaban con un desglose de costos; por lo que se utiliza una estructura de costos de otro proyecto cercano al sitio, que no considera los factores específicos de cada cantón.

A pesar de las limitaciones que se presentaron, se logran los objetivos planteados y se obtiene un diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido para cada ruta. Los diseños se realizan con la metodología AASHTO 93 para encontrar los espesores requeridos y se verifican por medio de la metodología mecánica-empírica, al emplear esta última metodología que toma en cuenta las características de los materiales presentes, las condiciones climáticas del lugar y los tipos de suelos de cada región; se logran obtener diseños mucho más confiables pues se consideran más factores que afectan a la estructura de pavimento.

Cabe agregar que se estima el costo de construcción y mantenimiento para cada tipo de pavimento, lo que constituye otra variable importante que se analiza para decidir cuál paquete se ajusta más a cada cantón.

Se plantea para el presente proyecto como objetivo general dimensionar la estructura de pavimento mediante la metodología mecánica-empírica con base en un diseño previo por medio de AASHTO 93 y estimación de costo para tres rutas cantonales ubicadas en Santa Bárbara, Santo Domingo y San Pablo de Heredia. Además, se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar información de las variables que se requieren para el diseño de pavimento de cada ruta.
- Diseñar la estructura de pavimento flexible, rígido y semi-rígido para cada tramo.
- Estimar costos por ruta y por tipo de pavimento.
- Recomendar el tipo de pavimento que más se ajusta a cada ruta, con base en los resultados obtenidos.

Marco Teórico

Pavimento

”Se trata de una estructura que permite la transferencia de los esfuerzos por las cargas de tránsito y el ambiente al terreno natural, de forma que no se exceda su capacidad de soporte”. (Castro, 2018a)

De igual forma, un pavimento debe proveer una superficie de ruedo cómoda, segura y durable. Además, un pavimento debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la intemperie.
- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente al desgaste que se produce por el efecto abrasivo de las llantas.
- Presentar ruido de rodadura moderado, tanto en el interior como en el exterior de los vehículos.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje, para evitar acuaplaneo o hidroplaneo.
- Presentar una regularidad superficial en la superficie de rodamiento que permita una adecuada comodidad a los usuarios.
- Ser resistente al derrapamiento, con una textura superficial adaptada a la velocidad prevista de circulación de los vehículos.
- Evitar deslumbramientos y reflejos para ofrecer una adecuada seguridad de tránsito.

Tipos de Pavimentos

Pavimento Flexible

Está formado por una capa de rodamiento constituida por mezcla asfáltica, apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. Este tipo de pavimento distribuye los esfuerzos aplicados en pequeñas áreas, debido a su menor rigidez.

Constituye un tipo de pavimento más económico en su construcción inicial, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento constante, por lo que resulta menos factible desde el punto de vista de costos para tránsitos altos.

A continuación se presenta la estructura del pavimento flexible:

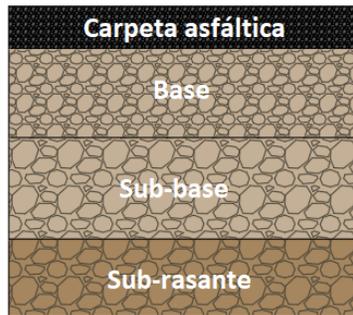


Figura 4. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: AutoCAD, 2017.

Pavimento Semi-Rígido

Compuesto por una capa asfáltica, una base de agregado estabilizado con cemento hidráulico y una sub-base de material granular.

Por lo mencionado anteriormente tiene la ventaja de ser resistente al agrietamiento por fatiga en la capa asfáltica, sin embargo, es susceptible al agrietamiento por contracción en la base estabilizada con cemento.

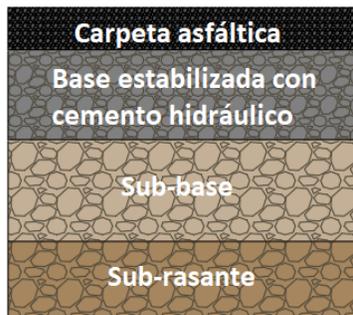


Figura 5. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: AutoCAD, 2017.

Pavimento Rígido

Su superficie de rodamiento está constituida por losas de concreto hidráulico, además posee una base y/o sub-base. Como posee mayor rigidez los esfuerzos transmitidos se reducen y se distribuyen en un área extensa, por lo que se dan deflexiones pequeñas.

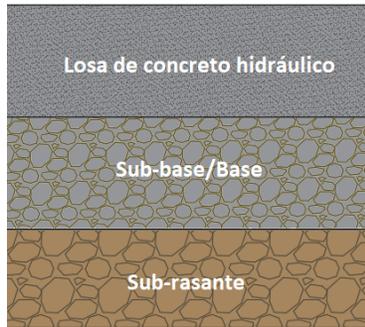


Figura 6. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: AutoCAD, 2017.

La capa de rodamiento distribuye las cargas impuestas por el tránsito hacia las capas inferiores por medio de la superficie de la losa y de las losas adyacentes, pues trabajan en conjunto. En los pavimentos rígidos para lograr un comportamiento adecuado es necesario el diseño y creación de juntas; cuya función es aliviar la contracción y expansión del concreto hidráulico ocasionados por los cambios de temperatura y de humedad, además de controlar el agrietamiento transversal y longitudinal.

Se pueden mencionar varios tipos de juntas, entre ellas están:

- Juntas transversales de contracción: controlan el agrietamiento debido a las contracciones del concreto hidráulico que pueden ser causadas por una disminución en la temperatura o contenido de humedad de la losa, su finalidad es que las grietas ocurran en las juntas y no sin obedecer ningún patrón.
- Juntas longitudinales: son construidas longitudinalmente para definir el ancho y dividir carriles de tránsito.
- Juntas transversales y longitudinales de construcción: se originan cuando el vaciado de una losa se paraliza por un tiempo mayor al de fraguado o porque se termina la jornada laboral, ya que el concreto viejo se endurece y al colocar el nuevo, se forma una división.
- Juntas de aislamiento: su finalidad es disminuir esfuerzos entre elementos y permitir el movimiento del pavimento respecto a otras estructuras existentes como alcantarillas, puentes, entre otras.

Dovelas

Son barras de acero liso que se colocan paralelas a la dirección del tránsito vehicular, al ubicarse en las juntas transversales permiten el movimiento horizontal libre de las losas.

Se encargan de distribuir la carga aplicada en losas concurrentes, disminuyen los niveles de esfuerzo y de deflexión cuando las cargas se aplican en los bordes de las losas y disminuyen los riesgos de deterioro por escalonamiento y bombeo de finos.

Barras de amarre longitudinal

Se colocan en las juntas longitudinales y su función es proveer unidad entre losas o entre una losa con el espaldón, también transfieren carga entre losas adyacentes.

Cabe agregar que existen tres tipos de pavimentos rígidos, los cuales poseen características específicas que se mencionan a continuación:

Pavimento de concreto con juntas (JPCP)

Constituye el pavimento rígido más común y tiene juntas de contracción entre las losas para un mejor control del agrietamiento. Las juntas deben ser selladas para evitar el ingreso de materiales que restrinjan el movimiento de las losas y del agua que erosiona las capas inferiores de soporte.

Posee dovelas en las juntas transversales y barras de transferencia en las juntas longitudinales. "Las losas deben ser lo suficientemente cortas como para no generar esfuerzos térmicos que excedan la resistencia de la losa a la flexo-tracción" (Castro, 2018a). El espaciamiento máximo de juntas está entre 18 y 21 veces el espesor de losa.

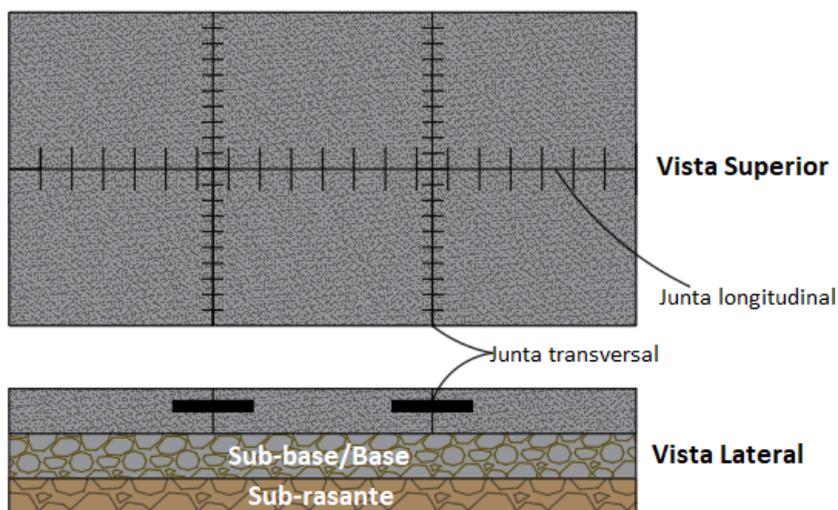


Figura 7. Detalle del pavimento de concreto con juntas.

Fuente: AutoCAD, 2017.

Pavimento reforzado y con juntas (JRCP)

La superficie de rodadura posee mallas de acero que distribuye los esfuerzos por toda la losa y juntas de contracción. Al tener malla de acero permite incrementar la distancia entre juntas, con juntas transversales más espaciadas que en JPCP.

Este pavimento contiene acero longitudinal y transversal; como se observa en la siguiente figura:

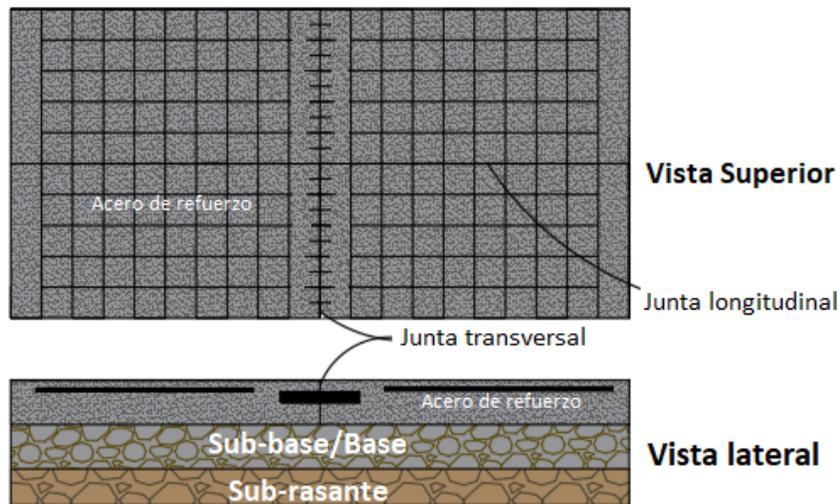


Figura 8. Detalle del pavimento reforzado y con juntas.
Fuente: AutoCAD, 2017.

Pavimento continuamente reforzado (CRCP)

Posee una malla continua de acero y se eliminan las juntas transversales de contracción, por lo que se espera la aparición de fisuras controladas a lo largo del pavimento. Contiene una malla de acero más robusta que JRCP. El refuerzo asume las deformaciones, incluyendo las de temperatura por eso no requiere de las juntas de contracción.

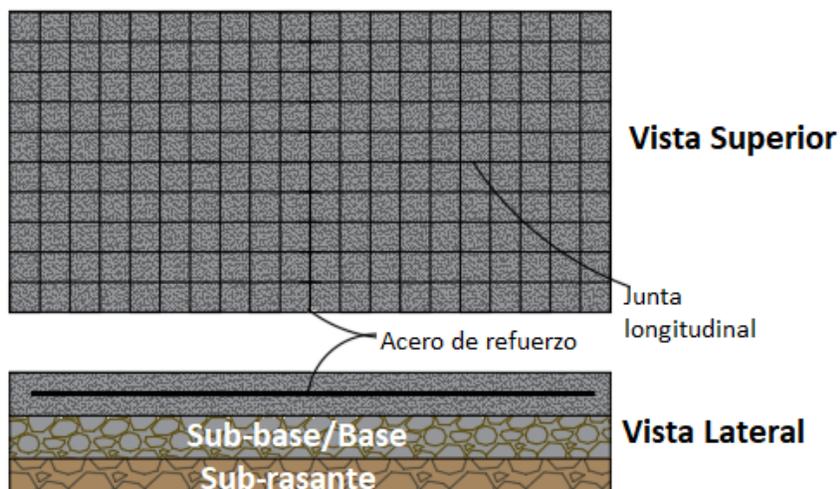


Figura 9. Detalle del pavimento continuamente reforzado.
Fuente: AutoCAD, 2017.

Estructura de pavimento

Carpeta Asfáltica

Formada por agregado, ligante asfáltico y aire. Donde el ligante asfáltico constituye el material cementante de color negro, formado principalmente por bitúmenes; "su función es aglutinar los agregados de manera que haya impermeabilidad, trabazón en la estructura interna del agregado y durabilidad" (Castro, 2018c).

Constituye la capa de rodadura que soporta directamente las cargas impuestas por el tránsito, además aporta las características funcionales como: la resistencia al derrapamiento, regularidad transversal y longitudinal, color, textura y condiciones respecto al drenaje. Aunado a esto, debe impermeabilizar el pavimento para evitar el paso de agua a las capas inferiores.

Debe ser uniforme, estable al tránsito, segura y durable.

Carpeta de concreto hidráulico

Losas de concreto hidráulico forman la superficie de rodamiento, por lo que posee una alta rigidez y alto módulo de elasticidad.

Base

Capa situada bajo la superficie de rodamiento que puede estar formada por un agregado triturado, una base asfáltica o un agregado estabilizado con emulsión asfáltica o con cemento, dependiendo del tipo de pavimento.

Su función principal es transmitir a la sub-base los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad adecuada.

Sub-base

Es la capa de material que se coloca sobre la sub-rasante y posee una función económica pues permite disminuir el espesor de capas superiores y logra que el nivel de esfuerzos que llega a la sub-rasante sea igual o menor a la resistencia de esta capa.

Además, funciona como filtro impidiendo que los finos de la sub-rasante contaminen las capas superiores y en muchos casos debe drenar el agua que se introduce en el pavimento.

También absorbe los cambios volumétricos de la sub-rasante asociados a cambios en el contenido de agua o de temperatura, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

Sub-rasante

Está formada por el suelo natural o una sustitución de material, si el existente no es de calidad; su función es recibir y soportar las cargas producidas por el tránsito que le son transmitidas de las capas superiores.

Otros conceptos

Índice de Soporte de California (CBR)

Dicho ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de densidad y humedad controlada, sirve para evaluar la calidad del suelo para sub-rasante, sub-base y base. Se encuentra regulado por la norma ASTM D1883-16 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR).

El CBR se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$CBR = \frac{Carga\ unitaria\ del\ ensayo}{Carga\ unitaria\ patron} (100\%) \quad (1)$$

Donde se observa que es un porcentaje de la carga unitaria patrón (Carga unitaria que soporta la piedra triturada).

”Por lo tanto, el CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1” ó 0.2” de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar” (Bustillos, 2010). Según el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010, existen valores mínimos de CBR que se deben cumplir. Para la sub-base el CBR mínimo corresponde a 30 y para la base, el mínimo es 80.

Penetrómetro de cono dinámico (DCP)

Su ensayo se encuentra regulado por la norma ASTM D6951M-18 Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications.

Estima la capacidad estructural in situ de las diferentes capas que conforman el pavimento y del suelo de fundación, asimismo, muestra el grado de heterogeneidad que presenta una sección.

Su principio de funcionamiento es muy simple debido a que se basa en la acción de una masa que cae desde una altura establecida, lo que ocasiona la penetración de la sonda; por lo tanto, mide la penetración para un determinado número de golpes. El DCP permite realizar diferentes gráficas y conocer cierta información; por ejemplo, la gráfica de penetración en función de los golpes acumulados permite visualizar el número de capas existentes y su espesor.

Metodología AASHTO 93

Los “Ensayos a Carreteras” que constituyen modelos a escala natural son el fundamento de los métodos actuales, es así como surge el Experimento Vial de la AASHO (USA). Cuyo inicio radica a mediados de 1951 con la selección del sitio y el establecimiento de los objetivos. En abril de 1955 se inician los trabajos de topografía, realización de planos y especificaciones. Iniciando su construcción en agosto de 1956 en el Estado de Illinois cerca de Ottawa. “En 1958 se inicia la aplicación de las cargas sobre los tramos del pavimento construido y dos años más tarde se concluye con la etapa de mediciones en campo y se inicia el análisis de la información recogida” (Corredor, 2008).

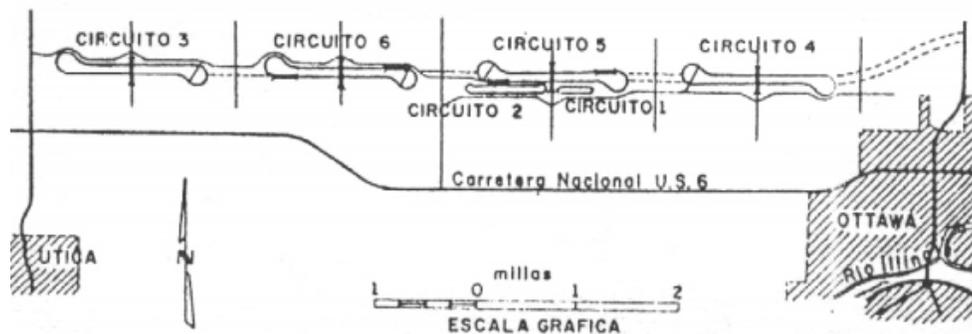


Figura 10. Ubicación de la prueba y los circuitos construidos en ella.
Fuente: Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHTO.

En 1962 se publican las primeras “Guías Provisionales para el Diseño de Pavimentos”, las cuales fueron revisadas en 1972, 1986 y 1993.

El Método de Diseño de la AASHO introdujo el concepto de falla funcional, con términos como servicapacidad (habilidad que tiene un pavimento para servir al tráfico para el cual fue diseñado) y comportamiento (habilidad para servir al tráfico a lo largo del tiempo). (Corredor, 2008).

Para las mediciones de servicapacidad se empleaba un panel de evaluadores que daba una calificación sobre la calidad del pavimento en cuanto a su funcionalidad, entre 0 y 5, siendo cero el peor nivel y cinco la mejor condición; dicha medición se definió como Present Servidability Rating (PSR).

Paralelamente se realizaban análisis estadísticos para correlacionar propiedades físicas de la calidad del pavimento con el valor del PSR.

“La predicción del valor del PSR a partir de tales medidas, se define como Present Servidability Index (PSI).” (Corredor, 2008).

Se establece el PSI como un indicador objetivo de la serviciabilidad del pavimento.

El método asume que para un pavimento nuevo el índice de serviciabilidad es alto, no obstante, conforme aumentan las repeticiones de carga de tránsito se presenta una reducción del índice o cambio de PSI (ΔPSI), lo que busca el método es llegar al final del periodo de diseño sin sobrepasar cierto nivel de serviciabilidad.

Ejes Equivalentes

Cantidad de repeticiones de ejes equivalentes simples/ duales de 8200 kg; acumuladas en el periodo de diseño.

Para efectos de cálculo, es necesario convertir todas las pasadas de diferentes vehículos en un número de pasadas de un único tipo (pasadas de ejes equivalentes).

Para determinar los ejes equivalentes para el periodo de diseño se debe conocer el tránsito promedio diario de cada vehículo que circula por esa ruta, además de la tasa de crecimiento poblacional de la zona.

Tránsito promedio diario (TPD)

Como su nombre lo indica, corresponde al número de vehículos que circulan por día en una carretera. El TPD se puede determinar por medio de conteos manuales o empleando equipos especializados.

Factor camión

" Cantidad de ejes equivalentes simples de 8200 kg que representa, en promedio, una pasada de un tipo de vehículo particular " (Castro, 2018b).

Es importante emplear los factores camión correspondientes, pues si se utilizan valores menores no se estarían contemplando las cargas reales que pasan por el pavimento.

Factor de crecimiento

Constituye un factor que considera la tasa de crecimiento anual del lugar en estudio. Al multiplicarse este factor por los ejes equivalentes anuales se obtienen los ejes equivalentes para el periodo de diseño del pavimento.

$$Factor = \frac{(1 + g)^n - 1}{g} \quad (2)$$

g: tasa de crecimiento anual (%)

n: cantidad de años

Factor direccional

Toma en cuenta la distribución vehicular por sentido; es decir, cuanto porcentaje de vehículos va en una u otra dirección. Si no se cuenta con dicha información se debe considerar una distribución 50%/50%.

Factor carril

"Se emplea porque se requiere calcular una cantidad de carga específica en el carril crítico" (Castro, 2018b).

"Para un camino de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril" (Coronado, 2002).

El carril crítico corresponde al carril de tránsito pesado; por lo tanto, cuando se tiene un carril por sentido, dicho factor es 100%.

Factor de expansión

Corresponde a un porcentaje por el que se multiplica el TPD para considerar un posible aumento de tránsito en el futuro cuando se intervenga el tramo en cuestión.

Periodo de diseño

Es el tiempo (en años) para el cual se diseña un pavimento. Afecta el espesor de diseño del pavimento pues determina por cuántos años y por lo tanto para cuántos vehículos debe ser diseñado el pavimento.

Nivel de Confianza

"Considera que el método de diseño de pavimentos AASHTO 1993 es probabilístico, de manera que los parámetros de diseño tienen un nivel de dispersión asociado, que influye en la cantidad de cargas para alcanzar el nivel de servicio terminal" (Castro, 2018b).

Desviación estándar en desempeño

Considera posibles variaciones en la predicción del tránsito y en los otros factores que afectan el comportamiento del pavimento.

Índice de servicialidad

El índice de servicialidad (PSI) es un valor cuya estimación es subjetiva y se basa en una escala que juzga la condición del pavimento, siendo 5 un pavimento perfecto y 0 un pavimento intransitable.

El PSI inicial representa la condición inicial del pavimento y, por lo tanto, va a ir disminuyendo con el tiempo hasta llegar a un PSI final, el cual es establecido dependiendo la importancia del pavimento. La diferencia entre ellos corresponde a la pérdida de servicialidad (ΔPSI).

Estadístico “Z”

”Se refiere a la posibilidad estadística de que luego de las cargas de diseño se supere el PSI terminal” (Castro, 2018b).

Coeficiente de drenaje

Los efectos del drenaje sobre el comportamiento del pavimento son considerados por medio de un coeficiente de drenaje que se emplea en el diseño, corresponde a (mi) para pavimentos flexibles y (cd) para rígidos.

Considera la calidad del drenaje en función del tiempo estimado en que la estructura de pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación y del tiempo que tarda el agua en ser evacuada de la estructura de pavimento.

Cuando un drenaje no es bueno, dicho coeficiente es menor que uno lo que obliga a realizar un diseño del paquete estructural con mayor espesor; por el contrario, al tener valores mayores a la unidad se tienen buenos drenajes y, por ende, es factible menores espesores.

Coeficiente estructural

Es necesario determinar el coeficiente estructural para la carpeta asfáltica, base y sub-base en un diseño de pavimento flexible y es una medida de la habilidad de un material para funcionar como un componente estructural en un pavimento.

Número estructural

Representa la capacidad de la estructura de pavimento para soportar las sollicitaciones impuestas por el tránsito en el periodo de análisis. Se tiene un número estructural para la carpeta asfáltica, base y sub-base.

Coeficiente de transferencia de carga

Se emplea solo en el diseño de pavimentos rígidos, considera de qué tipo es el espaldón y el pavimento y, además, si utiliza o no dovelas.

Representa la capacidad que tiene una losa de transmitir las fuerzas cortantes a sus losas adyacentes.

Módulo Resiliente

Considerado como la propiedad fundamental para caracterizar los materiales que constituyen la estructura de pavimento y se define como la relación del esfuerzo desviador entre la deformación recuperable del suelo sometido a carga cíclica.

Existen varias formas para obtener el módulo resiliente de bases granulares o suelos, se determina a partir de correlaciones con el CBR, por medio de modelos mecánicos, a través de valores típicos que dependen de la clasificación del material o por medio del ensayo módulo resiliente en laboratorio.

Metodología Mecánica-Empírica

Para 1993 a pesar de que se disponía con una versión racional, los procedimientos eran completamente empíricos y limitados, principalmente cuando se consideraba el tránsito de vehículos pesados, además no se visualizan los efectos del clima en el desempeño de los pavimentos en otros lugares ya que la prueba de rodado AASHO se encuentra en un sitio específico.

A partir de la década de los noventa diversos diseñadores empezaron a cuestionar la metodología AASHO 93; lo que ocasiona el inicio de una guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica que estuviera basada en propiedades de los materiales, con la influencia del clima y con ecuaciones de transferencia que transformen las respuestas del pavimento en tipos de deterioros.

Fue en el 2002 cuando la AASHO propone el Método empírico-mecanicista para diseño de pavimentos.

A nivel nacional, a pesar de que constituye una guía muy completa, es difícil de aplicar pues la misma está desarrollada para características específicas de su país de origen. No obstante, la metodología de diseño sí puede ser calibrada y utilizada en nuestro país (Leiva, 2002).

Cabe mencionar que “sí es posible para países latinoamericanos desarrollar guías de diseño de pavimentos alternativas a la AASHO 93 y al MEPDG, a un costo razonable, basado en el conocimiento ingenieril de los diseñadores y mediante el uso racional de las propiedades de materiales propios y procesos de calibración adaptados al clima y tipos de suelo de cada región” (Loría, 2013).

LanammeUCR, a través de su Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP) ha realizado toda una línea de investigaciones para la generación de la primera guía de diseño mecánica-empírica para Costa Rica. De igual forma, crea el software CR-ME desarrollado en Visual Basic 6.0 que permite mejorar la calidad de los diseños de estructuras de pavimentos a nivel nacional, pues considera variables como el clima, las características de los materiales y el tránsito.

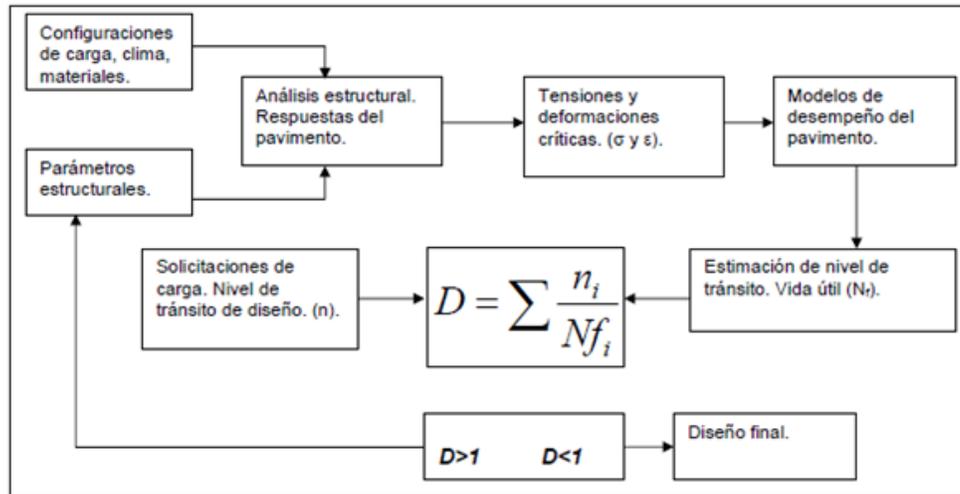


Figura 11. Diseño Mecánico-empírico.
Fuente: Guía de Diseño Mecánica Empírica.

Módulo Dinámico

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima.

Para determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica se emplean los siguientes: ensayos de laboratorio, nomogramas y correlaciones.

Entre los métodos que emplean correlaciones o fórmulas están:

- Bonnaure y otros: toma en cuenta cuatro factores para determinar el módulo dinámico del asfalto y, a partir de éste, determinar el de la mezcla asfáltica.
- Del Instituto del Asfalto: tiene la particularidad de utilizar la viscosidad del asfalto como otra variable.
- Heukelom y Klomp: determina el módulo dinámico de la mezcla asfáltica a partir de los porcentajes en volumen de los constitutivos de la mezcla y del módulo dinámico del asfalto.
- Witczak: Considera la composición de la mezcla asfáltica y posee una única ecuación.

Cada método al presentar características particulares hacen que el valor del módulo varíe levemente, es por esto que la mejor alternativa es determinar el módulo dinámico por medio de ensayos, ya que considera las condiciones propias del entorno para el cual se diseña la mezcla; mientras que en los otros casos no todas las variables son consideradas y por eso los resultados son un poco mayores, precisamente para prevenir si dichas variables llegan a influir.

La ventaja de emplear el método de correlaciones es porque constituye un proceso más corto; es por esto que si se logra utilizar dichas correlaciones pero calibrando los coeficientes de la mismas para las mezclas asfálticas con materia prima nacional, se obtienen resultados más reales, rápidos y se disminuyen las diferencias de los resultados del laboratorio con respecto a los modelos.

Precisamente lo expuesto anteriormente es lo que realiza LanammeUCR en el 2007, dicha entidad parte de la ecuación del modelo de Witczak y por medio de herramientas estadísticas y métodos iterativos obtiene una solución que brinda mejores resultados.

Ecuación del modelo Lanamme-Witczak:

$$\log E^* = 5.535833 + 0.002087\rho_{200} - 0.000566(\rho_{200})^2 - 0.002590\rho_4 - 0.078763V_a - 1.865947\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + \frac{2.399557 + 0.000820\rho_4 - 0.013420\rho_{3/8} + 0.000261(\rho_{3/8})^2 + 0.005470\rho_{3/4}}{1 + e^{(0.052941 - 0.498163 \log(f) - 0.6918561 \log(n))}} \quad (3)$$

E^* = módulo dinámico (psi)

f = frecuencia de carga (Hz)

V_a = contenido de vacíos de aire (%)

V_{beff} = contenido de asfalto efectivo (% por volumen)

$\rho_{3/4}$ = porcentaje retenido acumulado en el tamiz 19 mm (3/4 pulg)

$\rho_{3/8}$ = porcentaje retenido acumulado en el tamiz 9.53 mm (3/8 pulg)

ρ_4 = porcentaje retenido acumulado en el tamiz $N^\circ 4$ (4.75 mm)

ρ_{200} = porcentaje pasando el tamiz $N^\circ 200$

n = viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

$$n = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} \quad (4)$$

CR-ME el software de la primera guía de diseño mecánica-empírica presenta tres opciones para el cálculo del módulo dinámico, el usuario decide si lo realiza con el modelo Witczak-Lanamme, Witczak o ANN-Lanamme.

Modelos de desempeño para pavimento flexible y semi-rígido

Al utilizar la metodología mecanística-empírica y el software CR-ME se deben emplear los siguientes modelos de deterioro para la carpeta asfáltica, base granular, base estabilizada con cemento hidráulico, sub-base y sub-rasante.

Carpeta asfáltica

Para el agrietamiento de abajo hacia arriba, se emplea el Modelo Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG):

$$N_f = 0.00432 * k_{f1} * (C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}*\beta_{f2}}(E_{CA})^{k_{f3}*\beta_{f3}} \quad (5)$$

$$C = 10^{4.84[\frac{V_b}{V_a+V_b} * 0.69]} \quad (6)$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1+e^{(11.02-3.49*h_{ac})}}} \quad (7)$$

N_f = repeticiones al agrietamiento por fatiga

ϵ_t = deformación unitaria tangencial en la posición crítica (in/in)

E = módulo dinámico (psi)

h_{ac} = espesor de la carpeta (in)

V_a = contenido de vacíos de aire (%)

V_b = contenido de asfalto (% por volumen)

Además, se tienen los siguientes valores para las constantes:

k_{f1} = 0.007566

k_{f2} = -3.9492

k_{f3} = -1.281

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = 1

La expresión matemática anterior estima la cantidad de repeticiones de carga de 8.2 ton necesarias para obtener un 100 % de daño en un pavimento asfáltico, sin embargo, no se conoce el comportamiento a través del tiempo y con ello resulta imposible saber cuándo es necesario algún tipo de intervención a la estructura de pavimento.

Lo anterior evidencia la importancia de aplicar la Ley de Miner, ya que permite estimar el nivel de deterioro para cada año del periodo de diseño, por medio de la ecuación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (8)$$

D = daño

T = número total de periodos (puede considerarse un año)

n_i = tráfico actual del periodo i

N_i = tráfico permitido bajo las condiciones que prevalecen del periodo i

Además, la MEPDG también posee una ecuación que calcula el porcentaje de área agrietada para cada año.

$$FC_{abajo-arriba} = \left(\frac{C_3}{1 + e^{(-C_1 * 2C_2' + C_2 * C_2') * \log(D)}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (9)$$

Donde:

$C_1 = 1$

$C_2 = 1$

$C_3 = 6000$

Una vez que se conoce el porcentaje de área agrietada para un año específico, se acepta o rechaza el diseño de la estructura de pavimento pues permite conocer la condición del mismo al final del periodo de diseño.

El cálculo del agrietamiento de arriba hacia abajo funciona de la misma forma que para el caso anterior, con la diferencia de que el factor de ajuste de laboratorio a campo y la función de transferencia poseen constantes diferentes.

$$C_H = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 * h_{ac})}}} \quad (10)$$

$$FC_{arriba-abajo} = \left(\frac{C_3}{1 + e^{(C_1 - C_2 * \log(D))}} \right) * 10.56 \quad (11)$$

Donde:

$C_1 = 7$

$C_2 = 3.5$

$C_3 = 1000$

Aunado a esto, la MEPDG posee modelos calibrados para estimar la deformación permanente con base en diferentes factores.

De igual forma, los resultados obtenidos son comparados con los criterios de aceptación establecidos y de esta forma se determina si el diseño es adecuado.

$$\Delta_{P(CA)} = \beta_{1r} k_z \epsilon_r(CA) * 10^{k_{1r}} * n^{k_{2r} \beta_{2r}} * T^{k_{3r} \beta_{3r}} * h_{CA} \quad (12)$$

$$k_z = (C_1 + C_2 D) * 0.328196^D \quad (13)$$

$$C_1 = -0.1039(H_{CA})^2 + 2.4868(H_{CA}) - 17.342 \quad (14)$$

$$C_2 = 0.0172(H_{CA})^2 - 1.7331(H_{CA}) + 27.428 \quad (15)$$

n = número de repeticiones de carga

T = temperatura de capa °F

ϵ_p = deformación unitaria permanente (in/in)

ϵ_r = deformación unitaria resiliente (in/in)

h_{ac} = espesor de la carpeta (in)

h_{roca} = profundidad hasta la roca firme (in)

Además, se tienen los siguientes valores para las constantes:

$$k_{1r} = -3.35412$$

$$k_{2r} = 0.4791$$

$$k_{3r} = 1.5606$$

$$B_{1r} = 1$$

$$B_{2r} = 1$$

$$B_{3r} = 1$$

Base y Sub-base granular

El Modelo MEPDG predice el Ahuellamiento con la siguiente fórmula y los factores:

$$\Delta_{p(suelo)} = \frac{\beta_{S1} k_{S1} \epsilon_v h_{suelo} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right)}{e^{\left(\frac{\rho}{n}\right)^\beta}} \quad (16)$$

Δ_p = ahuellamiento de la subcapa

ϵ_v = deformación unitaria vertical promedio (in/in)

n = número de repeticiones de carga

h = espesor subcapa (in)

$$k_{S1} = 1.673$$

$$B_{S1} = 1$$

Sub-rasante

Se calcula la deformación plástica en la fibra superior de la sub-rasante y a seis pulgadas de profundidad.

$$\delta = \left(\frac{1 - e^{-k * h_{roca}}}{k} \right) * \epsilon_{p,z=0} \quad (17)$$

$$k = \frac{1}{6} \ln \left(\frac{\epsilon_{p,z=0}}{\epsilon_{p,z=6}} \right) \quad (18)$$

δ = ahuellamiento sub-rasante (in)

$\epsilon_{p,z}$ = deformación unitaria permanente a la profundidad z (in/in)

h_{roca} = profundidad hasta la roca firme (in)

k_{s1} = 1.673

B_{s1} = 1

Base estabilizada con cemento hidráulico

CR-ME calcula el ahuellamiento en este tipo de bases, sin embargo, el cálculo para revisar fatiga se debe hacer externamente.

Se utiliza el modelo de Portland Cement Association (PCA) que proporciona la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar el daño por fatiga:

$$N_f = \left(\frac{\beta_{C^4}}{\sigma_t / M_{rup}} \right)^{\beta_{C^3} * 20} \quad (19)$$

N_f = número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga de la base estabilizada

σ_t = máximo esfuerzo a tensión en la parte inferior de la base estabilizada (psi)

M_{rup} = módulo de ruptura a los 28 días (psi)

β_{C^3, C^4} = factores de calibración en campo

$\beta_{C^3} = 1.0259$, $\beta_{C^4} = 1.1368$, para granular

$\beta_{C^3} = 0.6052$, $\beta_{C^4} = 2.1154$, para material fino

Lo que implica que el valor obtenido de la expresión anterior debe ser comparado con la cantidad de ejes equivalentes determinados para el periodo de diseño, y, así determinar si la estructura de pavimento cumple o no.

Modelos de desempeño para pavimento rígido

En este caso, por recomendación de expertos en el área, se evalúa el modelo de bombeo y escalonamiento descritos en la literatura y el modelo de fatiga propuesto por el Ing. Sukti Monge Morales.

Modelo de Bombeo y erosión

Entre los factores que influyen en el bombeo y la erosión se encuentran los siguientes: la presencia de agua, la tasa a la cual el agua es inyectada debajo de la losa, que tan erosionable es el material de la sub-rasante y el número de repeticiones de carga. (Huang, 2004) Lo que se busca al emplear el modelo es predecir el índice de bombeo del pavimento diseñado, para de esta forma, corregir desde el inicio índices altos y prevenir fallas del pavimento. El índice de bombeo se encuentra en una escala de cero a tres: donde cero representa que no hay bombeo, uno que la severidad del bombeo es baja, dos con severidad media y tres con severidad alta.

$$PI = (N_{18})^{0.443}[-1.479 + 0.255(1 - S) + 0.0605(P)^{0.5} + 52.65(H)^{-1.747} + 0.0002269(FI)^{1.205}] \quad (20)$$

PI = índice de bombeo

N_{18} = número de ejes equivalentes simples de 18000 lb (millones)

S = tipo de suelo basado en la clasificación AASHTO: 0 para suelos gruesos (A-1 hasta A-3), 1 para suelos finos (A-4 hasta A-7).

P = precipitación anual (cm)

H = espesor de losa (in)

FI = índice de congelación

Modelo de Escalonamiento

El desempeño adecuado de los pavimentos rígidos depende en gran medida del funcionamiento correcto de las juntas. La mayoría de las fallas en estos pavimentos son atribuidas a problemas en las juntas y no a una capacidad estructural inadecuada.

El escalonamiento se da por fallas en el sistema de transferencia de carga, bombeo o cambios de volumen en la sub-rasante y afecta a los usuarios de la vía por las diferencias de elevación entre las losas.

La expresión matemática empleada es la siguiente:

$$F = (N_{18})^{0.5377} [2.2073 + 0.002171(S)^{0.4918} + 0.0003292(JS)^{1.0793} - 2.1397(k)^{0.01305}] \quad (21)$$

PI = escalonamiento (in)

N_{18} = número de ejes equivalentes simples de 18000 lb (millones)

S = esfuerzo máximo (psi)

JS = espaciamiento entre juntas transversales (ft)

k = módulo de reacción de la sub-rasante (pci)

Fatiga

Se emplea el modelo propuesto por el Ing. Sukti Monge Morales por recomendación de la Ing. Wendy Sequeira quien menciona que representa un modelo calibrado para el país y que puede ser empleado para el presente proyecto.

$$\log(N) = \log(5.451) - 24.6 * \log(SR) \quad (22)$$

N = número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla

SR = relación de esfuerzos

$$SR = \frac{\sigma}{MR} \quad (23)$$

σ = esfuerzo máximo aplicado a la losa (psi)

MR = módulo de ruptura del concreto (psi)

Costo de construcción y de mantenimiento

Según la literatura el pavimento rígido posee un costo de construcción significativamente mayor con respecto al flexible, sin embargo, también menciona que se debe analizar el costo desde una perspectiva general que incluya la parte de mantenimiento.

Generalmente, esto se debe a que cuando se obtiene un costo elevado del pavimento es su construcción inicial, el costo por mantenimiento es menor y viceversa.

Aunque determinar el costo por mantenimiento que conlleva una estructura de pavimento no es un proceso sencillo pues depende de la experiencia generada para establecer las intervenciones que necesita la estructura, se debe establecer de la manera más precisa posible.

Metodología

Para la realización del presente proyecto y el cumplimiento de los objetivos, en primer lugar fue necesario realizar una visita a los distintos cantones para conocer la condición del tramo a diseñar. Aunado a esto, se conversa con la unidad técnica de gestión vial municipal de cada cantón para conocer los requerimientos y necesidades de cada caso; en conjunto con la respectiva unidad técnica se acuerdan algunas decisiones, que se mencionan a continuación.

Santo Domingo

En la visita que se realiza a la ruta se observa un tramo de 520 m con una estructura de pavimento en buenas condiciones; sin embargo, es necesario realizar una revisión más detallada del estado actual de la superficie de rodadura.

El procedimiento que se ejecuta es recorrer el tramo e identificar los deterioros presentes y el nivel de severidad que cada uno posee. Para realizar lo anterior se emplea un manual proporcionado por el MOPT que incorpora un catálogo de deterioros con su descripción, las causas y nivel de severidad. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2016a).

Al realizar la auscultación los equipos que se utilizan son los siguientes: la cinta métrica y una cámara fotográfica para registrar la incidencia y severidad de los deterioros que se observan.

En la sección de resultados se muestran claramente los deterioros que se identifican y su nivel de severidad; en la misma se observa que, a excepción de pulimiento de agregados y desgaste superficial, los deterioros presentan poca incidencia. De hecho, se menciona que sólo se observan dos huecos en todo el tramo para lo que se recomienda realizar un bacheo.

Es por todo lo mencionado anteriormente que en conjunto con los encargados en la municipalidad se decide no realizar el diseño de la estructura de pavimento para los 520 m iniciales del tramo, ya que no se considera necesario.

Debido al alto costo de construcción de las carreteras, no se justifica el gasto de remover el material existente para colocar un paquete estructural nuevo; resulta más conveniente pensar en mantenimiento y rehabilitación.

De hecho, en la propuesta para mejoramiento del presente camino que realiza la Municipalidad de Santo Domingo, en mayo del 2012, no considera el tramo que se encuentra con pavimento flexible, solo toma en cuenta los otros 730 metros.

Por lo tanto, se recomienda sectorizar en dos escenarios distintos; el primero corresponde al tramo que se intervendrá y para el cual se diseña la estructura de pavimento, y el segundo que representa un tramo en óptimas condiciones.



Figura 12. Sectorización en dos escenarios diferentes para el tramo de Santo Domingo.
Fuente: Google Earth, 2018.

San Pablo

Con respecto al tramo a diseñar en este cantón, en los informes de los ensayos realizados por el MOPT en los diferentes puntos de muestreo se evidencia la presencia de material granular en toda la longitud del tramo, por lo que resulta conveniente analizar si ese material granular existente se puede reutilizar.

Las características del material granular se revisan y se comparan con los valores límites establecidos para que un material pueda ser empleado como base o sub-base. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).

Primeramente se analiza si se utiliza como base, pero como la mayoría de los parámetros no cumplen se revisa para el caso de la sub-base, donde se observa su cumplimiento con el índice de plasticidad, límite líquido y el porcentaje pasando de algunos tamices; sin embargo, valores como el CBR si bien no cumplen con el mínimo se encuentran muy cercanos a su valor.

Por lo que se decide utilizar el material granular que se tiene en sitio como una sub-base y a partir de ello diseñar los espesores para la base y carpeta asfáltica.

Cuadro 1. Cumplimiento del material existente para ser utilizado con sub-base, graduación B

Parámetro	Requerimiento	Obt en sitio	Condición
Porcentaje por peso pasando la malla 50 mm	100	89	No Cumple
Porcentaje por peso pasando la malla 37.5 mm	97-100	81	No Cumple
Porcentaje por peso pasando la malla 4.75 mm	40-60(8)	41	Cumple
Porcentaje por peso pasando la malla 75 um	4-12(4)	1.2	Cumple
CBR	30 mín	27	No Cumple
índice de Plasticidad	4-10	9	Cumple
Límite Líquido	35 máx	19	Cumple

Fuente: CR-2010 y Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Por otro lado se tiene que aproximadamente 300 m, específicamente en el límite de ambos cantones, existe una carpeta asfáltica en óptimas condiciones pero solo en un carril, ya que el otro carril de la calle se encuentra en lastre, el carril que cuenta con lastre es responsabilidad de la municipalidad de Santo Domingo. (Ver Anexo 14).

Por lo tanto, en conjunto con la unidad técnica de gestión vial se decide no intervenir el carril que forma parte de la jurisdicción del cantón de San Pablo pues se encuentra en buenas condiciones; a pesar de que la mitad de la calle tiene lastre, esa sección ya se contempló en el diseño realizado para Santo Domingo.



Figura 13. Sectorización en dos escenarios diferentes para el tramo de San Pablo.
Fuente: Google Earth, 2018.

Metodología AASHTO 93 para diseño de pavimentos

Históricamente el diseño de pavimentos en Costa Rica se ha realizado por medio de la metodología definida por AASHTO en 1993. La cual es completamente empírica pues fue calibrada para las condiciones de una pista a escala real en Illinois, con un clima característico, con solamente un tipo de suelo y con presiones de inflado inferiores a las actuales.

A pesar de ser una metodología que está calibrada solo para esas características en específico, se utiliza en muchos países y se continúa empleando para establecer los espesores de la estructura de pavimento.

Pavimentos Flexibles y Semi-Rígidos

Para la realización correcta del diseño de pavimentos flexibles y semi-rígidos por medio de la metodología AASHTO 93 se confecciona una hoja de cálculo en Microsoft Excel, cuyo objetivo es facilitar los cálculos y disminuir la probabilidad de error. El procedimiento para realizar el diseño es el siguiente:

1. Ejes equivalentes de diseño.

- 1.1. Se encuentra el TPD para cada tipo de vehículo que transita por la ruta, el mismo se obtiene gracias a la instalación de contadores vehiculares que fueron prestados por la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica. La ubicación de cada uno de ellos responde a varios factores. En primera instancia, se busca un lugar idóneo donde se obtenga la mayor cantidad de información, sin embargo, como es necesario que alguna vivienda guarde y cuide el equipo, existe cierta limitación en ese aspecto pues algunas personas no quieren colaborar; otro factor que incide directamente es el hecho de que se tienen tramos solitarios donde no existen casas de habitación. También es importante mencionar que la cantidad de días que se instalan los contadores obedece a la disponibilidad del técnico a cargo. En Santo Domingo los contadores se instalaron el lunes 9 de julio de 2018, iniciando el conteo a las 12:00 pm y se quitaron el viernes 13 de julio de 2018 a las 10:36 am, aproximadamente. Ambos contadores, señalan las 7:00 am y 5:00 pm como las horas de mayor tránsito vehicular en la zona. En la entrada de la Calle Barro de Olla Cod. 4-03-023 el TPD registrado fue de 2824 y el otro contador colocado en la misma calle pero lejos de dicha entrada, específicamente en San Vicente, el TPD fue de 490. (Ver Anexo 1 y 2).

En San Pablo el contador se colocó el lunes 16 de julio de 2018, iniciando a contar a las 12:00 pm y se retiró el jueves 19 de julio de 2018, aproximadamente a las 10:00 am. Se ubica en la calle 4-09-012, la cual posee un TPD de 421; con las 7:00 am y 3:00 pm como las horas de mayor tránsito vehicular. (Ver Anexo 3)

Para ambos cantones se considera necesario multiplicar el TPD por un factor de expansión de 20 % ya que se considera que cuando dichos tramos estén en buenas condiciones el tránsito promedio diario va a aumentar considerablemente.

En Santa Bárbara no se realiza TPD pues es suministrado por la municipalidad y tampoco se considera factor de expansión porque lo tiene incluido. (Ver Anexo 4).

- 1.2. Se establece un factor camión para cada tipo de vehículo. En el caso de pavimento flexible y semi-rígido se utilizan los valores recomendados en el Oficio DVOP-5170-07 del 10 de septiembre de 2007 y se eligen los valores máximos.

Cuadro 2. Factores camión para pavimento flexible y semi-rígido

Vehículo	Factor camión
Liviano	0.001
Carga Liviana	0.020
C2	0.630
C3	1.710

Fuente: Oficio DVOP-5170-07.

- 1.3. Se determinan los ejes equivalentes diarios (EEQ diarios) por tipo de vehículo, a través de la multiplicación del TPD por el factor camión de cada uno.
- 1.4. Se encuentran los ejes equivalentes anuales (EEQ anuales), multiplicando EEQ diarios por el número de días del año (365 días).
- 1.5. Se multiplican los EEQ anuales por el factor de crecimiento, factor direccional y por el factor carril para obtener los ejes equivalentes carril de diseño (EEQ carril de diseño) de cada tipo de vehículo.

El factor de crecimiento se determina considerando una tasa de crecimiento anual del 4 % y un periodo de diseño de 10 años; dichos valores además de ser empleados por el MOPT como regla general para este tipo de proyectos, son los que menciona el Ing. Fabricio Leiva en su guía de diseño. (Leiva, s.f.).

Con respecto al factor direccional, se considera una distribución vehicular por sentido de 50 % / 50 % siendo bidireccional.

El factor carril se elige con base en el número de carriles por sentido, que para este caso es uno y, por lo tanto, corresponde al 100 %.

- 1.6. Y finalmente, se suman los EEQ carril de diseño de cada tipo de vehículo para obtener el total.
2. Módulos de resiliencia de los materiales y sus respectivos coeficientes estructurales, los cuales se definen con base en los nomogramas y las ecuaciones presentes en la guía de diseño en su apartado 2.3. Propiedades de los materiales para diseño estructural. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).
- 2.1. Carpeta asfáltica: Se establece un módulo resiliente de 450 000 psi. Por lo tanto, el coeficiente estructural obtenido fue de 0.44.
- 2.2. Base granular: Para el caso de un pavimento flexible, el CR-2010 establece un valor mínimo de CBR de 80 % para la base granular, por lo que a partir de este valor se determina el módulo resiliente y el coeficiente estructural.
Para el pavimento semi-rígido, se propone utilizar una base estabilizada con cemento hidráulico BE-25 con una resistencia mínima a la compresión de 30 kg/cm² a los 7 días. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).
Es importante mencionar que al adicionar cemento hidráulico se obtiene un material más cohesivo y se mejora la resistencia a la erosión; además absorbe los cambios de expansión de los suelos.
- 2.3. Sub-base granular: Su valor se determina de la misma forma que para la base granular, con la única diferencia de que el CBR mínimo establecido es de 30 %.
- 2.4. Sub-rasante: Su módulo resiliente se determina por medio de la siguiente correlación con el CBR, la cual es válida para CBR menores o iguales a 10 %:

$$MR = 1500 * CBR \quad (24)$$

La ecuación anterior se puede utilizar, debido a que el MOPT realiza los ensayos correspondientes y determina, en todos los casos, valores de CBR menores a 10 %.

3. Coeficiente de drenaje para la base granular, base estabilizada con cemento hidráulico y sub-base; su valor se establece considerando el apartado 2.4.1. Drenaje y tomando en cuenta que se trata de una estructura de pavimento nueva en la que la calidad de los drenajes va a ser buena. Asimismo, se considera que más del 25 % del tiempo la estructura de pavimento va a estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación. Por lo tanto, para todos los casos se utiliza un coeficiente de drenaje igual a uno.

4. Nivel de confianza, de igual forma se emplean los valores recomendados en el Oficio DVOP-5170-07 del 10 de septiembre de 2007 y se considera los tres tramos en cuestión como rutas terciarias con un TPD menor a 500 y por ende un nivel de confianza de 70 %. Del mismo modo, si se consideran los valores recomendados en la guía en su apartado 2.1.3. Nivel de confianza, se tienen para los tramos en análisis un rango de 50 %-80 %, por lo que también se cumple con lo establecido.

5. Desviación estándar en desempeño, su valor se elige con base en el apartado 4.3. Criterios para la selección de la desviación estándar donde se establece un rango de 0.40 – 0.50 por lo se utiliza el promedio $S_o = 0.45$.

6. Índices de servicialidad, según el apartado 2.2.1. Servicialidad se tiene que para pavimentos flexibles el inicial es 4.2, para el caso del pavimento semi-rígido se utilizó 4.3. Para el Índice de Servicio Terminal se utiliza lo descrito en el Oficio DVOP-5170-07, para ruta terciaria y TPD menor a 500.

7. Estadístico Z_r , como se definió un nivel de confianza de 70 % el valor $Z_r = -0.524$. En la guía de diseño por medio de la metodología AASHTO 93 se presenta una tabla con el estadístico Z_r correspondiente a cada nivel de confianza, no obstante, también se puede encontrar su valor por medio de Excel empleando la inversa de la distribución normal estándar acumulativa.

8. Número estructural para la carpeta asfáltica, base y sub-base, dicho valor se encuentra empleando la ecuación:

$$\log_{10} W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07 \quad (25)$$

W_{18} = número de repeticiones de carga de eje simple de 18 kip

Z_r = desviación normal estandar

S_o = desviación estándar en desempeño

ΔPSI = diferencia entre el índice de servicio inicial y el final

M_r = módulo resiliente (psi)

SN = número estructural (in)

A modo de resumen, el procedimiento seguido para resolver la ecuación es buscar un $SN_{promedio}$ por medio del cual la diferencia entre los términos de la anterior ecuación, no sea significativa. Los pasos son los siguientes:

- 8.1. Se calcula el primer término de la ecuación que depende de los EEQ carril de diseño ($W18$).
- 8.2. Se establece un $SN_{inicial}$ y un SN_{final} para definir un intervalo, el $SN_{promedio}$ siempre va a ser el valor intermedio.
- 8.3. Se encuentra el valor del segundo término de la ecuación con el $SN_{promedio}$.
- 8.4. Si la diferencia entre el primer y segundo término de la ecuación es menor o igual a 0.0009, la condición se cumple y se encuentra el SN de la capa en cuestión. Por el contrario, si la condición no se cumple se debe iterar hasta que se cumpla. Para iterar y elegir el nuevo $SN_{promedio}$, se toma en cuenta el valor obtenido de la diferencia ya que si es positivo significa que el primer término es mucho mayor y se debe aumentar el $SN_{promedio}$ para que aumente el segundo término y la diferencia sea menor. En este caso, el $SN_{promedio}$ pasa a ser $SN_{inicial}$ y se establece el nuevo intervalo. Caso contrario, si en la diferencia se tiene un número negativo significa que se debe tener un $SN_{promedio}$ menor al anterior, entonces el $SN_{promedio}$ pasa a ser el final y se tiene un nuevo intervalo.

9. Espesores de las capas.

- 9.1. El espesor de la carpeta asfáltica se determina considerando lo siguiente:

$$h_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad (26)$$

h_1 = espesor de la carpeta asfáltica

SN_1 = número estructural de la carpeta asfáltica

a_1 = coeficiente estructural de la carpeta asfáltica

Es importante mencionar que h_1 debe ser redondeado al entero mayor más cercano, para la realización correcta de los cálculos posteriores.

9.2. Se encuentra el espesor de la base, por medio de:

$$h_2 = \frac{SN_2 - a_1 * h_1}{a_2 * m_2} \quad (27)$$

h_2 = espesor de la base

SN_2 = número estructural de la base

a_2 = coeficiente estructural de la base

m_2 = coeficiente de drenaje para la base

Si el valor encontrado es mayor al mínimo se redondea, de lo contrario el espesor corresponde al mínimo de la capa.

9.3. Finalmente, se resuelve la ecuación para encontrar el espesor de la sub-base.

$$h_3 = \frac{SN_3 - a_1 * h_1 - a_2 * m_2 * h_2}{a_3 * m_3} \quad (28)$$

h_3 = espesor de la sub-base

SN_3 = número estructural de la sub-base

a_3 = coeficiente estructural de la sub-base

m_3 = coeficiente de drenaje para la sub-base

10. Basados en los resultados anteriores, se obtiene el número estructural requerido y el total para dichos espesores.

$$SN = h * a * m \quad (29)$$

Pavimentos Rígidos

De la misma manera que para pavimentos flexibles y semi-rígidos, se elabora una hoja de cálculo en Microsoft Excel para la realización del diseño por medio de la metodología AASHTO 93, cuyo procedimiento consiste en:

1. Ejes equivalentes de diseño; se utiliza una recomendación de la guía de diseño AASHTO 93 en su apartado 5.2.3. Cargas de tránsito que indica que al dividir los EQQ carril de diseño encontrados para el pavimento flexible entre 0.67 se obtiene una equivalencia de EQQ de diseño para el pavimento rígido. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

2. Nivel de confianza, el cual se establece de 70 % con base en las consideraciones expuestas en el punto cuatro de diseño de pavimentos flexibles y semi-rígidos.
3. Desviación en desempeño, la sección 4.3 Criterios para la selección de la desviación estándar menciona que para pavimentos rígidos se tiene un rango de 0.30 - 0.40 por lo que se utilizó $S_o=0.35$.
4. Para los índices de servicialidad en la sección 2.2.1. Servicialidad se tiene que para pavimentos rígidos el inicial es 4.5; para el Índice de servicio terminal se establece 2, según el Oficio DVOP-5170-07.
5. El estadístico $Z_r=-0.524$ pues como se mencionó anteriormente $R=70\%$.
6. Módulos de resiliencia de la sub-rasante y de la base. Para la sub-rasante, el módulo resiliente se encuentra por medio de una correlación con el CBR que aparece en la guía de diseño, la cual aplica para valores de CBR menores o iguales a 10 %:

$$MR = 1500 * CBR \quad (30)$$

Se decide emplear una base mejorada con cemento debido a que las losas sufren mucho cuando el material inferior se erosiona o se deforma porque la losa pierde sustento y se quiebra. Al adicionarle cemento se logra un material más cohesivo y se mejora la resistencia a la erosión siendo menos probable el surgimiento de fallas.

Adicionalmente, se evitan problemas de expansión de los suelos porque el material de la base absorbe esos cambios; también se puede utilizar como plataforma de trabajo, ya que el chorreo de la losa implica el paso de maquinaria pesada que deteriora la sub-rasante y al emplear una base de este tipo se evita el daño que se puede originar durante la construcción.

Por lo tanto, se utiliza una base mejorada con cemento hidráulico con $CBR=100\%$ y módulo resiliente de 31000 psi.

7. Características del concreto hidráulico; se determina la resistencia a la compresión a los 28 días con base en el CR-2010 donde se establece como requisito mínimo del concreto hidráulico para pavimentos una resistencia a la compresión a los 28 días de 255 kg/cm². De igual forma, el CR-2010 establece un mínimo de 45 kg/cm² para el módulo de ruptura.

El módulo de elasticidad se calcula con la siguiente ecuación recomendada por el Ing. Pedro Castro en su material de clase:

$$E_c = 57000 * f'_c{}^{0.5} \quad (31)$$

E_c = módulo de elasticidad del concreto hidráulico (psi)

f'_c = resistencia a la compresión a los 28 días (psi)

8. Coeficiente de drenaje, para establecerlo se utiliza la sección 2.4.1. Drenaje y se considera un porcentaje de tiempo mayor al 25 % en el cual la estructura de pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación y una calidad del drenaje buena.
9. Coeficiente de transmisión de carga, se emplea la tabla 2.6 de la guía de diseño donde establece que para un espaldón de asfalto y un tipo de pavimento JPCP con dovelas, se debe emplear un coeficiente de transmisión de carga de 3.2.
10. Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante, el cual se obtiene por medio de la ecuación presentada por Federal Highway Administration (FHWA):

$$\ln k_\infty = -2.807 + 0.1253(\ln D_{SB})^2 + 1.062(\ln M_R) + 0.1282(\ln D_{SB})(\ln E_{SB}) - 0.4114(\ln D_{SB}) - 0.0581(\ln E_{SB}) - 0.1317(\ln D_{SB})(\ln M_R) \quad (32)$$

k_∞ = módulo de reacción compuesto de la sub-rasante (pci)

D_{SB} = espesor supuesto de base (in)

M_R = módulo resiliente de la sub-rasante (psi)

E_{SB} = módulo resiliente de la base (psi)

11. Si existe un estrato rígido con una profundidad menor de 10 ft, se debe corregir el módulo de reacción compuesto de la sub-rasante, esto se logra por medio de la fórmula dada por FHWA para obtener el módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido.

$$\ln k_{rf} = 5.303 + 0.0710(\ln D_{SB})(\ln M_R) + 1.366(\ln k_\infty) - 0.9187(\ln D_{SG}) - 0.6837(\ln M_R) \quad (33)$$

k_{rf} = módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido (pci)

D_{SG} = profundidad del estrato rígido (in)

12. Se determina el daño relativo con la siguiente ecuación:

$$u_{ri} = [D^{0.75} - 0.39k_i^{0.25}]^{3.42} \quad (34)$$

u_{ri} = daño relativo

D = espesor de losa (in)

k_i = módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido (pci)

13. Se corrige el módulo de reacción de la sub-rasante por pérdida potencial de soporte empleando el nomograma de la guía de diseño.

14. Cálculo del espesor de losa a través de la siguiente ecuación:

$$\log_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 7.35 * \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right]}{1 + \frac{1.624*10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32pt) * \log_{10}\left[\frac{s'_c * c_d [D^{0.75} - 1.232]}{215.63 * J [D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}}]}\right] \quad (35)$$

W_{18} = número de repeticiones de carga de eje simple de 18 kip

Z_r = desviación normal estandar

S_o = desviación estándar en desempeño

ΔPSI = diferencia entre el índice de servicio inicial y el final

p_t = índice de servicio final

s'_c = módulo de ruptura del concreto (psi)

C_d = coeficiente de drenaje

k = módulo de reacción efectivo de la sub-rasante (psi)

E_c = módulo de elasticidad del concreto hidráulico (psi)

Para resolver la ecuación, se siguen los siguientes pasos:

14.1. Se calcula el primer término de la ecuación que depende de los EEQ carril de diseño.

14.2. Se establece un $D_{inicial}$ y un D_{final} para establecer un intervalo, el $D_{promedio}$ siempre será el valor intermedio.

14.3. Se encuentra el valor del segundo término de la ecuación con el $D_{promedio}$.

14.4. Si la diferencia entre el primer y segundo término de la ecuación es menor o igual a 0.0009, la condición se cumple y se encuentra el espesor de la losa (D). Por el contrario, si la condición no se cumple se debe iterar hasta que se cumpla.

Para iterar y elegir el nuevo $D_{promedio}$, se toma en cuenta el valor obtenido de la diferencia ya que si es positivo significa que el primer término es mucho mayor y se debe aumentar el $D_{promedio}$ para que aumente el segundo término y la diferencia sea menor; en este caso, el $D_{promedio}$ pasa a ser $D_{inicial}$ y se establece el nuevo intervalo.

Caso contrario, si en la diferencia se tiene un número negativo significa que se debe tener un $D_{promedio}$ menor al anterior, entonces el $D_{promedio}$ pasa a ser el final y se tiene un nuevo intervalo.

Dovelas

La metodología de cálculo empleada para las dovelas consiste en asumir un diámetro y separación, los cuales posteriormente se revisan para verificar su cumplimiento con los criterios establecidos.

Como primer punto se debe mencionar que se considera una transferencia de carga de 100 % entre las dovelas y un 50 % de carga antes y después de la junta.

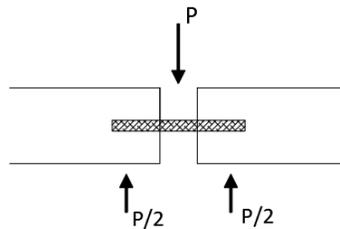


Figura 14. Transferencia de carga entre dovelas.
Fuente: AutoCAD, 2017

Para realizar la revisión se debe determinar la rigidez relativa de la losa:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_c * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}} \quad (36)$$

E_c = módulo de elasticidad del concreto hidráulico (psi)

h = espesor de losa (in)

k = módulo de reacción efectivo de la sub-rasante (psi)

μ = coeficiente de Poisson

Luego se aumenta la rigidez relativa en 80% para encontrar la longitud de influencia o desarrollo.

Aunado a esto, se encuentra la contribución relativa de cada dovela, es decir la porción de carga que va a absorber cada una de ellas.

$$\frac{R_i}{1.8 * l - x} = \frac{1}{1.8 * l} \quad (37)$$

R_i = contribución relativa de la dovela (in)

$1.8 * l$ =longitud de influencia o desarrollo (in)

x =distancia a la que está la dovela (in)

También se determina la carga absorbida por cada dovela, para analizar la más crítica:

$$P_i = \frac{P}{N} * R_i \quad (38)$$

P_i = carga absorbida por la dovela (lb)

P = 4500 (lb)

N = suma de las contribuciones relativas de las dovelas

R_i = contribución relativa de la dovela (in)

Una vez establecida la dovela crítica, se calcula el esfuerzo aplicado sobre la misma:

$$\sigma_b = \frac{K_d * P d_i}{4 * \beta^3 * EI} * (2 + \beta * z) \quad (39)$$

σ_b = esfuerzo aplicado a la dovela crítica (pci)

K_d = módulo de interacción dovela-concreto (pci)

$P d_i$ = carga en dovela crítica (lb)

E = módulo de rigidez del acero (psi)

I = inercia considerando el diámetro de la varilla (in^4)

z = apertura de la junta (in)

Donde se tiene que β corresponde a:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_d * d}{4 * EI}} \quad (40)$$

K_d = módulo de interacción dovela-concreto (pci)

d = diámetro de la varilla (in)

E = módulo de rigidez del acero (psi)

I = inercia considerando el diámetro de la varilla (in^4)

Por último, se calcula el esfuerzo de falla en la dovela que debe ser mayor o igual que el esfuerzo aplicado para que los valores asumidos cumplan con los requerimientos establecidos.

$$f_b = \left(\frac{4-d}{3}\right) * f'_c \quad (41)$$

f_b = esfuerzo de falla en la dovela (pci)

d = diámetro de la varilla (in)

f'_c = resistencia a la compresión en 28 días (psi)

Criterio de cumplimiento y aceptación para los valores propuestos:

$$\sigma_b \leq f_b \quad (42)$$

σ_b = esfuerzo aplicado a la dovela crítica (pci)

f_b = esfuerzo de falla en la dovela (pci)

Barras de amarre longitudinal

Para la colocación de varilla de amarre en las juntas longitudinales se emplea una expresión para calcular el área de acero en sección longitudinal por cada 30 cm lineal entre juntas: (Castro, 2018a)

$$A_s = \frac{\gamma_c * h * L' * f_a}{f_s} \quad (43)$$

A_s = área de acero requerida por ft lineal (in^2/in)

γ_c = peso unitario del concreto hidráulico (lb/in^3)

h = espesor de losa (in)

L' = distancia mínima de la junta al borde libre (in)

f_a = factor de fricción losa/capa de soporte

f_s = resistencia de trabajo para acero (psi)

Como ya se conoce el área requerida por ft lineal, se asume un número de varilla y una separación para calcular el área de acero propuesta por pie lineal. Si el área requerida es menor que la propuesta el diseño cumple con los requerimientos y se aceptan las dimensiones establecidas.

Metodología Mecánica-Empírica para pavimentos flexibles y semi-rígidos

Gracias a la búsqueda en la mejora de la calidad de los diseños de estructuras de pavimentos, surge el software CR-ME desarrollado por el Ing. Christopher Trejos en LanammeUCR; constituye una herramienta que al incluir modelos calibrados para el país permite lograr diseños eficientes y así, evitar fallas prematuras que producen sobrecostos en los proyectos. Como parte de los datos de entrada que se requieren para la utilización del software y el desarrollo de la metodología mecánica-empírica, se tienen las propiedades o características de los materiales de la estructura de pavimento.

Sub-rasante

Se debe mencionar que el responsable de la realización de los ensayos es el MOPT, quien proporciona los informes con los resultados de diferentes puntos de muestreo. Como se cuenta con variada información que demuestra la heterogeneidad presente en el suelo, se busca extraer la información más representativa para el suelo en cuestión. (Ver Anexos 8, 9 y 11) Se tienen las siguientes características de la sub-rasante perteneciente a cada cantón:

Cuadro 3. Características de la sub-rasante para Santo Domingo

Característica	Valor	Unidad
% Pasando en el tamiz $N^{\circ}200$	91.0	%
% Humedad óptima	35	%
índice de Plasticidad	18	-
Gravedad específica	2.681	-
Densidad seca máxima	1161	kg/m^3
CBR	1	%

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Cuadro 4. Características de la sub-rasante para San Pablo

Característica	Valor	Unidad
% Pasando en el tamiz $N^{\circ}200$	91.0	%
% Humedad óptima	24	%
índice de Plasticidad	18	-
Gravedad específica	2.681	-
Densidad seca máxima	1197	kg/m^3
CBR	2	%

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Cuadro 5. Características de la sub-rasante para Santa Bárbara.

Característica	Valor	Unidad
% Pasando en el tamiz $N^{\circ}200$	94.0	%
% Humedad óptima	32	%
índice de Plasticidad	14	-
Gravedad específica	2.681	-
Densidad seca máxima	1197	kg/m^3
CBR	3	%

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

La razón de Poisson para la sub-rasante es de 0.45 según la literatura. (Castro, 2018c).

Sub-base

La municipalidad de San Pablo proporciona dicha información con base en datos de proyectos realizados con anterioridad y de tajos cercanos a la zona, como Tajo Monte Roca y Car Cruz Maquinaria y Agregados. (Ver Anexo 7).

Se utiliza la misma información de la sub-base para los tres cantones, pues no se cuenta con información específica para Santo Domingo ni para Santa Bárbara.

Cuadro 6. Características de la sub-base granular.

Característica	Valor	Unidad
% Pasando en el tamiz $N^{\circ}200$	8.3	%
% Humedad óptima	9.1	%
Gravedad específica	2.655	-
Densidad seca máxima	1958	kg/m^3
CBR	30	%

Fuente: Municipalidad de San Pablo.

Para este caso, la razón de Poisson es de 0.40. (Castro, 2018a).

Base

Sucede lo mismo que para la sub-base, la municipalidad de San Pablo proporciona la información.

Cuadro 7. Características de la base granular.

Característica	Valor	Unidad
% Pasando en el tamiz $N^{\circ}200$	5.4	%
% Humedad óptima	3.85	%
Gravedad específica	2.64	-
Densidad seca máxima	1831	kg/m^3
CBR	80	%

Fuente: Municipalidad de San Pablo.

La razón de Poisson es de 0.40 según la literatura. (Castro, 2018a)

Mezcla asfáltica

De igual forma que para los otros materiales, es necesario especificar las características de la mezcla asfáltica; al no contar con información específica para el proyecto se toma como referencia la que se muestra a continuación:

Cuadro 8. Características de la mezcla asfáltica.

Característica	Valor	Unidad
% Acumulado retenido en el tamiz 3/4	0	%
% Acumulado retenido en el tamiz 3/8	21	%
% Acumulado retenido en el tamiz $N^{\circ}4$	50	%
% Pasando en el tamiz $N^{\circ}200$	5.6	%
% Contenido de vacíos de aire	4	%
% Contenido de asfalto efectivo	4.55	%

Fuente: Fernández, S. (2018).

Para la mezcla asfáltica se tiene una razón de Poisson de 0.35, según la literatura. (Castro, 2018a).

Base estabilizada con cemento hidráulico

Se decide utilizar una base estabilizada con cemento hidráulico BE-25 con resistencia mínima a la compresión a los 7 días de 3 MPa según el CR-2010, se tiene un módulo resiliente de 610 000 psi.

El módulo de ruptura se determina con la siguiente fórmula:

$$S'_c = 0.51 * (UC)^{0.88} \quad (44)$$

S'_c = módulo de ruptura (psi)

UC = resistencia a la compresión inconfiada (psi)

Se recomienda utilizar para la base estabilizada con cemento, una razón de Poisson de 0.25. (Castro, 2018a).

Con la información necesaria para la utilización de CR-ME se procede a verificar los respectivos diseños; CR-ME constituye un software con una interfaz amigable para el usuario que le indica que información debe ir completando, con diferentes módulos que se van activando en orden y no se activa el siguiente hasta que el anterior esté completo.

A continuación, se presenta la interfaz gráfica de la herramienta.

The screenshot shows the main interface of the CR-ME software. At the top, there is a navigation bar with the text "Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos Flexibles" and links for "Archivo", "Resultado", "Idioma", and "Acerca de". Below this is the logo of the "UNIVERSIDAD DE COSTA RICA". The interface is divided into three main sections: "Proyecto", "Características del proyecto", and "Datos de entrada".

Proyecto	Características del proyecto	Datos de entrada
Ubicación: Sto Domingo, Heredia	Velocidad operacional (km/h): 30	<input checked="" type="checkbox"/> Tránsito
Identificación del proyecto: MOPT/BID	Ancho de carril (m): 3.5	<input checked="" type="checkbox"/> Clima
Identificación de la sección: 4-03-023	Período de diseño (años): 10	<input checked="" type="checkbox"/> Materiales
Fecha de la construcción: 24/08/2018	Considerar el efecto del Zigzagado Lateral: <input checked="" type="radio"/> No	<input checked="" type="checkbox"/> Modelos de desempeño
Descripción: Barro de Olla-San Vicente		DISEÑAR

Figura 15. CR-ME, interfaz principal.

Fuente: LanammeUCR.

En el primer apartado de la interfaz principal se ingresan datos como su ubicación y la identificación del mismo, sin embargo, esta información es opcional y no se requiere para continuar con los otros módulos.

La información del siguiente apartado sí es obligatoria pues constituyen características fundamentales que se deben conocer del proyecto; como velocidad operacional, ancho de carril y periodo de diseño. Además, se debe indicar si se considera el zigzagado lateral; para los diseños presentados en este proyecto no se considera para tomar en cuenta el caso más crítico. Una vez completados los dos apartados anteriores, se procede con el tercer y último apartado de la interfaz principal, el cual está formado por cuatro módulos: tránsito, clima, materiales y modelos de desempeño.

Tránsito

Permite calcular los ejes equivalentes de diseño con o sin series históricas. Se elige con series históricas, puesto que ya se habían calculado los ejes equivalentes de diseño; sin embargo, si el usuario lo desea puede ingresar la información necesaria y CR-ME realiza el cálculo.

Nivel 3 (Básico)

Ejes Equivalentes de Carga (ESAL)

Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T con series históricas
 Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T sin series históricas (AASHTO 93)

N (8.2 T)

TPD año inicial (TPDI)
 Crecimiento vehicular (%)
 Factor de distribución direccional(%)

Factor de distribución por carril (%)

Tipos de	Porcentaje del TPD	Factor daño	ESAL durante la construcción (Nc)
Automóviles	0	0	<input type="text" value="0"/>
Buses	0	0	<input type="text" value="0"/>
C2P	0	0	<input type="text" value="0"/>
C2G	0	0	<input type="text" value="0"/>
C3	0	0	<input type="text" value="0"/>
C3S2	0	0	<input type="text" value="0"/>
C3S3	0	0	<input type="text" value="0"/>

Nivel de confianza de la variable Tránsito (%)
 Factor de amplificación

ESAL calculado

Figura 16. Módulo de Tránsito.

Fuente: LanammeUCR.

Clima

Como para la caracterización del clima es necesario conocer la temperatura media y la precipitación mensual del lugar, se le solicita al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica información de estaciones cercanas. Los datos suministrados corresponden a la estación 84121 TIBAS, embargo, no proporciona información de la temperatura media por lo que se debe hacer uso de la estación 84141 IMN ARANJUEZ para obtener la información completa. (Ver Anexo 5 y 6).

Luego es necesario realizar el cálculo del Índice de Thornwaite por mes, ya que el software no lo calcula.

1. Se calcula el índice de calor mensual.

$$h_i = (0.2 * t_i)^{1.514} \quad (45)$$

h_i = índice de calor mensual
 t_i = temperatura media ($^{\circ}C$)

2. Se obtiene el índice de calor anual a través de la sumatoria de los índices de calor mensuales.

$$H_y = \sum_{i=1}^{12} h_i \quad (46)$$

h_i = índice de calor mensual

3. Se encuentra la evapotranspiración mensual con la fórmula:

$$PE_i = 16 * \frac{10 * t_i^a}{H_y} \quad (47)$$

PE_i = evapotranspiración mensual
 t_i = temperatura media ($^{\circ}C$)
 H_y = índice de calor anual
 $a = 6.75 * 10^{-7} H_y^3 + 7.71 * 10^{-5} H_y^2 + 0.017921 H_y + 0.49239$

4. Para obtener la evapotranspiración corregida mensual se requiere conocer los días de cada mes, pero como no se conoce con exactitud dicha información se asume 30 días para todos los meses.

$$PE'_i = \frac{PE_i * 30}{30} \quad (48)$$

PE'_i = evapotranspiración corregida mensual
 PE_i = evapotranspiración mensual

5. Se obtiene el almacenamiento de un mes en específico, por medio de la siguiente expresión:

$$A_i = A_{i-1} + P_i - PE'_i \quad (49)$$

A_i = almacenamiento de un mes
 A_{i-1} = almacenamiento del mes anterior
 P_i = precipitación mensual
 PE'_i = evapotranspiración corregida mensual

Se inicia el cálculo en enero con almacenamiento igual a cero y después se corrige con el valor de diciembre. Además, la cantidad de almacenamiento se establece hasta un máximo de 100 mm por lo que si el valor obtenido es mayor a cien se debe colocar cien.

- Se determina el exceso para cada mes, por lo que si el resultado es menor que cero se debe colocar cero.

$$R = A_i + P_i - PE'_i \quad (50)$$

R = exceso mensual

A_i = almacenamiento mensual

P_i = precipitación mensual

PE'_i = evapotranspiración corregida mensual

- Para el déficit mensual (DF) se utiliza la misma fórmula que para calcular el exceso, con la única diferencia que si el resultado es mayor que cero se debe colocar cero.
- Conociendo los valores anteriores se determina el Índice de Thornwaite:

$$TMI_y = \frac{100(R_y) - 60(DF_y)}{(PE_y)} \quad (51)$$

TMI_y = Índice de Thornwaite

R_y = exceso

DF_y = déficit

PE'_y = evapotranspiración corregida

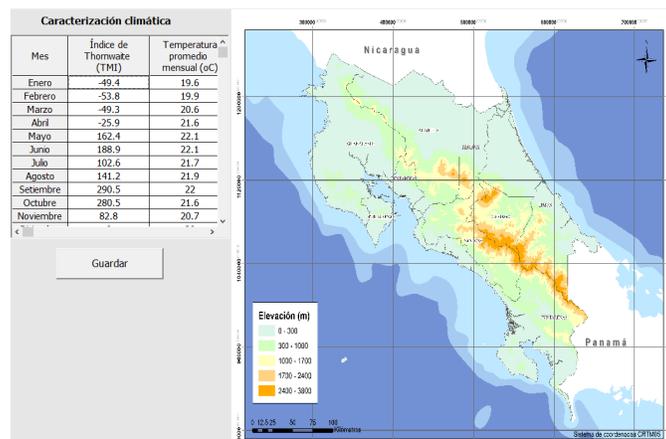


Figura 17. Módulo de datos climáticos.
Fuente: LanammeUCR.

Materiales

Se elige una subcapa por cada capa. Luego se caracteriza cada capa, dando click sobre la misma.

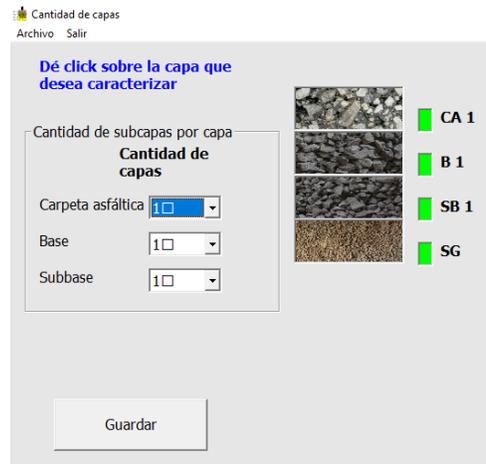


Figura 18. Capas de la estructura de pavimento.
Fuente: LanammeUCR.

Carpeta asfáltica

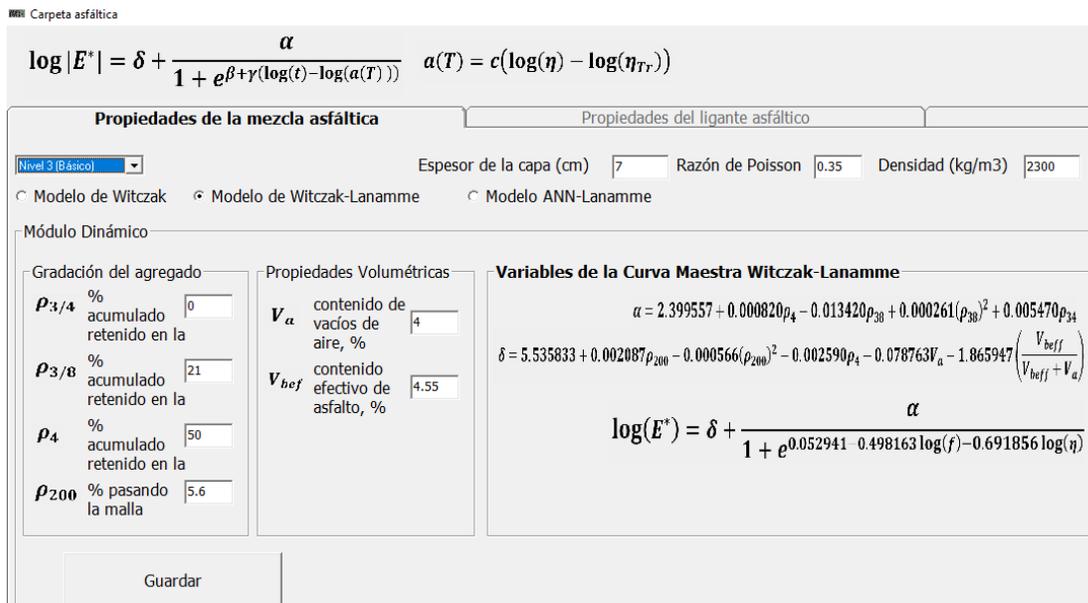


Figura 19. Propiedades de la mezcla asfáltica.
Fuente: LanammeUCR.

Como se observa anteriormente, se ingresan las propiedades de la mezcla y se elige el método mediante el cual se calcula el módulo dinámico; el método elegido es Witczak-Lanamme, ya que los coeficientes de la ecuación se encuentran calibrados para las condiciones específicas de nuestro país.

En la siguiente sección se eligen las propiedades del ligante asfáltico con grado de penetración convencional como la manera de establecer A y VTS.

Nivel 3 (Básico)

Valores predeterminado

Grado Superpave del ligante

Grado Convencional AC

Grado de Penetración Convencional

Grado de Penetración Convencion

Pen 60-70

A-VTS para el ligante asfáltico envejecido RTFO

A 10.6508 VTS -3.5537

Guardar

Figura 20. Propiedades del ligante asfáltico.

Fuente: LanammeUCR.

Base

Se selecciona la base que corresponde para cada caso en particular, base granular para el diseño de pavimento flexible y base estabilizada con cemento para el pavimento semi-rígido. Cabe agregar que el software CR-ME solo revisa ahuellamiento en el pavimento semi-rígido por lo que si se desea verificar que cumpla con el modelo de deterioro de fatiga se debe hacer externamente.

Para el caso de la base granular se define el nivel 3 (básico) y se ingresa el espesor de la capa, la Razón de Poisson, índice de plasticidad, porcentaje pasando el tamiz $N^{\circ}200$, gravedad específica, densidad seca máxima, humedad óptima y el CBR con el cual se calcula automáticamente el módulo resiliente.

Base

Base granular Nivel 3 (Básico)

Espesor (cm) 15 Razón de Poisson 0.4

Nivel 3 (Básico)

P200 (%) 5.4 Índice de plasticidad 0

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs) 2.64

Densidad seca máxima (kg/m3) 1831

Humedad óptima (%) 3.85

Módulo Resiliente

CBR óptimo (%) 80 Módulo resiliente (MPa) 291

Guardar

Figura 21. Información de la base granular.
Fuente: LanammeUCR.

Para la base estabilizada con cemento se ingresa el espesor, la razón de Poisson, el módulo resiliente inicial y final y el módulo de ruptura.
El módulo resiliente final representa un 10 % del inicial según el documento de LanammeUCR. (Trejos, Aguilar y Loría, 2016).

Base

Base Estabilizada con Cemento

Espesor (cm) 11 Razón de Poisson 0.25

Base estabilizada con cemento

Módulo resiliente inicial (MPa)

Módulo resiliente final (MPa)

Módulo de ruptura (MPa)

Guardar

Figura 22. Información de la base estabilizada con cemento.
Fuente: LanammeUCR.

Sub-base

Nuevamente se establece el nivel como 3 y se ingresa el espesor de la capa, la Razón de Poisson, índice de plasticidad, porcentaje pasando el tamiz $N^{\circ}200$, gravedad específica, densidad seca máxima, humedad óptima y el CBR para el cálculo automático del módulo resiliente. La pantalla que muestra CR-ME para ingresar los datos de entrada de la sub-base es prácticamente la misma que para la base granular, con la diferencia de que se deben introducir los datos correspondientes a ésta otra capa.

Sub-rasante

De la misma forma que para la sub-base y base, se escoge el nivel 3 y se ingresa la misma información; la única diferencia radica en que no se coloca el espesor de capa sino la profundidad a la roca firme. En la información suministrada por el MOPT no se registra la presencia de roca firme en ninguno de los tramos en estudio.

Subrasante	
Nivel 3 (Básico)	
Profundidad a la roca firme (m)	25
Razón de Poisson	0.45
Nivel 3 (Básico)	
P200	91
Índice de plasticidad	18
Gravedad Específica y Proctor Modificado	
Gravedad específica (Gs)	2.681
Densidad seca máxima (kg/m3)	1197
Humedad óptima (%)	24
Módulo Resiliente	
CBR óptimo (%)	1
Módulo resiliente (MPa)	17.62
Guardar	

Figura 23. Información de la sub-rasante.
Fuente: LanammeUCR.

Modelos de desempeño

Se establecen los criterios de aceptación para el diseño considerando las recomendaciones expuestas en una publicación especial de LanammeUCR, donde se menciona que para ejes equivalentes menores de 3 millones se recomienda un umbral de falla para el porcentaje de área agrietada de 75% y un ahuellamiento permisible máximo de 25 mm. Para el agrietamiento longitudinal el valor límite es de 2000 pies/milla. (LanammeUCR, s.f.). Para el caso del pavimento flexible se ingresan dichos umbrales y se verifica que el diseño propuesto cumpla con lo establecido. Sin embargo, para el semi-rígido la fatiga debe ser revisada

externamente con el modelo de la PCA, por lo que se debe utilizar el software PITRA PAVE.

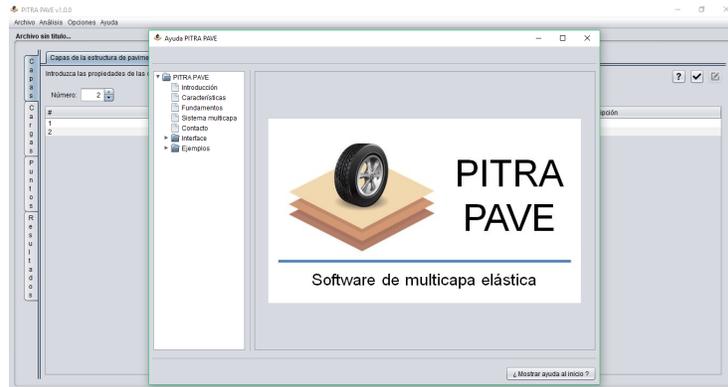


Figura 24. PITRA PAVE, interfaz principal.

Fuente: LanammeUCR.

A continuación se menciona el procedimiento para determinar el esfuerzo a tensión:

1. Se introducen el número de capas y las características de cada una de ellas; como el módulo resiliente, la razón de Poisson, el espesor y una breve descripción.

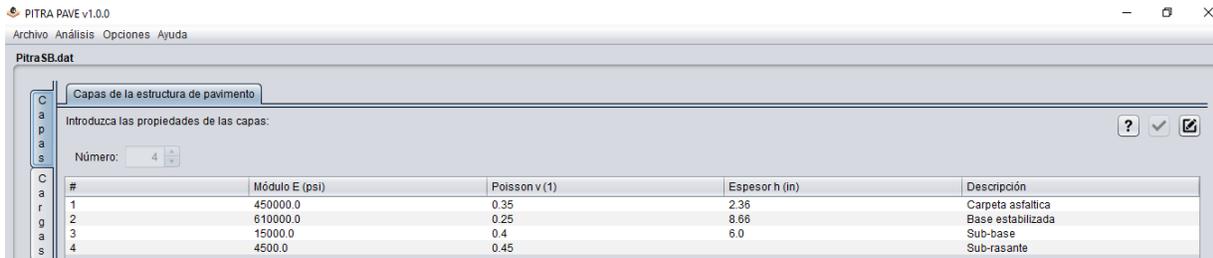


Figura 25. Capas de la estructura de pavimento.

Fuente: LanammeUCR.

2. En la sección de cargas se especifica el número de cargas y su valor, la presión de la llanta y las coordenadas.

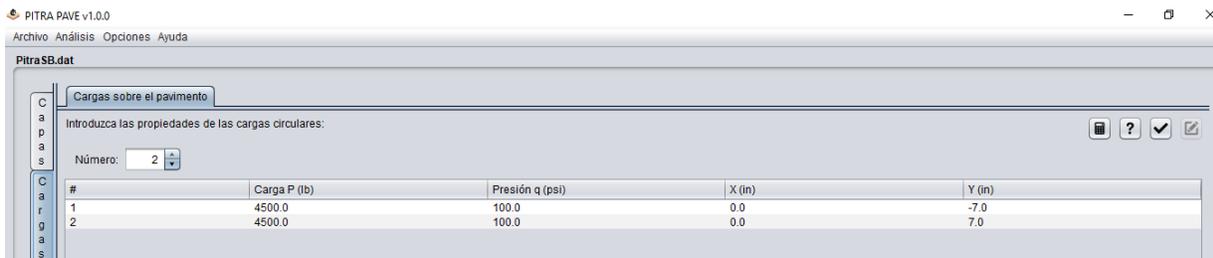


Figura 26. Cargas sobre el pavimento.

Fuente: LanammeUCR.

- Se colocan las coordenadas, la profundidad y la capa a la que pertenece cada punto que se quiere analizar.

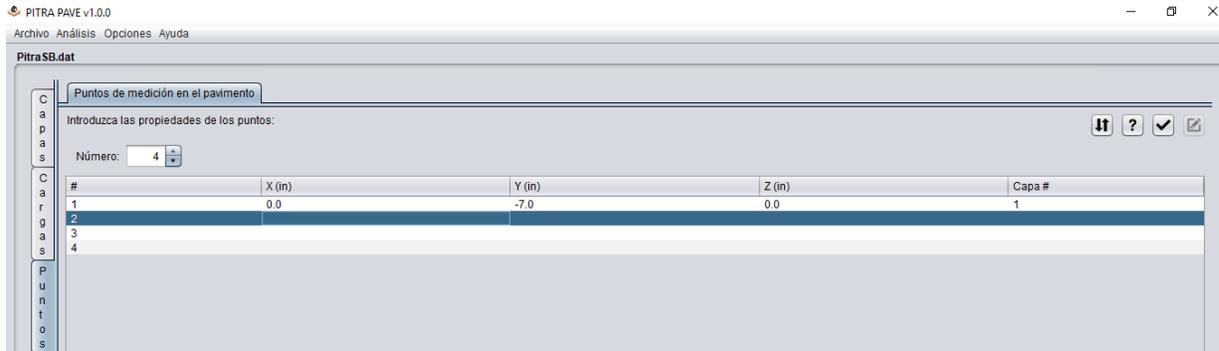


Figura 27. Puntos de medición en el pavimento.
Fuente: LanammeUCR.

- Con todos los datos de entrada se calculan los resultados. Se obtienen los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cada punto de análisis. Con respecto a la convención de signos se tiene que los valores negativos representan tensión y los positivos compresión.

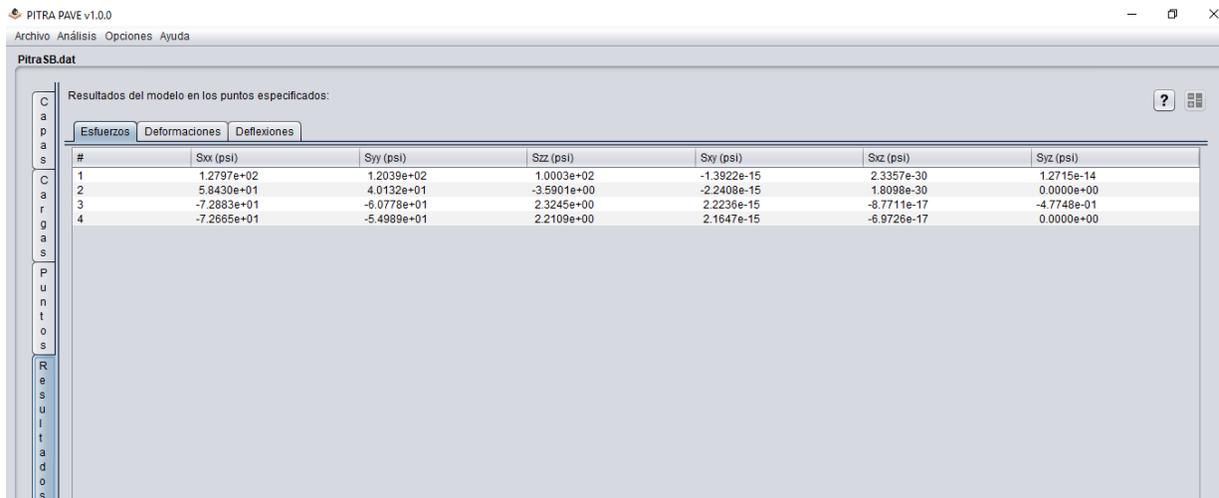


Figura 28. Resultados del modelo.
Fuente: LanammeUCR.

Metodología Mecánica-Empírica para pavimentos rígidos

Para el empleo de metodologías mecanicistas en pavimentos rígidos, LanammeUCR ha desarrollado mediante metodologías de regresión lineal múltiple y de redes neurales artificiales una serie de modelos que predicen las respuestas mecánicas del pavimento. Ejemplo de ello, es el software AP-Rigid que incluye todos estos modelos validados mediante técnicas estadísticas. Para determinar las respuestas del pavimento rígido y poder aplicar los modelos de desempeño para verificar que las dimensiones encontradas por medio de AASHTO 93 cumplen con los criterios de aceptación establecidos; se emplea la herramienta computacional AP-Rigid de LanammeUCR.

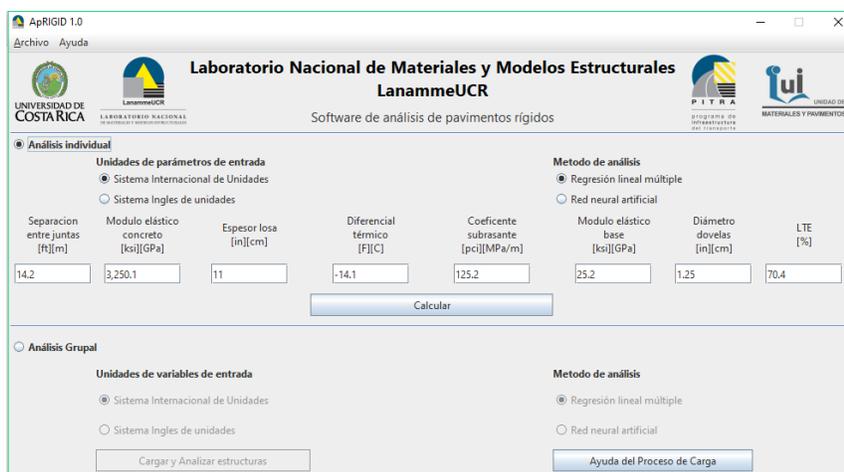


Figura 29. AP-Rigid, interfaz principal.
Fuente: LanammeUCR.

La utilización del software es sencilla y el primer paso es elegir si se realiza un análisis individual o grupal. La Ing. Wendy Sequeira de LanammeUCR recomienda realizar un análisis individual y emplear el método de análisis regresión lineal múltiple.

Luego se deben ingresar algunos datos del pavimento rígido y se calculan las respuestas:

- Separación entre juntas: se determina considerando la recomendación de 18-21 veces el espesor de losa. (Castro, 2018a).
- Módulo elástico del concreto: se determinó anteriormente y corresponde a 3845.283 ksi.
- Espesor de losa: inicialmente, se asume el espesor encontrado por medio de la metodología AASHTO 93 y con base en los resultados obtenidos se decide si es necesario aumentarlo o si se puede disminuir sin afectar la calidad del diseño.

- Diferencial térmico: se emplea típicamente $6.8\text{ }^{\circ}F$.
- Módulo de reacción de la sub-rasante (pci): corresponde al valor encontrado por medio de la metodología AASHTO 93 para diseño de pavimentos rígidos.
- Módulo de resiliencia de la base o sub-base utilizada: como se utiliza una base mejorada con cemento el valor es de 31 ksi.
- Diámetro de las dovelas: anteriormente se eligió emplear una varilla $N^{\circ}5$ por lo que se tiene un diámetro de 0.625 in.
- Porcentaje de transferencia de carga de las dovelas (LTE): la Ing. Wendy Sequeira recomienda utilizar un LTE mayor al 90% por tratarse de un pavimento nuevo.

Una vez que se tienen los valores de las respuestas mecánicas del pavimento, se procede a evaluar el modelo de bombeo y escalonamiento descritos en la literatura (Huang, 2004); también se evalúa el modelo de fatiga propuesto por el Ing. Sukti Monge. (Monge, 2013). Se realiza una hoja de cálculo en Excel para determinar el valor correspondiente de cada modelo. En el caso del modelo de bombeo y erosión se establece como criterio de aceptación el valor de uno y para el de escalonamiento un límite de 0.12 in con base en AASHTO 2008. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008). Si alguno no cumple con los límites establecidos, se debe elegir un nuevo espesor de losa y encontrar nuevamente el esfuerzo máximo para poder verificar el cumplimiento del modelo.

Presupuesto del Proyecto

Costo de construcción inicial

Inicialmente para el cálculo de los costos de los proyectos en cada cantón se planteaba emplear el resumen de actividades y renglones de pago calculados por cada municipalidad para la totalidad del proyecto en el año 2012, cuyo objetivo era actualizar los costos para el presente año. Sin embargo, ninguna municipalidad cuenta con la estructura de costos con la cual realizó esa tabla resumen que fue presentada al MOPT en el 2012.

Debido a lo anterior, se decide recurrir al Departamento de Costos del MOPT donde el Ing. Jonathan Rojas y el Ing. Juan Carlos Elizondo recomiendan emplear una estructura de costos de referencia de un proyecto cercano a los cantones que se están analizando; si bien no corresponde a la estructura de costos utilizada en el 2012 por las municipalidades, representa una buena estimación pues se trata de otro proyecto del Programa de Red Vial Cantonal realizado en Santa Bárbara en enero del 2015.

El reajuste de precios se realiza para agosto 2018 considerando los índices de precio que publica el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC) y los índices de salarios mínimos nominales del Banco Central de Costa Rica.

Para el reajuste de precios se emplea la siguiente expresión matemática: (La Gaceta, 2012)

$$\begin{aligned}
 RP = & ((CD_M + CI_M) * EPA) * \left(\frac{I_{SMN1}}{I_{SMN0}} - 1 \right) + \sum_{i=1}^n (CEA * EPA) * \left(\frac{I_{CEA1i}}{I_{CEA0i}} - 1 \right) \\
 & + (CI_I * EPA) * \left(\frac{IPC_1}{IPC_0} - 1 \right) + \sum_{i=1}^n (CE * RA_i) * EPA
 \end{aligned} \tag{52}$$

RP = representa el monto total de reajuste de precios periódica

EPA = representa el monto de la estimación periódica del avance

CD_M = representa la ponderación del monto total a precios iniciales de los Costos en Mano de Obra Directa presupuestados

CEA = representa la ponderación del costo total a precios iniciales de los grupos de insumos y servicios especiales

CI_M = representa la ponderación del monto total a precios iniciales de los Costos en Mano de Obra Indirecta presupuestados

CI_I = representa la ponderación del monto total a precios iniciales de los Costos de Insumos Indirectos presupuestados

CE = representa la ponderación del monto total a precios iniciales del costo total de los insumos y servicios específicos

I_{SMN1} = representa el valor del Índice de Salarios Mínimos Nominales para la actividad de construcción para el mes de facturación

I_{SMN0} = representa el valor del Índice de Salarios Mínimos Nominales para la actividad de construcción inicial

I_{CEA1i} = representa el valor del índice de precios de los grupos de insumos y servicios especiales respectivo para el mes de facturación

I_{CEA0i} = representa el valor del índice de precios de los grupos de insumos y servicios especiales respectivo inicial

IPC_I = representa el valor del Índice de Precios al Consumidor para el mes de facturación

IPC_0 = representa el valor del Índice de Precios al Consumidor inicial

RA_i = cambio porcentual del precio

La estructura de costos de referencia y los precios unitarios se presentan en la sección de anexos. (Ver Anexos 12 y 13).

Para la estimación de las cantidades de material necesarias para el proyecto se utilizan los espesores de cada paquete estructural diseñado previamente, la longitud de cada tramo y el ancho de calle. Además, se utilizan los renglones de pago establecidos en el CR-2010 para establecer las unidades de trabajo con la asignación de recursos.

Por recomendación del Departamento de Costos para este tipo de proyectos se consideran los renglones de pago "Reajuste de precios" y "Trabajo a costo más porcentaje"; este último contempla los trabajos que pueden surgir de forma impredecible.

Para determinar el valor económico de éstos dos renglones de pago, se utiliza el desglose de costos presentado por cada municipalidad en el 2012 cuyo valor se establece con base en un porcentaje del costo total, mismo porcentaje empleado para determinar el costo actual.

Costo de mantenimiento

Para realizar una estimación adecuada del costo de cada pavimento se debe considerar tanto el costo de construcción inicial como el costo de mantenimiento; la determinación de éste último no es sencilla, ya que requiere de la experiencia generada a través del tiempo para establecer las intervenciones que necesita la estructura de pavimento.

Cada tipo de pavimento al poseer características específicas va a presentar diferentes tipos de deterioros e intervenciones apropiadas para cada caso en particular. De igual forma, la severidad del daño que sufre la estructura depende de factores presentes en la zona; como: el clima, el tránsito y los materiales constituyentes.

Al no encontrar información en la literatura correspondiente a la provincia de Heredia, se utiliza información de patrones de deterioro y porcentajes de daño alusivos a otras provincias. Por lo tanto, se realiza una estimación del costo de mantenimiento para cada tipo de pavimento especificando el año, el tipo de intervención y el costo total que cada uno requiere.

Los precios unitarios de las intervenciones que se proponen son tomados como guía de un proyecto de graduación realizado en el 2016, si bien dichos valores no se pueden actualizar al presente año pues no se cuenta con la estructura de costos; representan una buena aproximación. (Coto, 2016)

Propuesta elegida

Inicialmente para la elección de la propuesta que más se adapta a las necesidades de cada lugar, se les consulta a las municipalidades si tienen alguna preferencia o inclinación hacia algún tipo de pavimento, a lo que responden que no pero que ya habían realizado una propuesta en el 2012 en la cual exponían el tipo de pavimento que según su percepción respondía a las necesidades.

Sin embargo, mencionan que el documento realizado en el 2012 no es definitivo y que si se considera que otra opción es mejor se puede acoger una nueva alternativa.

Debido a lo anterior, se realiza un análisis costo-beneficio para cada una de las alternativas planteadas; se consideran aspectos económicos, de tiempo de colocación, facilidad constructiva y desempeño en general.

Resultados

Santo Domingo

Como se aclara en la sección de introducción, inicialmente se tiene un tramo de 520 m con una estructura de pavimento, es por esto que se realiza una visita al sitio para dar un diagnóstico a partir de la condición superficial del pavimento.

Se utiliza un manual proporcionado por el MOPT que incorpora un catálogo de deterioros con la descripción de los mismos, causas, nivel de severidad, y esquema de la falla. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2016a).

A partir de dicho catálogo se logra determinar la presencia de los siguientes deterioros y su respectivo nivel de severidad:

Cuadro 9. Tipos de deterioros y nivel de severidad

Deterioro	Severidad
Cuero de lagarto	Baja
Grieta longitudinal	Baja
Pulimiento de agregados	-
Desgaste superficial	Baja
Baches	Baja
Huecos	Medio

Fuente: Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica.

Solo se observan seis tipos de deterioros, los cuales presentan una severidad baja, a excepción de los huecos cuyo nivel es medio. A pesar de que solo dos huecos se presentaron en todo el tramo, tienen una profundidad mayor a 50 mm y un diámetro promedio de 300 mm por lo que la severidad debe establecerse como Medio debido a la tabla presentada en el manual.

Se debe mencionar que, a excepción de pulimiento de agregados y desgaste superficial, los deterioros se observan en lugares específicos y en poca incidencia. Ejemplo de ello es que se encuentran solamente dos huecos en todo el tramo y con respecto a los baches, los que se presentan son debido a los puntos de muestreo que realizó el MOPT. (Ver Apéndice 13).

Por otro lado, se tiene otro tramo de 730 m sin pavimento flexible y en malas condiciones; para el cual se realiza el diseño de la estructura de pavimento.

En primer lugar, se determinan los ejes equivalentes de diseño a través del TPD incrementado por medio de un factor de expansión del 20 %, con un periodo de diseño de 10 años y con una tasa de crecimiento anual del 4 %. Además se utilizan factores camión específicos para el pavimento flexible y semi-rígido.

Cuadro 10. Cálculo de ejes equivalentes de diseño para pavimento flexible y semi-rígido

Vehículo	TPD	Factor camión	EQQ diarios	EQQ anuales	Factor de crecimiento	Factor direccional	Factor carril	EQQ carril de diseño
Liviano	482	0.001	0.482	176.076	12.006	50 %	100 %	1056.994
CL	1	0.020	0.024	8.760	12.006	50 %	100 %	52.587
C2	24	0.630	15.120	5518.800	12.006	50 %	100 %	33129.652
C3	13	1.710	22.572	8238.780	12.006	50 %	100 %	49457.838
Total								83697.070

Según la guía de diseño AASHTO 93 existe una correlación aproximada entre los ejes equivalentes de diseño del pavimento flexible y del rígido; la misma consiste en dividir los EQQ carril de diseño obtenidos para el pavimento flexible entre 0.67 y con esto, determinar los ejes equivalentes requeridos para el diseño de pavimento rígido.

Por lo tanto, aplicando el criterio mencionado anteriormente, se tiene que los EQQ carril de diseño requeridos para el pavimento rígido son 124 921.

Pavimento Flexible

Considerando lo expuesto en la sección de metodología para el diseño de pavimentos flexibles, se obtienen los siguientes números estructurales y con ellos se determinan los espesores teóricos requeridos y los propuestos para cada capa.

Cuadro 11. Estructura de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93

Material	SN (in)	Esp. teórico (in)	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	1.152	2.607	6.622	7.000
Base granular	1.515	2.282	5.796	10.000
Sub-base	3.562	16.798	42.667	43.000

Para la carpeta asfáltica se establece un mínimo de 5 cm y para la base granular de 10 cm, considerando las recomendaciones de un documento realizado por LanammeUCR que la clasifica como estructura tipo 2 para caminos de tránsito bajo. (Leiva, s.f.).

Establecidos los espesores semilla para la estructura de pavimento es necesario revisarlos por medio de la metodología mecanística-empírica. Se logra determinar si los espesores propuestos cumplen o no, por medio del establecimiento de umbrales permitidos para los diferentes tipos de deterioro.

Los valores límite aceptados se definen con base en recomendaciones realizadas en una publicación especial de LanammeUCR, donde se establece que para ejes equivalentes menores de 3 millones se permite un valor límite de porcentaje de área agrietada de 75 % y 25 mm para el ahuellamiento. (LanammeUCR, s.f.).

El siguiente cuadro muestra los resultados obtenidos por medio del software CR-ME para los espesores determinados con la metodología AASHTO 93:

Cuadro 12. Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Área agrietada	3.2	75	%	Cumple
Agrietamiento longitudinal	519.3	2000	pies/milla	Cumple
Ahuellamiento total	22.78	25	mm	Cumple

Como se observa en el cuadro anterior, a pesar de que los resultados obtenidos con la metodología establecida por AASHTO en 1993 cumplen con los valores límite, se decide optimizar el diseño pues se considera una serie de factores que se mencionan en la sección de análisis de resultados.

Como nuevo paquete estructural se obtiene 7 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 30 cm de sub-base; de igual forma, se verifica su cumplimiento con los parámetros analizados.

Cuadro 13. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Área agrietada	3	75	%	Cumple
Agrietamiento longitudinal	526.9	2000	pies/milla	Cumple
Ahuellamiento total	23.78	25	mm	Cumple

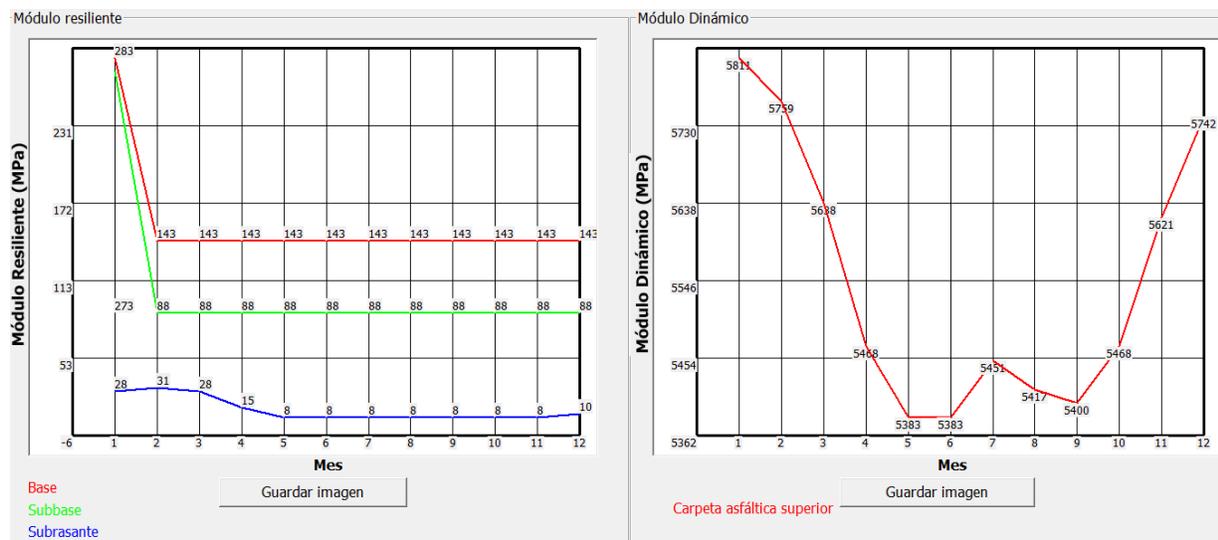


Figura 30. Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año. Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

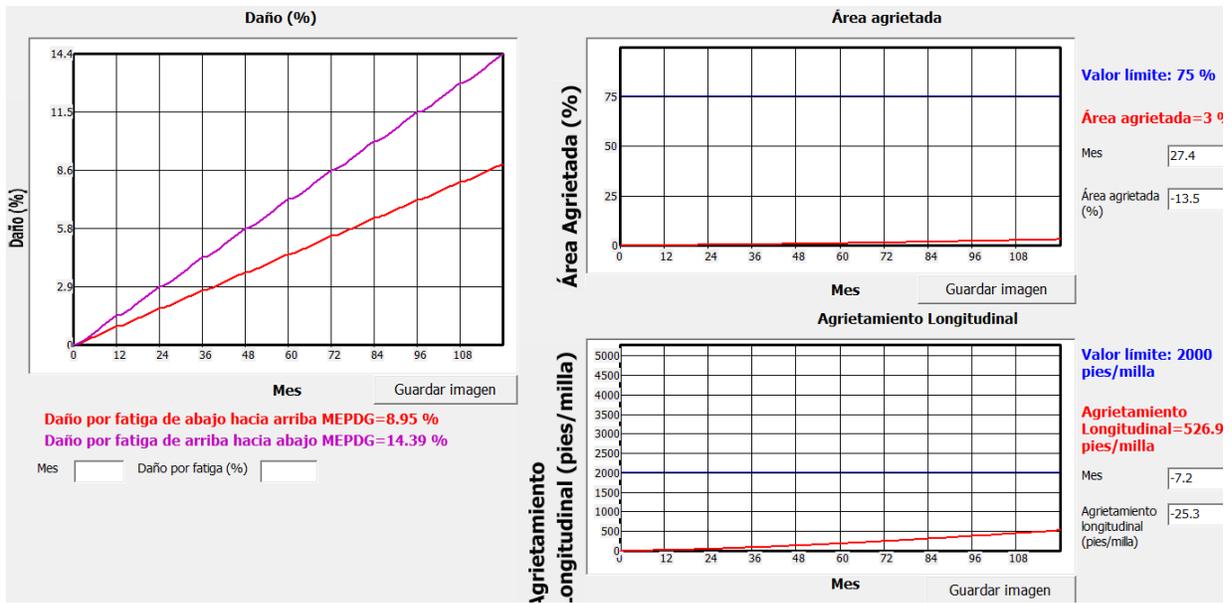


Figura 31. Porcentaje de daño, de área agrietada y agrietamiento longitudinal para la carpeta asfáltica.

Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

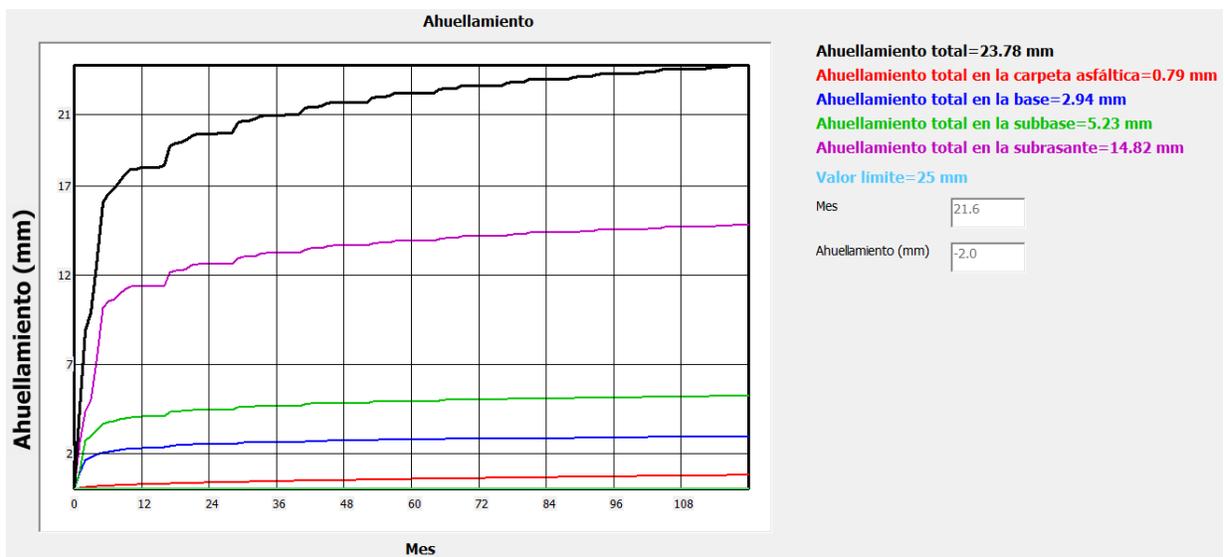


Figura 32. Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.

Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

La figura anterior muestra el ahuellamiento total obtenido en la estructura de pavimento y el ahuellamiento presente por capa.

Pavimento Semi-rígido

De igual forma que para el pavimento flexible, el diseño del pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93 da como resultado los siguientes espesores:

Cuadro 14. Estructura de pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93

Material	SN (in)	Esp. teórico (in)	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	0.002	0.004	0.010	5.000
Base estabilizada	1.514	4.076	10.354	15.000
Sub-base	3.533	15.880	40.336	41.000

Se establece un mínimo de 15 cm para la base estabilizada con cemento considerando un informe realizado por LanammeUCR en el año 2005. (Leiva, Arce y Castro, 2005). El software CR-ME permite revisar el ahuellamiento del pavimento y se obtiene:

Cuadro 15. Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Ahuellamiento total	19.63	25	mm	Cumple

Sin embargo, como se menciona en la sección de metodología, en el caso del pavimento semi-rígido la fatiga debe ser revisada externamente con un modelo de desempeño específico que estima si la estructura va a soportar el número de repeticiones de carga del periodo de diseño.

Para el empleo del modelo mencionado, es necesario averiguar el máximo esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico por lo que se hace uso del software PITRA PAVE de LanammeUCR.

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos						
#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.6803e+02	1.5435e+02	1.0003e+02	-2.5116e-15	6.3043e-31	3.4319e-15
2	9.9308e+01	7.2383e+01	-3.5901e+00	-3.2973e-15	9.5666e-31	0.0000e+00
3	-1.1466e+02	-9.4874e+01	4.9451e+00	3.6349e-15	-2.3875e-16	-1.2997e+00
4	-1.0848e+02	-7.1852e+01	4.5416e+00	4.4860e-15	-2.4532e-16	0.0000e+00

Figura 33. Resultados del modelo.
Fuente: PITRA PAVE, LanammeUCR.

Como se aprecia, se tiene un máximo esfuerzo a tensión muy alto que ocasiona que el modelo no cumpla.

Cuadro 16. Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA

Parámetro	Valor
Máximo esfuerzo a tensión (psi)	114.000
Módulo de ruptura a los 28 días (psi)	107.040
Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga	3.812
Número de repeticiones de carga en el periodo de diseño	83697.000
Condición	No Cumple

Por lo tanto, se realizan una serie de iteraciones hasta obtener que 7 cm de carpeta asfáltica, 25 cm de base estabilizada con cemento y 15 cm de sub-base cumplen con los umbrales establecidos para el ahuellamiento y la fatiga.

Cuadro 17. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Ahuellamiento total	15.4	25	mm	Cumple

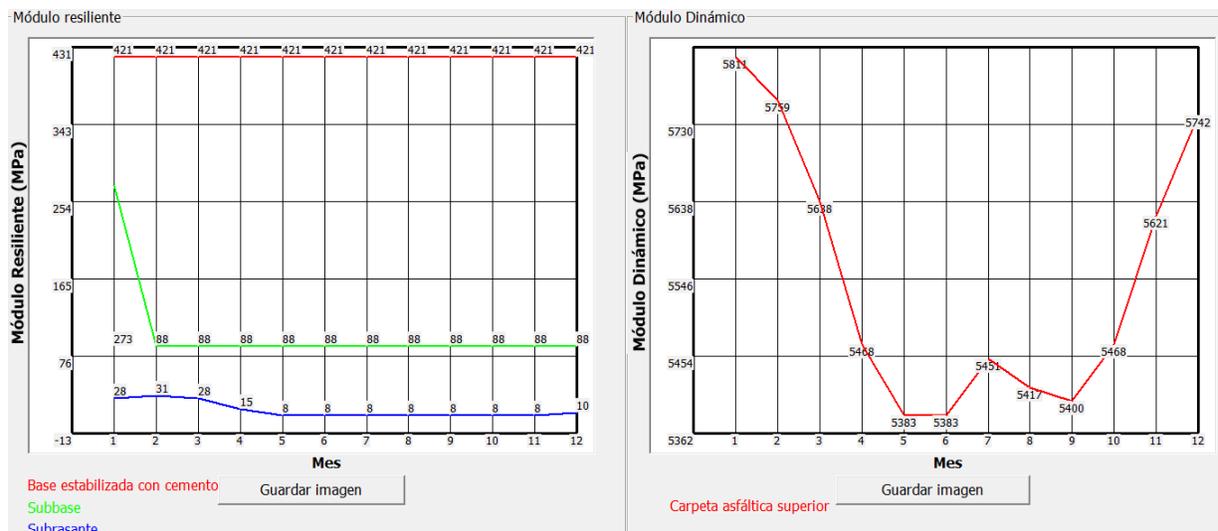


Figura 34. Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.
Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

Para el caso de la base estabilizada con cemento se tiene que no presenta variación por las condiciones climáticas y se mantiene constante a lo largo del periodo de diseño.

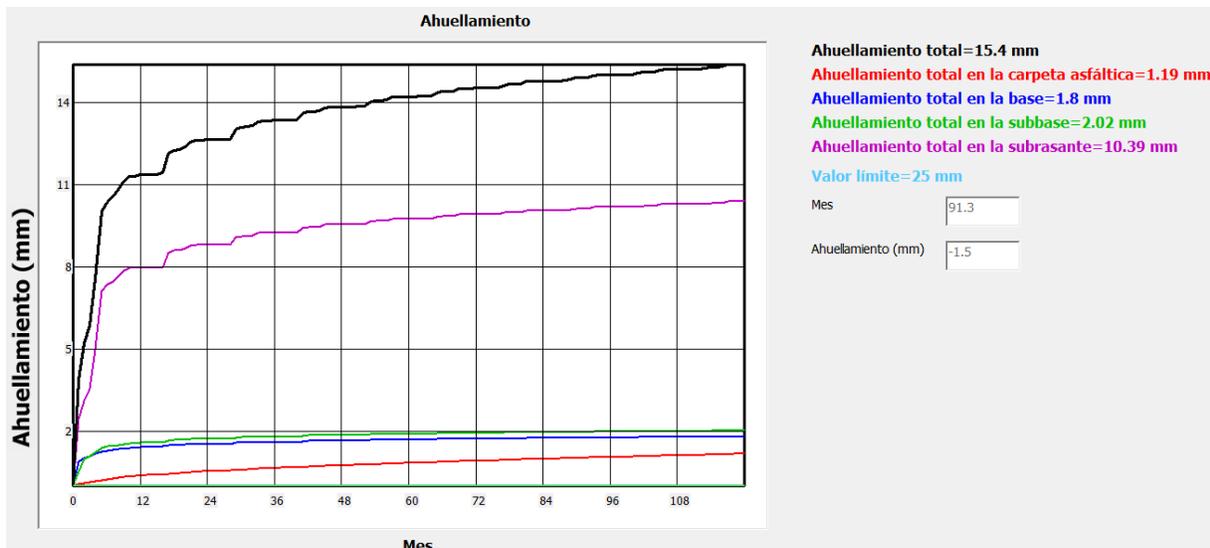


Figura 35. Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.
 Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

Aunado a esto, se determina el esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada para verificar el cumplimiento de las especificaciones.

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.2925e+02	1.2330e+02	1.0003e+02	-1.0940e-15	1.9794e-31	1.0775e-15
2	5.8253e+01	4.1768e+01	-3.5901e+00	-2.0189e-15	-5.1516e-30	0.0000e+00
3	-6.9810e+01	-6.0397e+01	1.2723e+00	1.7292e-15	-1.0175e-16	-5.5391e-01
4	-7.0326e+01	-5.8296e+01	1.2533e+00	1.4733e-15	-9.2473e-17	0.0000e+00

Figura 36. Resultados del modelo.
 Fuente: PITRA PAVE, LanammeUCR.

Al obtener el máximo valor de los esfuerzos a tensión mostrados en la figura anterior, se revisa el modelo de la PCA y se obtiene que la condición se cumple.

Cuadro 18. Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA

Parámetro	Valor
Máximo esfuerzo a tensión (psi)	70.000
Módulo de ruptura a los 28 días (psi)	107.040
Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga	84533.908
Número de repeticiones de carga en el periodo de diseño	83697.000
Condición	Cumple

Pavimento Rígido

Para el diseño del pavimento rígido por medio de la metodología empírica se utilizan como propiedades del concreto hidráulico los mínimos establecidos en el CR-2010 como la resistencia a la compresión a los 28 días y el módulo de ruptura.

También se considera que la calidad de los drenajes va a ser buena y que el tiempo de exposición a niveles de humedad que se aproximan a la saturación será mayor de 25 %.

Además, se considera que la losa va a ser colocada sobre una base mejorada con cemento de 15 cm.

Cuadro 19. Diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93

Descripción	Valor	Unidad
Espesor de losa	4.77	in
Espesor de base mejorada con cemento	6	in
Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante	107	pci
Módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido	107	pci
Daño relativo	25.54	-
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante corregido por potencial pérdida de soporte	25	pci

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del diseño del acero de refuerzo para la losa pues los cálculos completos se presentan en la sección de apéndices.

Cuadro 20. Diseño de acero de refuerzo

Descripción	N° de Varilla	Separación (cm)
Dovelas	5	30
Barras de amarre longitudinal	4	60

Al contar con el diseño completo del pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93, se debe verificar que cumpla con los criterios de aceptación establecidos para cada tipo de deterioro.

Para el modelo de fatiga lo que se debe verificar es que el número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla sea mayor que el número de repeticiones de carga establecidas para el periodo de diseño.

El modelo de bombeo y erosión lo que predice es la severidad del bombeo en el pavimento diseñado, por lo que si se obtienen valores altos se puede corregir el diseño desde el inicio y evitar problemas a futuro. Si el índice de bombeo es cero indica que no hay bombeo, uno que el bombeo es leve, dos que es medio y tres que el bombeo es grave; por lo tanto, se establece un umbral de uno para el cumplimiento del modelo.

El criterio de aceptación para el escalonamiento es de 0.12 in como máximo. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).

Una vez establecidos los límites para aceptar o no los diseños, se procede a revisar cada uno de los modelos.

Cuadro 21. Modelo de Fatiga

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo máximo aplicado a la losa	466.700	psi
Módulo de ruptura del concreto	640.000	psi
Número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla	12887.647	-

Como según el modelo de fatiga solo se tienen 12 887.647 repeticiones de carga aplicadas hasta la falla con las características presentadas anteriormente, es necesario elegir un nuevo espesor de losa que cumpla con las repeticiones de carga para el periodo de diseño.

El modelo de bombeo y erosión da como resultado la presencia de un bombeo leve, ya que su índice es 1.099; sin embargo, como se establece un máximo de uno para aceptar el diseño, se debe modificar la dimensión de la losa.

Cuadro 22. Modelo de bombeo y erosión

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.125	millones
Tipo de suelo	1.000	-
Precipitación anual	177.410	cm
Espesor de losa	4.770	in
Índice de congelación	0.000	-
Índice de bombeo	1.099	-

Aunque ya se revisaron el modelo de fatiga y bombeo y no cumplen con los criterios de aceptación establecidos, se decide analizar el de escalonamiento para observar su comportamiento respecto de los otros modelos.

Se tiene que a pesar de que el modelo de escalonamiento sí cumple con los límites planteados, el hecho de que el pavimento rígido no cumpla dos de los modelos analizados ocasiona el rechazo del diseño original y el aumento de la losa.

Cuadro 23. Escalonamiento

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.125	millones
Esfuerzo máximo	466.700	psi
Espaciamiento entre juntas transversales	8.350	ft
Módulo de reacción de la sub-rasante	25.000	pci
Escalonamiento	0.008	in

Es por ello, que se propone una losa de 15 cm con dovelas #6 cada 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm, colocada sobre una base mejorada con cemento de 15 cm. Considerando las nuevas dimensiones del pavimento rígido se utiliza AP-Rigid de LanammeUCR para determinar el esfuerzo máximo aplicado a la losa y verificar que el modelo de fatiga cumpla con el número de repeticiones de carga.

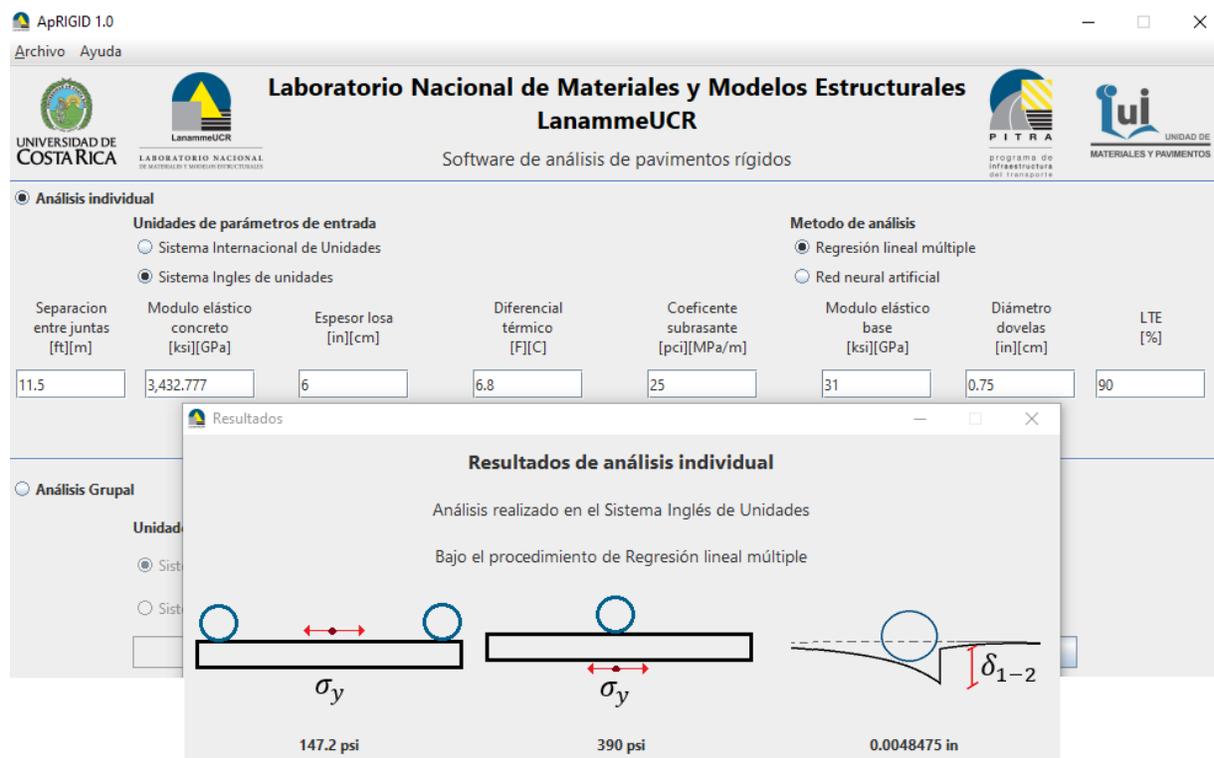


Figura 37. Respuestas mecánicas de la estructura de pavimento.
Fuente: AP-Rigid, LanammeUCR.

Cuadro 24. Modelo de Fatiga

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo máximo aplicado a la losa	390.000	psi
Módulo de ruptura del concreto	640.000	psi
Número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla	1067368.076	-

Del Cuadro 24 se evidencia que, si bien el esfuerzo máximo aplicado a la losa sigue siendo alto, se obtiene un número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla que supera en gran medida el número de repeticiones de carga para el periodo de diseño. Como se aprecia el modelo anterior depende del esfuerzo máximo aplicado a la losa y tiene un comportamiento que es inversamente proporcional, lo que quiere decir que con altos esfuerzos

aplicados el modelo de fatiga presenta como resultado un número pequeño de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla, y viceversa.

Evidentemente el cumplimiento del modelo también depende de las repeticiones de carga en el periodo de diseño pues es contra lo que se compara el valor obtenido en el modelo de fatiga.

Con las nuevas dimensiones propuestas también se obtiene el cumplimiento del modelo de bombeo y erosión y el de escalonamiento, como se muestra a continuación:

Cuadro 25. Modelo de bombeo y erosión

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.125	millones
Tipo se suelo	1.000	-
Precipitación anual	177.410	cm
Espesor de losa	6.000	in
índice de congelación	0.000	-
Índice de bombeo	0.648	-

Cuadro 26. Escalonamiento

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.125	millones
Esfuerzo máximo	390.000	psi
Espaciamiento entre juntas transversales	11.500	ft
Módulo de reacción de la sub-rasante	25.000	pci
Escalonamiento	0.007	in

Por lo tanto, se obtiene el diseño completo de los tres tipos de pavimento para la ruta en cuestión.

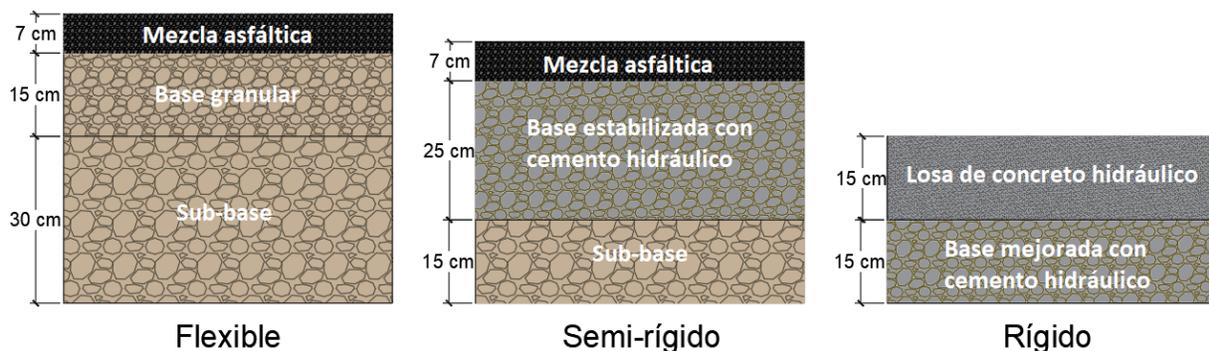


Figura 38. Paquete estructural para cada tipo de pavimento.

Fuente: AutoCAD, 2017.

San Pablo

El cálculo de ejes equivalentes se realiza con el TPD contabilizado en el cantón de San Pablo, de la misma forma se emplea un factor de expansión de 20 %, un periodo de diseño de 10 años y una tasa de crecimiento anual de 4 %.

Cuadro 27. Cálculo de ejes equivalentes de diseño para pavimento flexible y semi-rígido

Vehículo	TPD	Factor camión	EQQ diarios	EQQ anuales	Factor de crecimiento	Factor direccional	Factor carril	EQQ carril de diseño
Liviano	361	0.001	0.361	131.838	12.006	50 %	100 %	791.431
C2	53	0.630	33.264	12141.360	12.006	50 %	100 %	72885.234
C3	5	1.710	8.208	2995.920	12.006	50 %	100 %	17984.668
Total								91661.333

Para determinar los ejes equivalentes de diseño del pavimento rígido se utiliza, de la misma forma que para Santo Domingo, la recomendación de la AASHTO y se obtiene 136 807.960.

Pavimento Flexible

Con el procedimiento y los parámetros de diseño respectivos, explicados en la sección de metodología AASHTO 93 se encuentran los siguientes espesores propuestos para el pavimento flexible:

Cuadro 28. Estructura de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93

Material	SN (in)	Esp. teórico (in)	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	1.173	2.655	6.743	7.000
Base granular	1.540	2.473	6.281	10.000
Sub-base	2.835	10.129	25.727	26.000

Se revisa que dichos espesores cumplan con los umbrales establecidos.

Cuadro 29. Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Área agrietada	5.3	75	%	Cumple
Agrietamiento longitudinal	948.1	2000	pies/milla	Cumple
Ahuellamiento total	26.54	25	mm	No Cumple

Para este caso, los espesores encontrados por el método AASHTO 93 no cumplen los criterios de aceptación indicados para el ahuellamiento, por lo que es necesario variar los espesores y encontrar dimensiones adecuadas.

Como se mencionó anteriormente, los ensayos suministrados por el MOPT muestran la presencia de material granular en el sitio con aproximadamente 30 cm de espesor; por lo tanto, ese espesor se decide emplear como sub-base y a partir de ello dimensionar las otras capas.

Se encuentra que para una carpeta asfáltica de 5 cm, base granular de 20 cm y sub-base de 30 cm, se cumplen con todos los parámetros.

Cuadro 30. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Área agrietada	0.6	75	%	Cumple
Agrietamiento longitudinal	385.5	2000	pies/milla	Cumple
Ahuellamiento total	24.16	25	mm	Cumple

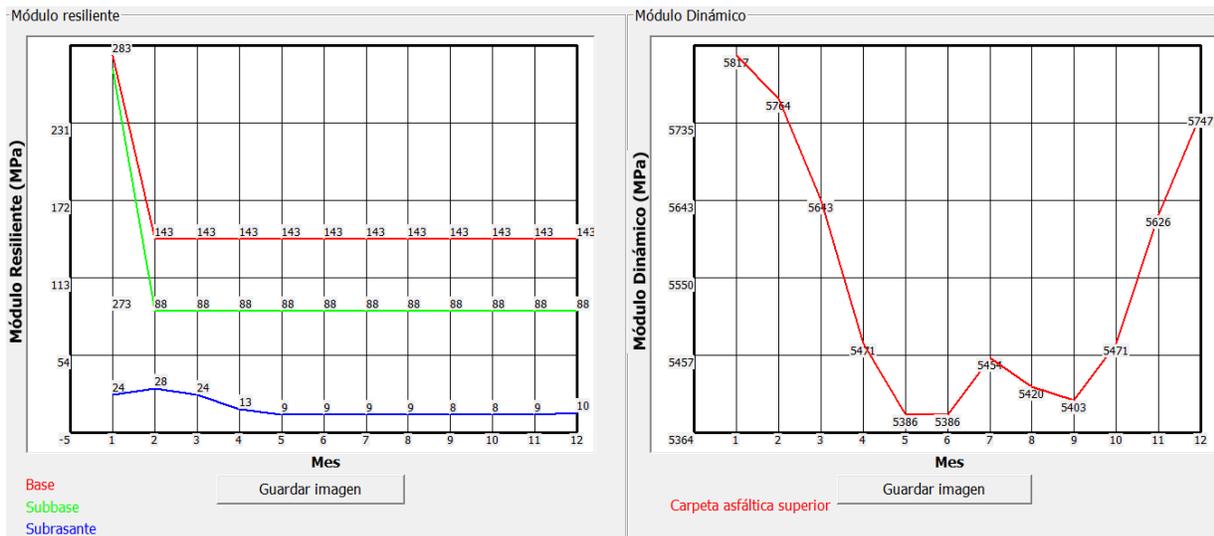


Figura 39. Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.
Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

Con base en el porcentaje de daño, de área agrietada y el agrietamiento longitudinal presente en la carpeta asfáltica, se puede notar en la siguiente figura que la fatiga no va a afectar considerablemente la estructura de pavimento.

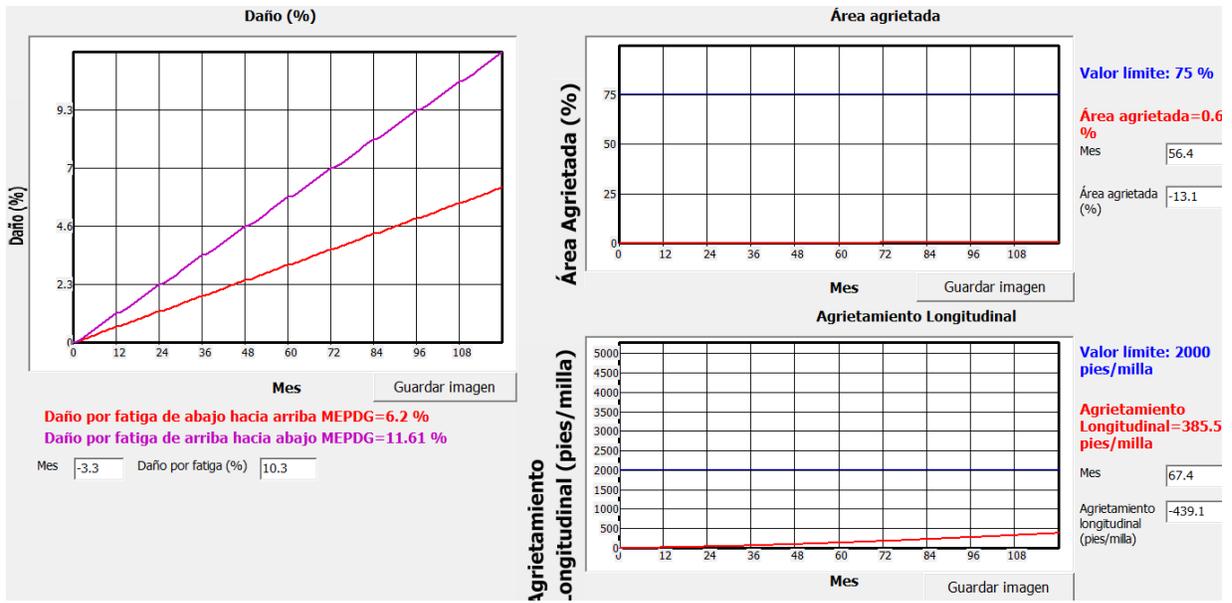


Figura 40. Porcentaje de daño, de área agrietada y agrietamiento longitudinal para la carpeta asfáltica.

Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

De hecho, el deterioro que rige el diseño es el ahuellamiento como se aprecia en la siguiente figura:

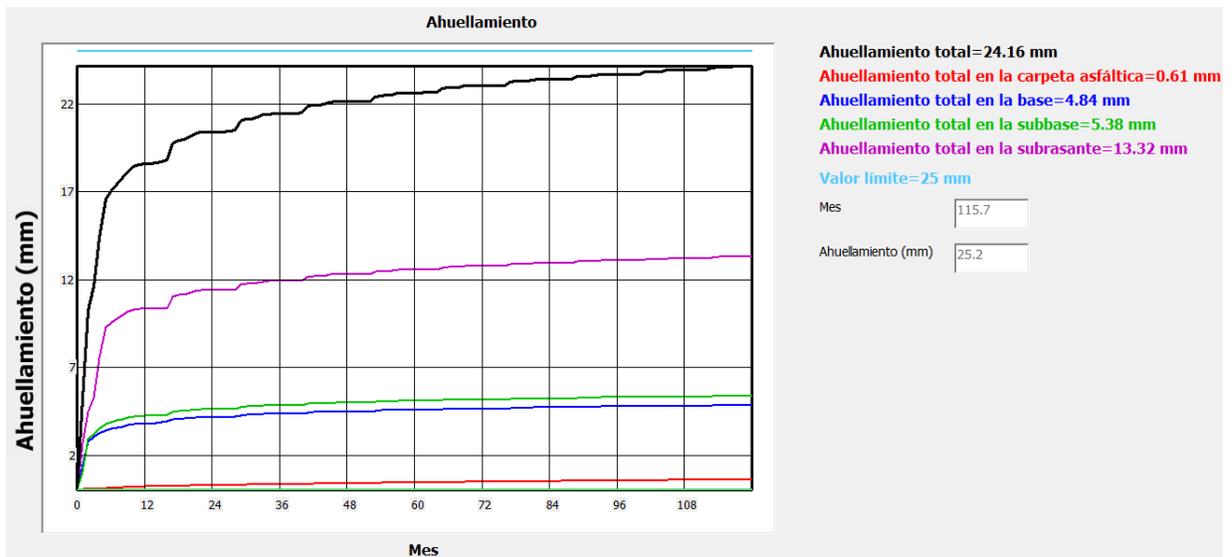


Figura 41. Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.

Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

Pavimento Semi-rígido

A continuación se presentan los espesores obtenidos por medio de la metodología AASHTO 93.

Cuadro 31. Estructura de pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93

Material	SN (in)	Esp. teórico (in)	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	0.012	0.026	0.066	5.000
Base estabilizada	1.539	4.234	10.755	15.000
Sub-base	2.821	9.346	23.739	24.000

Las dimensiones establecidas por medio de la metodología AASHTO 93 cumplen con el umbral seleccionado para el ahuellamiento.

Cuadro 32. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Ahuellamiento total	21.85	25	mm	Cumple

Sin embargo, al revisar el modelo de la PCA se observa que es necesario corregir el diseño pues no cumple con el número de repeticiones de carga, ya que el esfuerzo máximo a tensión en la parte inferior de la base estabilizada es de 117 psi, el cual es un valor alto.

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos		Deformaciones		Deflexiones		
#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.6703e+02	1.5301e+02	1.0003e+02	-2.5769e-15	1.2760e-30	6.9465e-15
2	9.9058e+01	7.1885e+01	-3.5901e+00	-3.3277e-15	-7.0175e-31	0.0000e+00
3	-1.1705e+02	-9.6790e+01	4.4623e+00	3.7208e-15	-2.3178e-16	-1.2617e+00
4	-1.1147e+02	-7.4542e+01	3.9374e+00	4.5227e-15	-2.4724e-16	0.0000e+00

Figura 42. Resultados del modelo.
Fuente: PITRA PAVE, LanammeUCR.

Se revisa el número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga empleando el modelo seleccionado.

Cuadro 33. Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA

Parámetro	Valor
Máximo esfuerzo a tensión (psi)	117.000
Módulo de ruptura a los 28 días (psi)	107.040
Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga	2.237
Número de repeticiones de carga en el periodo de diseño	91661.333
Condición	No Cumple

Debido a que el máximo esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada tiene un valor alto, el modelo no cumple y es necesario incrementar el espesor de la carpeta asfáltica y de la base.

Para 6 cm de carpeta asfáltica, 25 cm de base estabilizada con cemento y 30 cm de sub-base se logra una estructura de pavimento que cumple con los modelos de deterioro revisados.

Cuadro 34. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Ahuellamiento total	15.39	25	mm	Cumple

De hecho, el ahuellamiento se reduce considerablemente pues pasa de 21.85 mm a 15.39 mm.

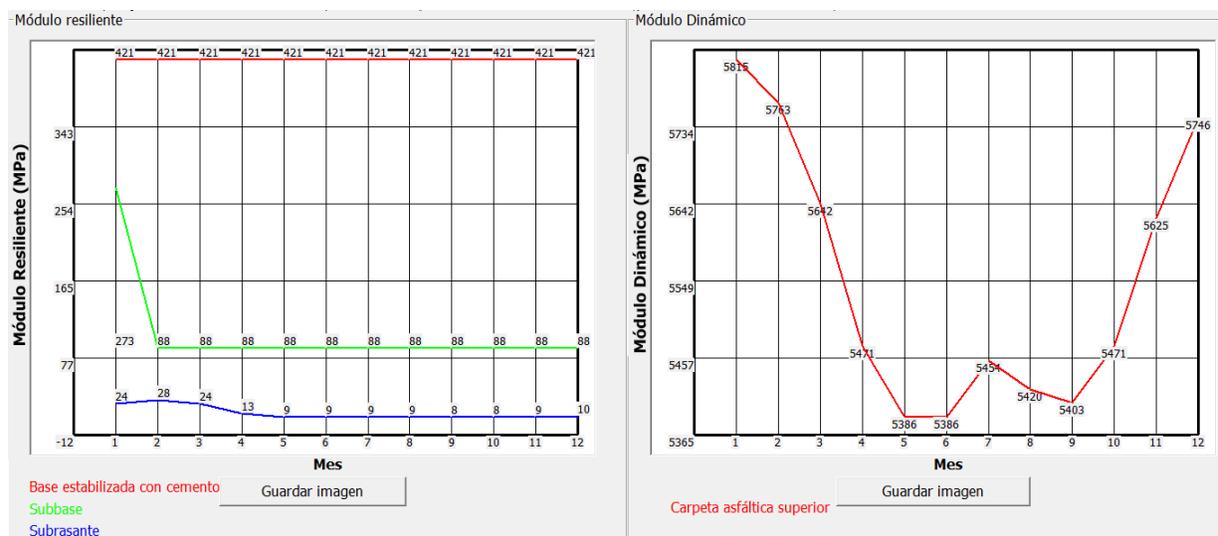


Figura 43. Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.
Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

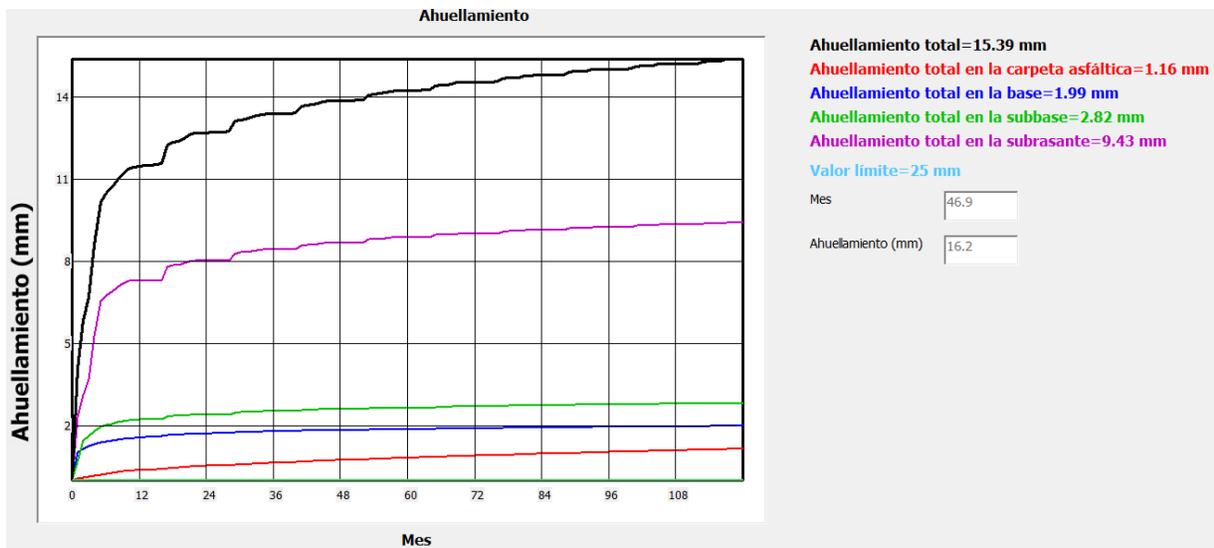


Figura 44. Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.
 Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

La fatiga presente en la base estabilizada con cemento hidráulico se revisa externamente con el modelo de PCA.

No obstante, primero se debe determinar el máximo esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada.

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.2139e+02	1.1521e+02	1.0003e+02	-1.1343e-15	8.4246e-31	4.5862e-15
2	5.0983e+01	3.4129e+01	-3.5901e+00	-2.0640e-15	3.5673e-31	0.0000e+00
3	-6.1070e+01	-5.1437e+01	2.1075e+00	1.7695e-15	-1.1718e-16	-6.3788e-01
4	-6.1317e+01	-4.8421e+01	2.1060e+00	1.5792e-15	-1.0138e-16	0.0000e+00

Figura 45. Resultados del modelo.
 Fuente: PITRA PAVE, LanammeUCR.

Al obtener un esfuerzo a tensión menor, se verifica que las nuevas dimensiones sí cumplen con las especificaciones.

Cuadro 35. Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA

Parámetro	Valor
Máximo esfuerzo a tensión (psi)	61.000
Módulo de ruptura a los 28 días (psi)	107.040
Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga	1423491.83
Número de repeticiones de carga en el periodo de diseño	91661.333
Condición	Cumple

Pavimento Rígido

Por medio de la metodología empírica se realiza el diseño completo del pavimento rígido y se obtienen las siguientes dimensiones:

Cuadro 36. Diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93

Descripción	Valor	Unidad
Espesor de losa	4.72	in
Espesor de base mejorada con cemento	6	in
Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante	190	pci
Módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido	190	pci
Daño relativo	19.57	-
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante corregido por potencial pérdida de soporte	36	pci

Aunado a esto, se diseña el acero de refuerzo que requiere la losa de concreto hidráulico.

Cuadro 37. Diseño de acero de refuerzo

Descripción	N° de Varilla	Separación (cm)
Dovelas	5	30
Barras de amarre longitudinal	4	60

Es necesario revisar los modelos de deterioro y nuevamente se obtiene que el modelo de fatiga no cumple por obtener un valor tan alto de esfuerzo.

Cuadro 38. Modelo de Fatiga

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo máximo aplicado a la losa	458.200	psi
Módulo de ruptura del concreto	640.000	psi
Número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla	20255.756	-

De igual forma, el modelo de bombeo y erosión tampoco cumple con el umbral establecido.

Cuadro 39. Modelo de bombeo y erosión

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.137	millones
Tipo se suelo	1.000	-
Precipitación anual	177.410	cm
Espesor de losa	4.720	in
índice de congelación	0.000	-
Índice de bombeo	1.171	-

Aunque para el modelo de escalonamiento sí se obtienen valores aceptables, se debe aumentar el espesor de losa para cumplir con todos los modelos analizados.

Cuadro 40. Escalonamiento

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.137	millones
Esfuerzo máximo	458.200	psi
Espaciamiento entre juntas transversales	8.260	ft
Módulo de reacción de la sub-rasante	36.000	pci
Escalonamiento	0.004	in

Se elige una losa de 15 cm, dovelas #6 espaciadas 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm como la nueva alternativa de pavimento rígido.

Nuevamente se debe revisar que los modelos de deterioro cumplan con los límites permitidos. En primer lugar, para revisar el modelo de fatiga se determina el esfuerzo máximo aplicado a la losa de concreto hidráulico. Luego se utiliza la expresión matemática del modelo para determinar el número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla.

Como se observa en la figura y cuadro siguientes, con el aumento del espesor de losa se obtiene el cumplimiento del modelo de fatiga, ya que se obtienen 7 190 949 de repeticiones de carga hasta la falla superando por mucho las obtenidas para el periodo de diseño.

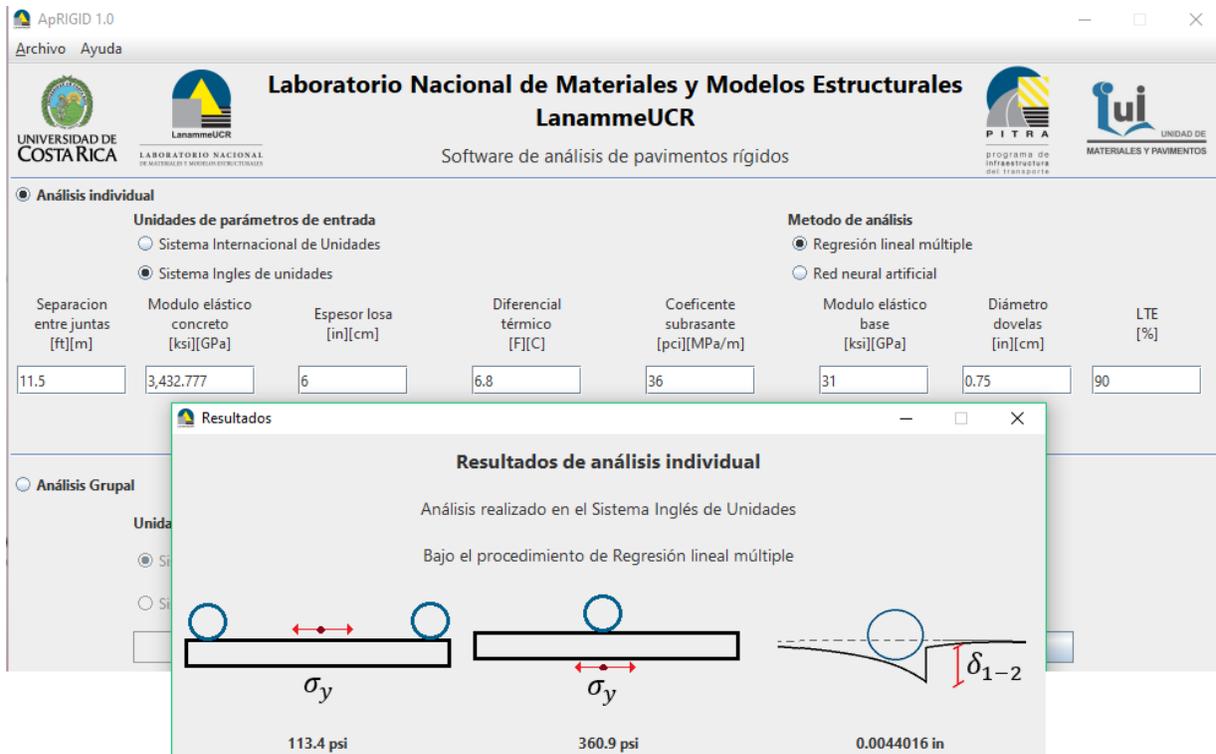


Figura 46. Respuestas mecánicas de la estructura de pavimento.
Fuente: AP-Rigid, LanammeUCR.

Cuadro 41. Modelo de Fatiga

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo máximo aplicado a la losa	360.900	psi
Módulo de ruptura del concreto	640.000	psi
Número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla	7190949.575	-

Para el modelo de bombeo y erosión se obtiene un índice menor a uno que muestra la ausencia del deterioro y por ende, el cumplimiento con el modelo.

Cuadro 42. Modelo de bombeo y erosión

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.137	millones
Tipo se suelo	1.000	-
Precipitación anual	177.410	cm
Espesor de losa	6.000	in
índice de congelación	0.000	-
Índice de bombeo	0.674	-

Aunque la revisión por escalonamiento ya cumple con lo establecido, se logra reducir su valor.

Cuadro 43. Escalonamiento

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.137	millones
Esfuerzo máximo	360.900	psi
Espaciamiento entre juntas transversales	11.500	ft
Módulo de reacción de la sub-rasante	36.000	pci
Escalonamiento	0.003	in

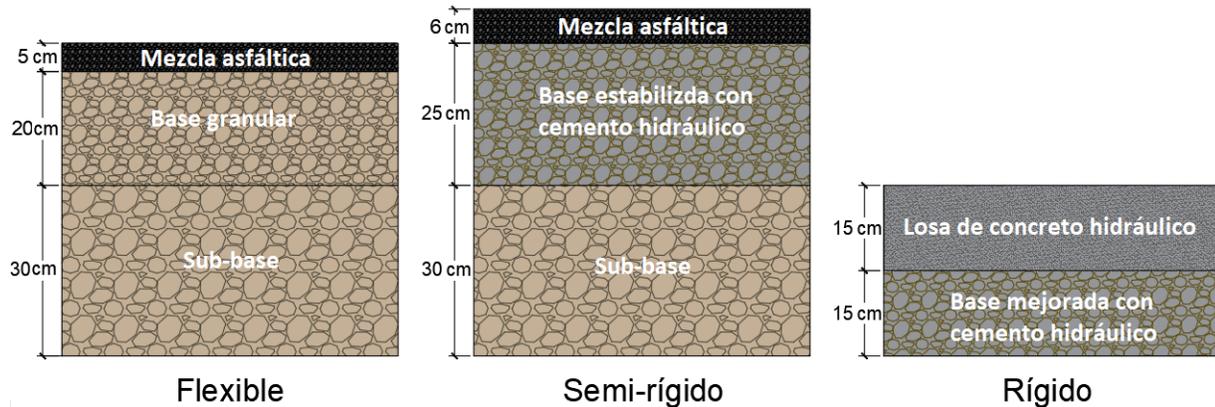


Figura 47. Paquete estructural para cada tipo de pavimento.
Fuente: AutoCAD, 2017.

Santa Bárbara

En el cuadro siguiente se presenta el cálculo de ejes equivalentes.

Cuadro 44. Cálculo de ejes equivalentes de diseño para pavimento flexible y semi-rígido

Vehículo	TPD	Factor camión	EQQ diarios	EQQ anuales	Factor de crecimiento	Factor direccional	Factor carril	EQQ carril de diseño
Liviano	318	0.001	0.318	116.070	12.006	50 %	100 %	696.774
CL	99	0.020	1.980	722.700	12.006	50 %	100 %	4338.407
C2	18	0.630	11.340	4139.100	12.006	50 %	100 %	24847.239
C3	4	1.710	6.840	2496.600	12.006	50 %	100 %	14987.224
Total								44869.644

Para este caso, no se aplica el factor de expansión pues la municipalidad proporciona los datos del TPD y menciona que dicho factor ya está incluido.

De la misma manera que para las rutas anteriores, se utiliza el criterio de la AASHTO que indica que al dividir los EQQ de diseño del pavimento flexible entre 0.67 se obtiene una equivalencia de EQQ de diseño para el pavimento rígido. Por lo tanto, se tiene 66 969.618 ejes equivalentes de diseño para el pavimento rígido.

Pavimento Flexible

La metodología AASHTO 93 da como resultado espesores mínimos para la base y la sub-base, no obstante, para la carpeta asfáltica se obtiene 6 cm.

Cuadro 45. Estructura de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93

Material	SN (in)	Esp. teórico (in)	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	1.013	2.292	5.821	6.000
Base granular	1.352	2.362	5.999	10.000
Sub-base	2.187	5.780	14.681	15.000

Al emplear CR-ME se obtiene un valor para el ahuellamiento muy cercano al límite por lo que se realizan varias iteraciones para buscar un paquete estructural que disminuya su valor.

Cuadro 46. Cumplimiento de criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Área agrietada	1.1	75	%	Cumple
Agrietamiento longitudinal	302.2	2000	pies/milla	Cumple
Ahuellamiento total	24.65	25	mm	Cumple

Se encuentra que con 5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 15 cm de sub-base se disminuye el ahuellamiento y se cumple con los criterios de aceptación.

Cuadro 47. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Área agrietada	0.3	75	%	Cumple
Agrietamiento longitudinal	219.6	2000	pies/milla	Cumple
Ahuellamiento total	23.8	25	mm	Cumple

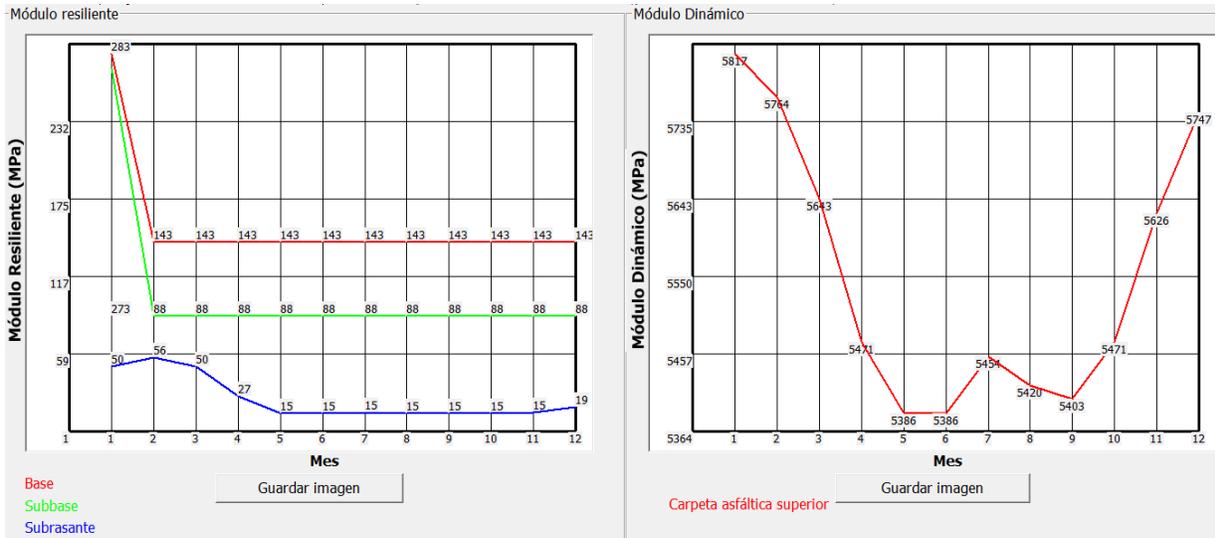


Figura 48. Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.
Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

El daño por fatiga de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo, el porcentaje de área agrietada y el agrietamiento longitudinal son mínimos, pues dependen de las repeticiones de carga en el periodo de diseño que son menos de 45 000.

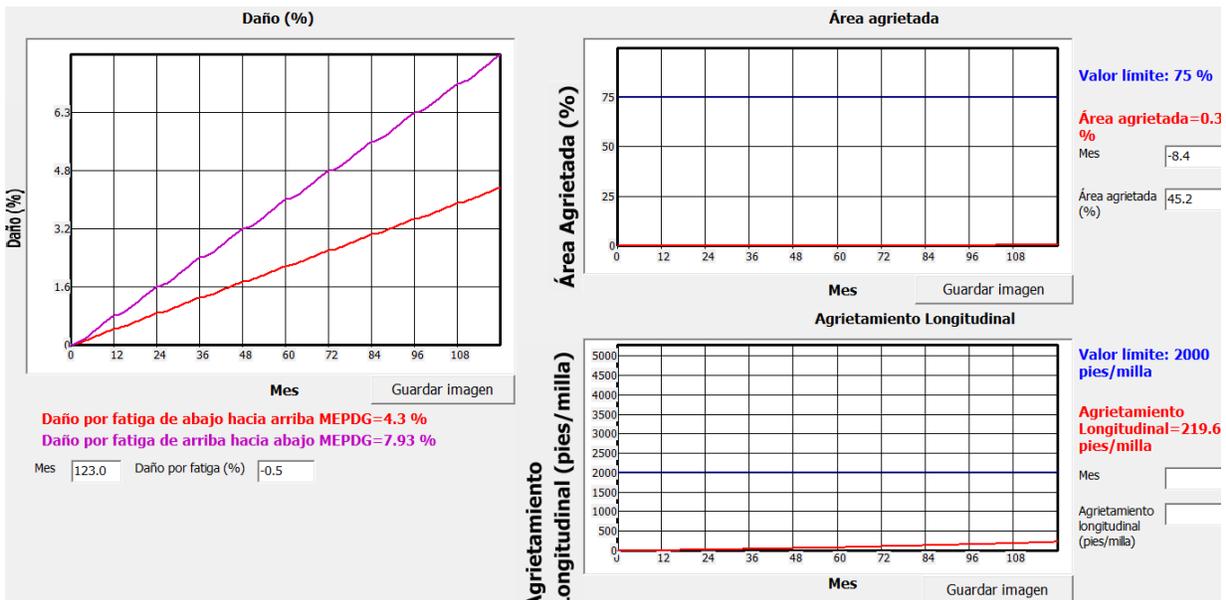


Figura 49. Porcentaje de daño, de área agrietada y agrietamiento longitudinal para la carpeta asfáltica.

Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

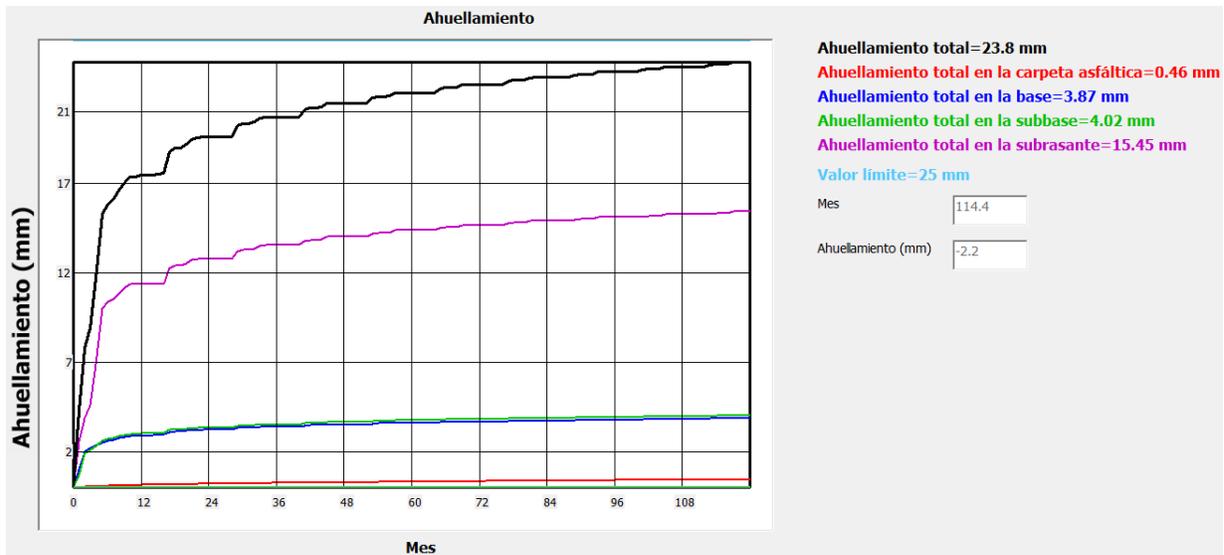


Figura 50. Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.

Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

Pavimento Semi-rígido

Los espesores encontrados por medio de la metodología AASHTO 93 corresponden a los mínimos para cada capa, ya que según los resultados obtenidos se requiere de espesores menores.

Cuadro 48. Estructura de pavimento semi-rígido por medio de la metodología AASHTO 93

Material	SN (in)	Esp. teórico (in)	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	0.000	0.000	0.000	5.000
Base estabilizada	1.351	3.043	7.730	15.000
Sub-base	2.182	3.478	8.833	15.000

Por medio del software CR-ME se determina que las dimensiones cumplen con el ahuellamiento total aceptado como límite.

Cuadro 49. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores determinados por AASHTO 93

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Ahuellamiento total	17.43	25	mm	Cumple

Como la fatiga debe ser revisada externamente, se emplea el modelo de PCA y se obtiene un alto valor para el esfuerzo máximo a tensión en la última fibra de la base estabilizada.

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Resultados del modelo en los puntos especificados:						
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.6429e+02	1.5014e+02	1.0003e+02	-2.6001e-15	2.3729e-31	1.2918e-15
2	9.7363e+01	7.0075e+01	-3.5901e+00	-3.3418e-15	2.9944e-31	0.0000e+00
3	-1.1612e+02	-9.5621e+01	4.3601e+00	3.7660e-15	-2.0963e-16	-1.1412e+00
4	-1.1156e+02	-7.4452e+01	3.8125e+00	4.5442e-15	-2.4119e-16	0.0000e+00

Figura 51. Resultados del modelo.
Fuente: PITRA PAVE, LanammeUCR.

Cuadro 50. Cumplimiento del modelo de fatiga de la PCA

Parámetro	Valor
Máximo esfuerzo a tensión (psi)	116.000
Módulo de ruptura a los 28 días (psi)	107.040
Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga	2.668
Número de repeticiones de carga en el periodo de diseño	44870
Condición	No Cumple

A partir de los espesores base se realizan iteraciones hasta encontrar el paquete estructural que cumpla con los diferentes parámetros y se obtiene 6 cm de carpeta asfáltica, 22 cm de base estabilizada con cemento y 15 cm de sub-base.

Cuadro 51. Cumplimiento de los criterios de aceptación para espesores elegidos

Parámetro	Valor Obtenido	Valor límite	Unidad	Condición
Ahuellamiento total	13.03	25	mm	Cumple

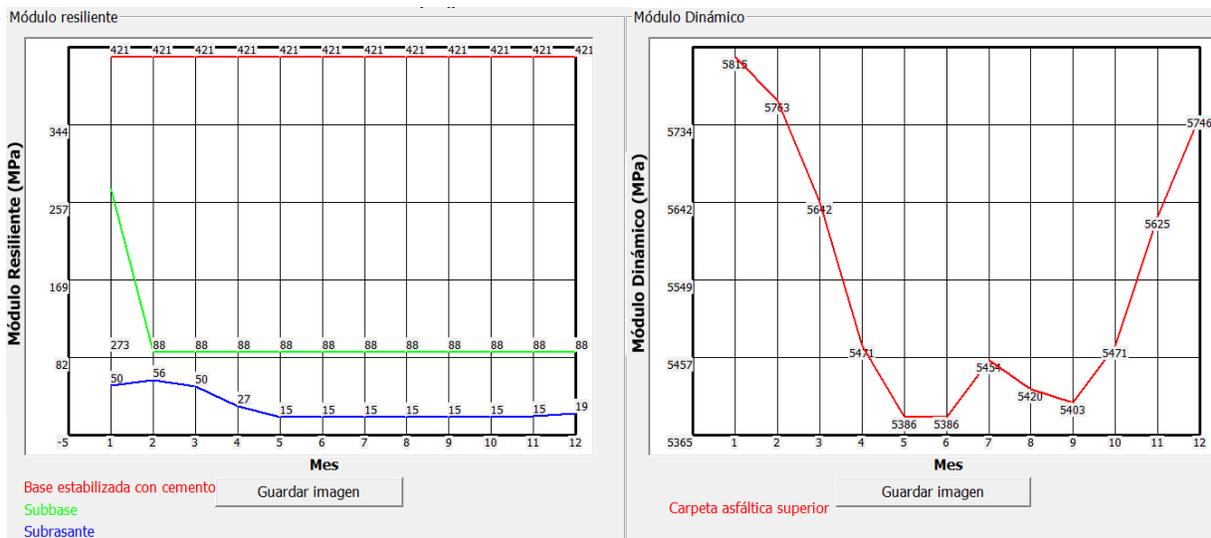


Figura 52. Variación del módulo resiliente y del módulo dinámico respecto a los meses del año.
Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

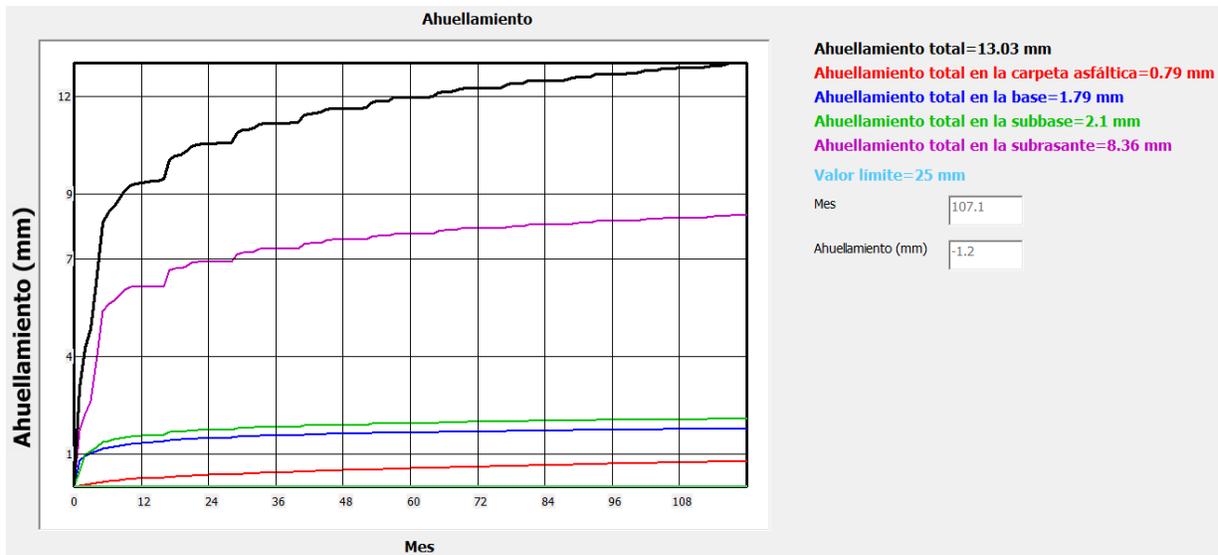


Figura 53. Ahuellamiento total de la estructura de pavimento.
Fuente: CR-ME, LanammeUCR.

Se emplea PITRA PAVE para encontrar el máximo esfuerzo a tensión y con ello, verificar el cumplimiento del modelo.

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.2797e+02	1.2039e+02	1.0003e+02	-1.3922e-15	2.3357e-30	1.2715e-14
2	5.8430e+01	4.0132e+01	-3.5901e+00	-2.2408e-15	1.8098e-30	0.0000e+00
3	-7.2508e+01	-6.0466e+01	2.3309e+00	2.2120e-15	-9.5969e-17	-5.2243e-01
4	-7.2316e+01	-5.4768e+01	2.2147e+00	2.1491e-15	-8.2017e-17	0.0000e+00

Figura 54. Resultados del modelo.
Fuente: PITRA PAVE, LanammeUCR.

Cuadro 52. Cumplimiento del modelo de PCA

Parámetro	Valor
Máximo esfuerzo a tensión (psi)	72.000
Módulo de ruptura a los 28 días (psi)	107.040
Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga	47424.676
Número de repeticiones de carga en el periodo de diseño	44870
Condición	Cumple

Pavimento Rígido

La metodología AASHTO 93 determina el siguiente diseño completo de pavimento rígido:

Cuadro 53. Diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO 93

Descripción	Valor	Unidad
Espesor de losa	4.11	in
Espesor de base mejorada con cemento	6	in
Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante	265	pci
Módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido	265	pci
Daño relativo	16.25	-
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante corregido por potencial pérdida de soporte	46	pci

Cuadro 54. Diseño de acero de refuerzo

Descripción	N° de Varilla	Separación (cm)
Dovelas	6	30
Barras de amarre longitudinal	4	60

De la misma forma que para Santo Domingo y San Pablo, las dimensiones encontradas con la metodología empírica no cumplen con el modelo de fatiga ni con el modelo de bombeo y erosión solo cumplen con el de escalonamiento.

Cuadro 55. Modelo de Fatiga

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo máximo aplicado a la losa	464.200	psi
Módulo de ruptura del concreto	640.000	psi
Número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla	14708.121	-

Cuadro 56. Modelo de bombeo y erosión

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.067	millones
Tipo se suelo	1.000	-
Precipitación anual	177.410	cm
Espesor de losa	4.110	in
índice de congelación	0.000	-
Índice de bombeo	1.142	-

Cuadro 57. Escalonamiento

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.067	millones
Esfuerzo máximo	464.200	psi
Espaciamiento entre juntas transversales	7.200	ft
Módulo de reacción de la sub-rasante	46.000	pci
Escalonamiento	0.001	in

Si se considera una losa de 15 cm con dovelas #6 espaciadas 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm se cumple con los modelos de deterioro analizados.

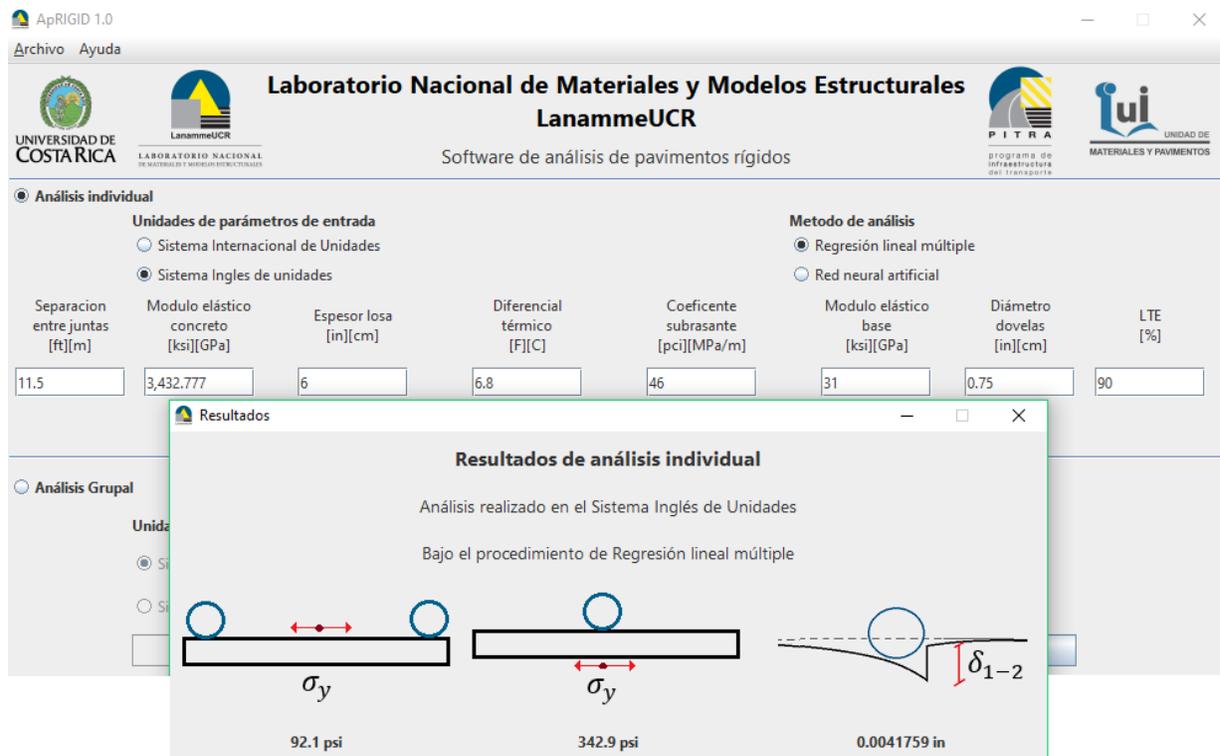


Figura 55. Respuestas mecánicas de la estructura de pavimento.
Fuente: AP-Rigid, LanammeUCR.

Cuadro 58. Modelo de Fatiga

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo máximo aplicado a la losa	342.900	psi
Módulo de ruptura del concreto	640.000	psi
Número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla	25315319.226	-

Como se observa, el modelo de fatiga cumple ampliamente con el número de repeticiones de carga del periodo de diseño debido a que se obtiene un valor de 25 315 319 de repeticiones de carga permitidas antes de la falla de la estructura. De igual forma, para el modelo de bombeo y erosión se establece la ausencia del deterioro por medio del índice obtenido.

Cuadro 59. Modelo de bombeo y erosión

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.067	millones
Tipo se suelo	1.000	-
Precipitación anual	177.410	cm
Espesor de losa	6.000	in
índice de congelación	0.000	-
Índice de bombeo	0.492	-

Fuente: Elaboración propia.

En este caso la estructura de pavimento analizada presenta un escalonamiento de cero, es decir, una ausencia total del deterioro según el modelo empleado.

Cuadro 60. Escalonamiento

Parámetro	Valor	Unidad
EEQ	0.067	millones
Esfuerzo máximo	342.900	psi
Espaciamiento entre juntas transversales	11.500	ft
Módulo de reacción de la sub-rasante	46.000	pci
Escalonamiento	0.000	in

A continuación se presenta el paquete estructural obtenido para cada tipo de pavimento.

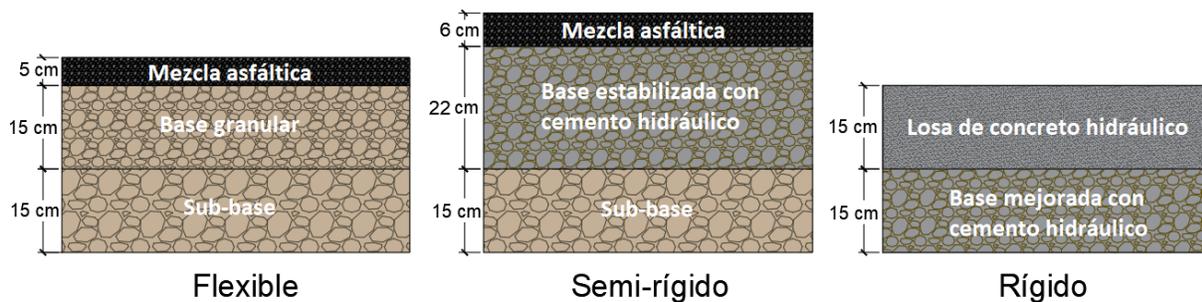


Figura 56. Paquete estructural para cada tipo de pavimento.

Fuente: AutoCAD, 2017.

Presupuesto del Proyecto

Empleando la estructura de costos de referencia con sus respectivos precios unitarios se logra determinar el porcentaje de reajuste de precios para cada rubro en cada renglón de pago.

Cuadro 61. Excavación

Rubro	Porcentaje (%)	índice de la fecha de oferta	índice de la fecha de estimación	Reajuste de precio (%)
Costos fijos	20.000	106.772	119.513	2.387
Repuestos	12.400	105.707	124.459	2.200
Combustible	15.100	96.140	96.387	0.039
Lubricantes	2.400	115.038	122.074	0.147
Llantas	2.400	103.017	70.373	-0.761
Mano de obra directa	27.700	4807.964	5089.292	1.621
Mano de obra indirecta	4.000	4807.964	5089.292	0.234
Administración	4.000	-	-	0.235
Imprevistos	4.000	-	-	0.235
Utilidad	8.000	-	-	0.469
Total				6.805

Cuadro 62. Capa de concreto asfáltico preparado en planta colocada y compactada

Rubro	Porcentaje (%)	índice de la fecha de oferta	índice de la fecha de estimación	Reajuste de precio (%)
Costos fijos	5.000	106.77184	119.512679	0.597
Repuestos	1.000	105.707	124.4594259	0.177
Combustible	14.700	96.140	96.3869481	0.038
Lubricantes	1.900	115.038	122.0735715	0.116
Llantas	0.900	103.017	70.3731537	-0.285
Mano de obra directa	6.7	4807.9641	5089.292439	0.392
Materiales	50.000	101.48788	104.2645305	1.368
Mano de obra indirecta	4	4807.9641	5089.292439	0.234
Administración	4.000	-	-	0.105
Imprevistos	4.000	-	-	0.105
Utilidad	8.000	-	-	0.211
Total				3.059

Cuadro 63. Base de agregados, graduación D

Rubro	Porcentaje (%)	índice de la fecha de oferta	índice de la fecha de estimación	Reajuste de precio (%)
Costos fijos	6.500	106.77184	119.512679	0.776
Repuestos	3.800	105.707	124.4594259	0.674
Combustible	9.700	96.139642	96.3869481	0.025
Lubricantes	1.500	115.03776	122.0735715	0.092
Llantas	1.500	103.01741	70.3731537	-0.475
Mano de obra directa	5.700	4807.9641	5089.292439	0.334
Materiales	51.200	103.6194	104.7126804	0.540
Mano de obra indirecta	4.000	4807.9641	5089.292439	0.234
Administración	4.000	-	-	0.088
Imprevistos	4.000	-	-	0.088
Utilidad	8.000	-	-	0.176
Total				2.551

Cuadro 64. Sub-base de agregados, graduación B

Rubro	Porcentaje (%)	índice de la fecha de oferta	índice de la fecha de estimación	Reajuste de precio (%)
Costos fijos	6.500	106.77184	119.512679	0.776
Repuestos	3.800	105.707	124.4594259	0.674
Combustible	9.700	96.139642	96.3869481	0.025
Lubricantes	1.500	115.03776	122.0735715	0.092
Llantas	1.500	103.01741	70.3731537	-0.475
Mano de obra directa	5.700	4807.9641	5089.292439	0.334
Materiales	51.200	103.6194	104.7126804	0.540
Mano de obra indirecta	4.000	4807.9641	5089.292439	0.234
Administración	4.000	-	-	0.088
Imprevistos	4.000	-	-	0.088
Utilidad	8.000	-	-	0.176
Total				2.551

Cuadro 65. Riego de imprimación

Rubro	Porcentaje (%)	índice de la fecha de oferta	índice de la fecha de estimación	Reajuste de precio (%)
Costos fijos	1.5	100.07092	119.512679	0.291
Repuestos	1	94.891	124.4594259	0.312
Combustible	5.68	109.721	96.3869481	-0.690
Lubricantes	0.3	104.040	122.0735715	0.052
Llantas	0.5	94.132	70.3731537	-0.126
Mano de obra directa	2.21	4384.1115	5089.292439	0.355
Materiales	74.29	102.03953	104.2645305	1.620
Administración	5.12	-	-	0.093
Imprevistos	2.56	-	-	0.046
Utilidad	6.83	-	-	0.124
Total				2.077

Una vez que se tiene el porcentaje de reajuste de precios para un determinado renglón de pago se le aplica al precio unitario inicial para obtener un nuevo precio unitario actualizado. Se actualizan todos los precios unitarios con la excepción de los renglones de pago de losa de concreto hidráulico, base estabilizada BE-25 y base mejorada con cemento Portland los cuales son proporcionados directamente por el Departamento de Costos como precios actualizados. El sumario de cantidades, costos unitarios y costos totales para cada tipo de pavimento, se muestran a continuación:

Santo Domingo

Considerando la longitud del tramo, el ancho de calle y los paquetes estructurales seleccionados para cada tipo de pavimento, se calcula el costo total por renglón de pago y por pavimento.

Cuadro 66. Costo inicial del pavimento flexible

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢10341226.439	¢10341226.439
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢9513928.324	¢9513928.324
CR.209.01	Excavación	4778	m ³	¢7925.991	¢37866423.981
CR.402.01	Capa de concreto asfáltico	643	m ³	¢144282.366	¢92791596.388
CR.301.03	Base de agregado triturado	1378	m ³	¢17946.377	¢24732351.288
CR 301.03	Subbase de agregados	2756	m ³	¢17946.377	¢49464702.576
CR.413.01	Riego de imprimación	5513	L	¢357.271	¢1969454.554
Total					¢226679683.550

Cuadro 67. Costo inicial del pavimento semi-rígido

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢12624222.445	¢12624222.445
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢11614284.65	¢11614284.65
CR.209.01	Excavación	4318	m ³	¢7925.991	¢34225421.675
CR.402.01	Capa de concreto asfáltico	643	m ³	¢144282.366	¢92791596.388
CR.302.03	Base estabilizada BE-25	2297	m ³	¢43000.000	¢98765625.000
CR 301.03	Subbase de agregados	1378	m ³	¢17946.377	¢24732351.288
CR.413.01	Riego de imprimación	5513	L	¢357.271	¢1969454.554
Total					¢276722956.000

Cuadro 68. Costo inicial del pavimento rígido

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢16281692.623	¢16281692.623
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢14979157.213	¢14979157.213
CR.209.01	Excavación	2625	m ³	¢7925.991	¢20805727.462
CR.302.01	Base mejorada con cemento	1313	m ³	¢32250.000	¢42328125.000
CR.501.01	Losa de concreto hidráulico	8750	m ²	¢30000.000	¢262500000.000
Total					¢356894702.298

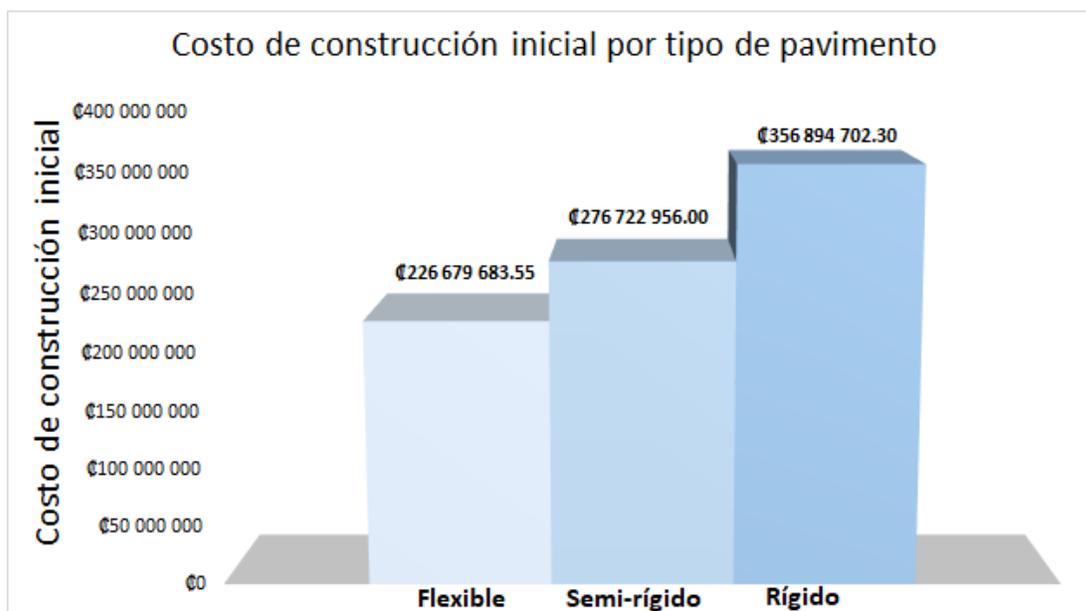


Figura 57. Variación de la inversión inicial según el tipo de pavimento.
Fuente: Excel, 2016.

San Pablo

Como se menciona anteriormente, no se considera material para la sub-base pues se decide reutilizar el material que se tiene en sitio.

El bajo costo obtenido para el pavimento flexible obedece a que en su diseño se obtiene una sub-base de 30 cm que no se considera en el desglose de costos.

Cuadro 69. Costo inicial del pavimento flexible

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢2371890.188	¢2371890.188
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢3741117.706	¢3741117.706
CR.209.01	Excavación	913	m ³	¢7925.991	¢7235399.782
CR.402.01	Capa de concreto asfáltico	456	m ³	¢144282.366	¢65855521.551
CR.301.03	Base de agregado triturado	1826	m ³	¢17946.377	¢32765418.986
CR.413.01	Riego de imprimación	5477	L	¢357.271	¢1956850.045
Total					¢113926198.258

Tampoco se considera la sub-base granular para el pavimento semi-rígido lo que constituye un ahorro, ya que es un material que debía ser adquirido.

Sin embargo, al ser un tipo de pavimento que incluye una carpeta asfáltica y una base estabilizada con cemento de espesores considerables, ocasiona que el costo sea mucho mayor al del pavimento flexible.

Cuadro 70. Costo inicial del pavimento semi-rígido

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢4099752.815	¢4099752.815
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢6466428.304	¢6466428.304
CR.209.01	Excavación	913	m ³	¢7925.991	¢7235399.782
CR.402.01	Capa de concreto asfáltico	548	m ³	¢144282.366	¢79026625.861
CR.302.03	Base estabilizada BE-25	2282	m ³	¢43000.000	¢98133525.000
CR.413.01	Riego de imprimación	5477	L	¢357.271	¢1956850.045
Total					¢196918581.807

El pavimento rígido no contempla la colocación de una sub-base granular por lo que tampoco se obtuvo un ahorro en los costos, puesto que se deben incluir todos los materiales. Además, considera una base mejorada con cemento de 15 cm de espesor.

Cuadro 71. Costo inicial del pavimento rígido

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢6814897.803	¢6814897.803
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢10748952.443	¢10748952.443
CR.209.01	Excavación	869	m ³	¢7925.991	¢6890856.935
CR.302.01	Base mejorada con cemento	1304	m ³	¢32250.000	¢42057225.000
CR.501.01	Losa de concreto hidráulico	8694	m ²	¢30000.000	¢260820000.000
Total					¢327331932.181

A continuación se presenta un gráfico que muestra los resultados obtenidos respecto al costo de construcción inicial, para cada tipo de pavimento analizado.

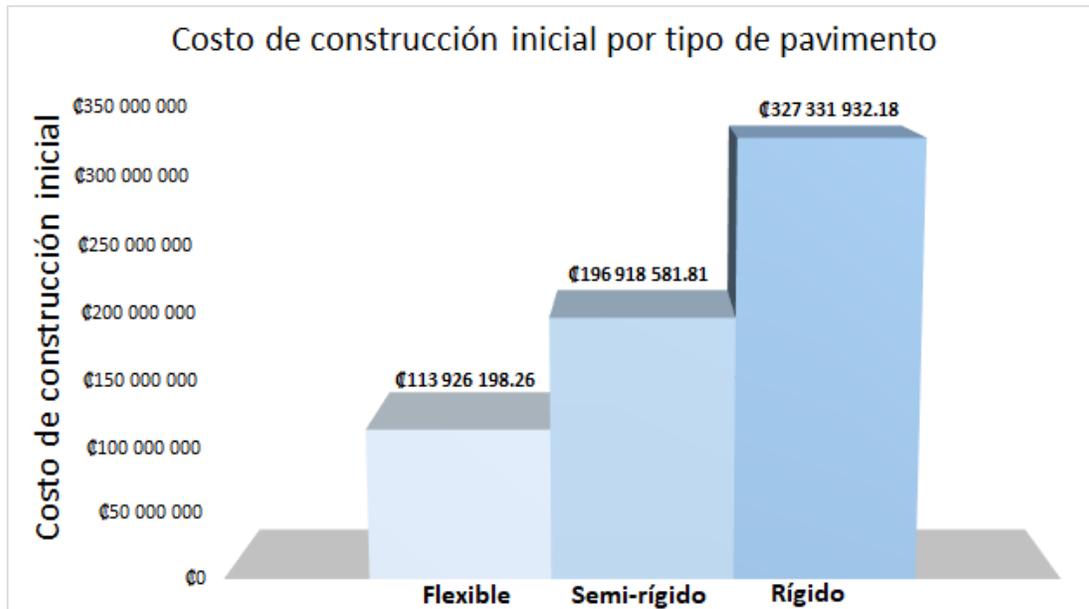


Figura 58. Variación de la inversión inicial según el tipo de pavimento.
Fuente: Excel, 2016.

Santa Bárbara

El diseño del pavimento flexible contempla los espesores mínimos para las capas por lo que el costo obtenido es el menor de los tres tipos de pavimentos.

Cuadro 72. Costo inicial del pavimento flexible

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢4790928.808	¢4790928.808
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢5777296.503	¢5777296.503
CR.209.01	Excavación	3164	m ³	¢7925.991	¢25079223.883
CR.402.01	Capa de concreto asfáltico	452	m ³	¢144282.366	¢65219236.319
CR.301.03	Base de agregado triturado	1356	m ³	¢17946.377	¢24336633.667
CR 301.03	Subbase de agregados	1356	mm ³	¢17946.377	¢24336633.667
CR.413.01	Riego de imprimación	5424	L	¢357.271	¢1937943.281
Total					¢151477896.128

Cuadro 73. Costo inicial del pavimento semi-rígido

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢7509661.887	¢7509661.887
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢9055768.746	¢9055768.746
CR.209.01	Excavación	3887	m ³	¢7925.991	¢30811617.913
CR.402.01	Capa de concreto asfáltico	542	m ³	¢144282.366	¢78263083.582
CR.302.03	Base estabilizada BE-25	1989	m ³	¢43000.000	¢85523130.000
CR 301.03	Subbase de agregados	1356	m ³	¢17946.377	¢24336633.667
CR.413.01	Riego de imprimación	5424	L	¢357.271	¢1937943.281
Total					237437839.077

Cuadro 74. Costo inicial del pavimento rígido

Renglón de pago	Descripción del renglón	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
CR 110.06	Trabajo a costo más porcentaje	1	Gbl	¢10894406.168	¢10894406.168
CR 77-103	Reajuste de precios	1	Gbl	¢13137372.144	¢13137372.144
CR.209.01	Excavación	2583	m ³	¢7925.991	¢20472835.823
CR.302.01	Base mejorada con cemento	1292	m ³	¢32250.000	¢41650875.000
CR.501.01	Losa de concreto hidráulico	8610	m ²	¢30000.000	¢258300000.000
Total					344455489.134

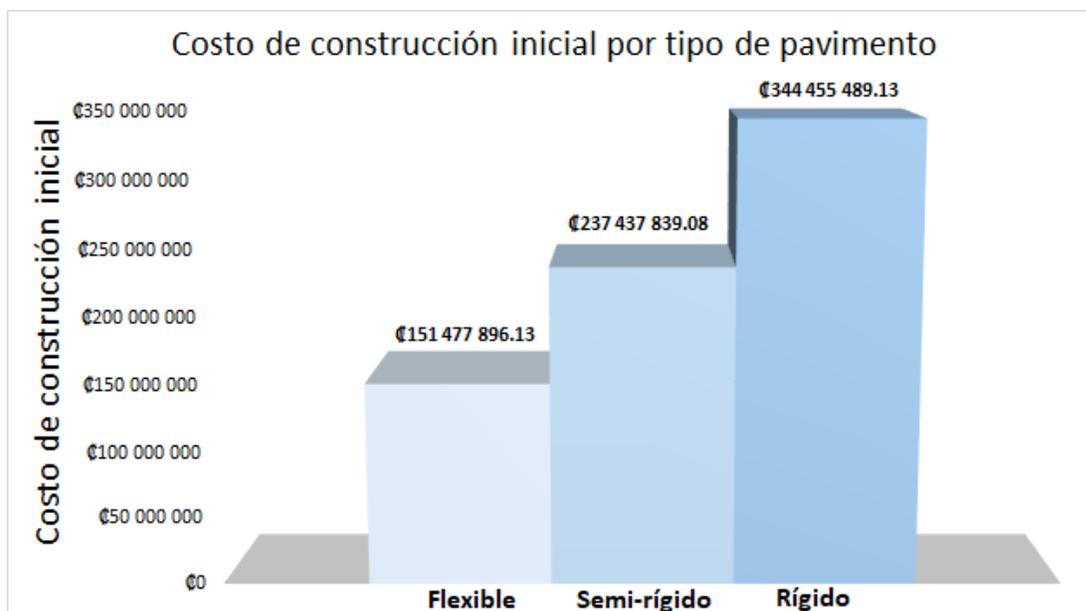


Figura 59. Variación de la inversión inicial según el tipo de pavimento.
Fuente: Excel, 2016.

Costo de mantenimiento

La determinación de las intervenciones que requiere una estructura de pavimento no es un proceso sencillo, puesto que requiere de experiencia.

De igual forma, la severidad del daño que sufre el pavimento depende de varios factores; por lo tanto, no se puede establecer de forma precisa el porcentaje de daño que se presentará. Lo que se realiza es una aproximación con base en información encontrada en la literatura.

Santo Domingo

Como se visualiza, el pavimento flexible es el que requiere el mayor costo de mantenimiento.

Cuadro 75. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento flexible

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
3	Ruteo y sellado de grietas	350	m	ϕ1977.000	ϕ691950.000
5	Bacheo con mezcla asfáltica	525	ton	ϕ61052.000	ϕ32052300.000
6	Ruteo y sellado de grietas	788	m	ϕ1977.000	ϕ1556887.500
9	Ruteo y sellado de grietas	1313	m	ϕ1977.000	ϕ2594812.500
Total					ϕ36895950.000

Para el pavimento semi-rígido se propone, de igual forma que el flexible, el mismo tipo de intervención y en los mismos años; no obstante, la severidad o cantidad del daño se considera menor.

Cuadro 76. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento semi-rígido

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
3	Ruteo y sellado de grietas	175	m	¢1977.000	¢345975.000
5	Bacheo con mezcla asfáltica	438	ton	¢61052.000	¢26710250.000
6	Ruteo y sellado de grietas	438	m	¢1977.000	¢864937.500
9	Ruteo y sellado de grietas	963	m	¢1977.000	¢1902862.500
Total					¢29824025.000

En el caso del pavimento rígido, las intervenciones requeridas son con una menor frecuencia y con menor severidad debido al tipo de estructura que presenta.

Cuadro 77. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento rígido

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
4	Sellado de juntas y grietas	88	m	¢3714.000	¢324975.000
8	Sustitución de losas	219	m ²	¢46994.000	¢10279937.500
8	Sellado de juntas y grietas	438	m	¢3714.000	¢1624875.000
Total					¢12229787.500

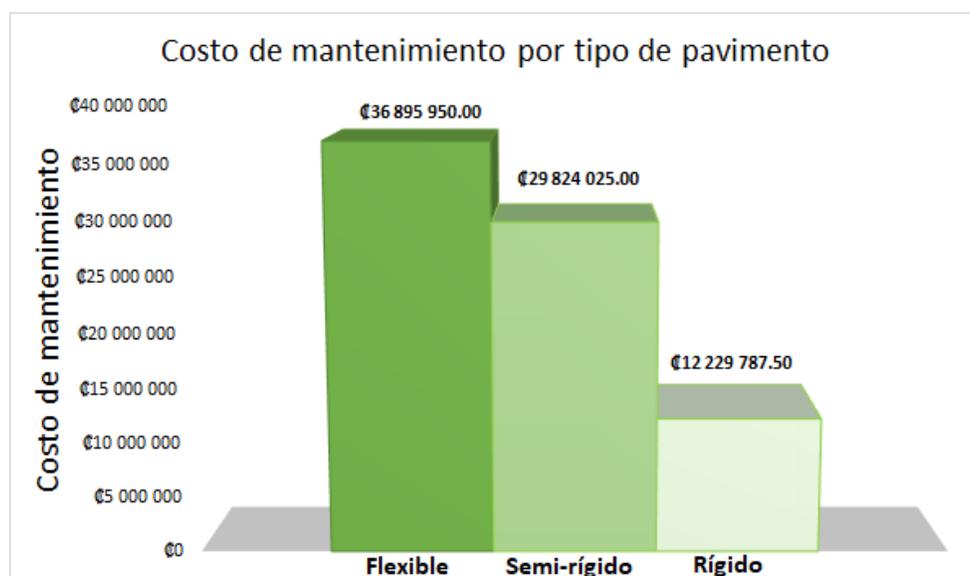


Figura 60. Variación del costo de mantenimiento según el tipo de pavimento.
Fuente: Excel, 2016.

San Pablo

Como se tienen condiciones similares con el cantón de Santo Domingo, respecto a repeticiones de carga en el periodo de diseño y propiedades de los materiales constituyentes; se establece los mismos porcentajes de daño para cada intervención.

Sin embargo, se considera el ancho de calle y longitud del tramo correspondiente para determinar el costo total.

Cuadro 78. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento flexible

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
3	Ruteo y sellado de grietas	348	m	¢1977.000	¢687521.520
5	Bacheo con mezcla asfáltica	522	ton	¢61052.000	¢31847165.280
6	Ruteo y sellado de grietas	782	m	¢1977.000	¢1546923.420
9	Ruteo y sellado de grietas	1304	m	¢1977.000	¢2578205.700
Total					¢36659815.920

Cuadro 79. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento semi-rígido

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
3	Ruteo y sellado de grietas	174	m	¢1977.000	¢343760.760
5	Bacheo con mezcla asfáltica	435	ton	¢61052.000	¢26539304.400
6	Ruteo y sellado de grietas	435	m	¢1977.000	¢859401.900
9	Ruteo y sellado de grietas	956	m	¢1977.000	¢1890684.180
Total					¢29633151.240

Cuadro 80. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento rígido

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
4	Sellado de juntas y grietas	87	m	¢3714.000	¢322895.160
8	Sustitución de losas	217	m ²	¢46994.000	¢10214145.900
8	Sellado de juntas y grietas	435	m	¢3714.000	¢1614475.800
Total					¢12151516.860



Figura 61. Variación del costo de mantenimiento según el tipo de pavimento.
Fuente: Excel, 2016.

Santa Bárbara

A pesar de que las propiedades de los materiales tienen cierta similitud con los cantones anteriores, los ejes equivalentes en el periodo de diseño son prácticamente la mitad; por lo que se decide disminuir la severidad del daño que se estima la estructura va a presentar. Igualmente, el pavimento flexible presenta el mayor costo de mantenimiento.

Cuadro 81. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento flexible

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
3	Ruteo y sellado de grietas	172	m	¢1977.000	¢340439.400
5	Bacheo con mezcla asfáltica	258	ton	¢61052.000	¢15769731.600
6	Ruteo y sellado de grietas	387	m	¢1977.000	¢765988.650
9	Ruteo y sellado de grietas	646	m	¢1977.000	¢1276647.750
Total					¢18152807.400

Cuadro 82. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento semi-rígido

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
3	Ruteo y sellado de grietas	86	m	¢1977.000	¢170219.700
5	Bacheo con mezcla asfáltica	215	ton	¢61052.000	¢13141443.000
6	Ruteo y sellado de grietas	215	m	¢1977.000	¢425549.250
9	Ruteo y sellado de grietas	474	m	¢1977.000	¢936208.350
Total					¢14673420.300

Nuevamente el pavimento rígido resulta ser el más económico con respecto al mantenimiento.

Cuadro 83. Estimación del costo de mantenimiento para pavimento rígido

Año	Intervención	Cant	Unid	Costo Unitario	Costo Total
4	Sellado de juntas y grietas	43	m	¢3714.000	¢159887.700
8	Sustitución de losas	108	m ²	¢46994.000	¢5057729.250
8	Sellado de juntas y grietas	215	m	¢3714.000	¢799438.500
Total					¢6017055.450



Figura 62. Variación del costo de mantenimiento según el tipo de pavimento.
Fuente: Excel, 2016.

Análisis de los resultados

Mejoramiento de las propiedades de la sub-rasante

Debido a que el suelo presenta propiedades pobres para servir como sub-rasante de carretera es que se analiza la posibilidad de estabilizarlo con algún tipo de aditivo.

Se determina que al tener una clase de OH o MH y un índice de plasticidad mayor de 12, el tipo de estabilizador requerido es cal para mejorar las características mecánicas, reducir la plasticidad y aumentar la trabajabilidad del material. (Badilla y Elizondo, 2010).

Al estabilizar un suelo con cal ocurren una serie de reacciones químicas que hacen el suelo friable y granular pues el índice de Plasticidad disminuye. Aunque la estabilización consiste en una mejora a largo plazo por cementación que puede durar meses o incluso años, aumenta poco a poco la capacidad de soporte y la resistencia mecánica del suelo. Dicho proceso depende de la temperatura ambiente, de la cantidad y naturaleza de la fracción arcillosa y de la presencia de suficiente agua libre en el suelo.

Asimismo, los suelos deben cumplir ciertas características que aseguren la estabilización: no deben contener materia orgánica, sulfatos, cloruros u otros compuestos químicos en cantidades perjudiciales. Además, deben poseer cierta granulometría y tener un índice de plasticidad mayor a 12. (Ávila, 2010).

Es importante mencionar que no todos los suelos producen reacciones puzolánicas, a pesar de que se definan como arcillosos; debido a esto es fundamental realizar un estudio geotécnico para verificar que se produzcan mejoras con la adición de cal. (Ávila, 2010).

Como para el presente proyecto no se cuenta con información suficiente pues se requiere realizar una serie de ensayos y conocer a profundidad las características del suelo, solo se menciona como una alternativa que se analiza y que se descarta por la ausencia de pruebas de laboratorio para determinar de forma precisa la aptitud del suelo para ser estabilizado.

No obstante, es recomendable para proyectos que posean suelos arcillosos, con elevado contenido de finos de plasticidad media o alta, evaluar si algún tipo de estabilización puede mejorar las características existentes.

Diseño de la estructura de pavimento

El diseño de la estructura de pavimento se basa en la metodología AASHTO 93 para determinar los espesores semilla, los cuales se revisan por medio de la metodología mecánica-empírica empleando diferentes modelos de deterioro; si alguno de los deterioros obtenidos para la estructura no cumplen con la especificación se debe modificar los espesores e iterar hasta determinar un diseño conveniente. Precisamente el fin buscado con el diseño mecanicista empírico es determinar espesores con base en respuestas ingenieriles.

Los datos de entrada son tan importantes como el proceso de diseño en sí, por ejemplo, una mala estimación del tránsito produce una falla prematura del pavimento; por eso es fundamental utilizar valores lo más precisos posibles que consideren las características específicas del proyecto en cuestión.

A pesar de que se cuenta con ensayos de laboratorio de cada 200 m en los diferentes tramos que determinan las características de los materiales presentes en el sitio, no es posible establecer un único valor para cada parámetro pues cada informe contempla resultados diferentes que demuestran la heterogeneidad del suelo. Lo que se realiza es utilizar los valores que se consideran más representativos o repetitivos a lo largo de un tramo; si bien ese ejercicio no es muy conveniente puesto que depende del criterio del diseñador es una buena aproximación para determinar las características que prevalecen en el sitio.

Otro aspecto importante que se debe mencionar es que para el diseño se consideran los valores mínimos establecidos en el CR-2010 para los materiales utilizados; por ejemplo, el diseño se realiza con una base y sub-base granular que cuentan con los CBR mínimos. Sin embargo, si se conoce con certeza las características de los materiales que se utilizarán se debe especificar el valor de CBR que poseen.

Santo Domingo

Pavimento Flexible

El paquete estructural que se obtiene por medio de la metodología AASHTO 93 es de 7 cm para la carpeta asfáltica, 10 cm para la base granular y 43 cm para la sub-base; estableciendo 10 cm como el mínimo para la base, ya que se requiere un espesor menor y se considera lo estipulado en el documento formulado por el Ing. Fabricio Leiva.

Con la utilización de CR-ME se determina que esos espesores cumplen con todos los parámetros, sin embargo, se busca optimizar el diseño.

Luego de varias iteraciones se elige 7 cm para la carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 30 cm para la sub-base; pese a que el ahuellamiento, el porcentaje de área agrietada y el agrietamiento longitudinal aumentan levemente, sus valores siguen estando por debajo del límite. Además, se logra reducir el paquete estructural de 60 cm a 52 cm sin afectar el cumplimiento de los parámetros.

La nueva estructura contempla un aumento en el espesor de la base granular puesto que, a pesar de que ese estableció 10 cm como el mínimo para ésta capa, según recomendaciones de profesionales que han visto su comportamiento en campo es más apropiado establecer un mínimo de 15 cm pues consideran que por el tamaño del agregado, y, también, por la compactación al ser un espesor muy pequeño se puede deteriorar el material.

Con respecto a los antecedentes y el documento realizado por la municipalidad, cuya estructura propuesta es de 7.5 cm para la carpeta asfáltica, 15 cm para la base y 25 cm para la sub-base, se logra una buena similitud entre la propuesta actual y la original.

Sin embargo, la propuesta actual contempla dos leves diferencias que son la disminución de la carpeta asfáltica que constituye un ahorro económico y el aumento en la dimensión de la sub-base que garantiza que la estructura no alcanzará un nivel de deterioro mayor al permitido. Es importante mencionar que al disminuir el espesor de la sub-base, el ahuellamiento en la sub-rasante aumenta; por lo que se debe cuidar este aspecto y, por ende, no se puede disminuir más su espesor.

Al poseer una sub-rasante con un CBR de 1 % que la clasifica como un suelo muy malo ocasiona que el ahuellamiento sea el tipo de deterioro que rige el diseño pues se tienen valores muy altos. Para este caso la falla por fatiga no es un factor determinante en el diseño puesto que la cantidad de repeticiones de carga es pequeña por tratarse de una ruta con bajo tránsito vehicular.

Pavimento Semi-rígido

Mediante la metodología AASHTO 93 se determina una carpeta asfáltica de 5 cm, establecida como mínimo, ya que como se observa en la sección de resultados el número estructural requerido es prácticamente cero lo que significa que al tener una base estabilizada con cemento de mayor rigidez y una cantidad tan pequeña de ejes equivalentes, la contribución estructural requerida de la carpeta asfáltica es mínima. La dimensión de la base estabilizada con cemento es de 15 cm y de la sub-base 41 cm.

Al revisar el diseño por medio de CR-ME se obtiene que la estructura cumple con el umbral establecido para el ahuellamiento, no obstante, al emplear el modelo de la PCA se obtiene un número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga muy pequeño originado por el alto valor del esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada.

El esfuerzo a tensión se determina empleando el software de multicapa elástica PITRA PAVE y su valor depende principalmente de los módulos resilientes de los materiales y de su espesor; al tener una sub-rasante con un módulo resiliente tan bajo y contar con espesores mínimos para la carpeta y la base, va a provocar un esfuerzo a tensión elevado. Por ésta razón es necesario incrementar el espesor de la carpeta asfáltica y de la base estabilizada con cemento, para obtener un esfuerzo a tensión bajo y con ello, un número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga mayor a las establecidas para el periodo de diseño.

De lo anterior se aprecia que al calcular las respuestas del pavimento (esfuerzos, deflexiones y deformaciones) y observar que el esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada con cemento es alto, se debe incrementar los espesores para disminuir el esfuerzo y asegurar que la estructura no fallará por fatiga; todo esto es ocasionado por la baja capacidad del suelo que provoca respuestas del pavimento críticas, aunque tenga una pequeña cantidad de ejes equivalentes de carga.

Precisamente esa es una de las ventajas de utilizar la metodología mecanística-empírica que al calcular las respuestas del pavimento y estimar su desempeño se puede predecir este tipo de situaciones y variar sus espesores. Como con la metodología AASHTO 93 no se analizan las respuestas ni el desempeño de la estructura, se obtiene un paquete estructural que no es el adecuado.

Se establece como nuevo paquete estructural: 7 cm para la carpeta asfáltica, 25 cm para la base estabilizada con cemento y 15 cm para la sub-base; pues se disminuye el ahuellamiento presente y se obtiene un número de repeticiones de carga mayor para el agrietamiento por fatiga con lo que se asegura que el pavimento se va encontrar en buenas condiciones durante su vida útil.

Pavimento Rígido

El diseño por medio de la metodología AASHTO 93 da como resultado una losa de 12.5, cm con dovelas #5 espaciadas a 30 cm y con barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm. Al revisar el diseño por medio de modelos de desempeño se obtiene que el de fatiga no cumple porque se tiene un esfuerzo máximo aplicado a la losa muy alto, generado por el espesor de losa y por el módulo de reacción efectivo de la sub-rasante que poseen valores bajos. El modelo de bombeo y erosión tampoco cumple.

Por lo que se aumenta el espesor de losa a 15 cm con dovelas #6 con una longitud y separación de 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 con longitud de 30 cm, espaciadas a cada 60 cm. Además, se establece una separación entre las juntas de 3.5 m que coincide con el ancho de carril existente y un ancho de junta de 0.5 cm.

Se debe mencionar que las dovelas y las barras de amarre longitudinal deben ser de varilla lisa para permitir facilidad en el movimiento horizontal de las losas; además deben ser colocadas en el centro del espesor de la losa. El acero de refuerzo de las dovelas debe ser de grado 60 y el de las barras de amarre longitudinal de grado 40. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).

Cabe agregar que la losa de concreto hidráulico diseñada, se propone colocar sobre una base mejorada con cemento hidráulico debido a que las losas sufren mucho cuando el material inferior se erosiona o se deforma porque la losa pierde sustento y se quiebra. También porque una base mejorada con cemento constituye un material más cohesivo que mejora la resistencia a la erosión y evita el surgimiento de fallas. Otra ventaja es que absorbe los cambios de expansión de los suelos y funciona como plataforma de trabajo debido a que el chorreo de la losa implica el paso de maquinaria pesada que deteriora la sub-rasante y al emplear una base de este tipo se evita el daño que se origina durante la construcción.

Análisis de costos y propuesta elegida

Con respecto a la estimación del costo de construcción inicial de los diferentes tipos de pavimentos, aunque se emplea una estructura de costos que no pertenece a los proyectos en cuestión, representa una buena estimación pues se trata de otro proyecto del Programa de Red Vial Cantonal ubicado en Santa Bárbara.

Además, es importante mencionar que cada estructura de costos varía de una empresa a otra, pues dependen de una serie de factores por lo que tampoco se puede asegurar que la empresa que cotizó esos costos en el 2012 para las municipalidades sea la misma que el día de hoy realice los proyectos. Por lo tanto, la opción de considerar una estructura de costos de referencia es adecuada para dar una buena estimación del costo total del proyecto.

No obstante, se debe recalcar que se trata de un aproximado y que en el momento que se realicen los proyectos se requiere de un presupuesto detallado que considere los factores específicos de cada proyecto y la fecha en que se construyen, ya que el reajuste de precios se realiza para agosto 2018 que son los últimos índices de precios que a la fecha ha publicado el INEC.

Por lo tanto, para el caso específico de Santo Domingo y empleando la estructura de costos de referencia se tiene que el pavimento flexible es el que posee el menor costo inicial con ₡226 679 683.550 pues el semi-rígido cuesta ₡276722956.000 y el rígido ₡356 894 702.298; si se analiza el costo por metro cuadrado que implica cada tipo de pavimento se tiene que para el flexible corresponde a ₡25 906.250, el semi-rígido ₡31 625.481 y el rígido ₡40 787.965. Como se observa el flexible es 18 % menos costoso que el semi-rígido y un 36 % menos que el rígido. El porcentaje de diferencia en el costo de los tipos de pavimento se debe principalmente a que se tienen diferentes espesores para cada uno y también a que se utilizan materiales distintos. Si bien el pavimento flexible posee una carpeta asfáltica de 7 cm que constituye el material de mayor costo en la estructura, para el semi-rígido además de tener el mismo espesor de carpeta se tiene una base estabilizada con cemento de 25 cm, que aumenta su costo considerablemente. Igualmente, en el pavimento rígido su costo se incrementa, puesto que, se tiene una losa de concreto hidráulico y una base mejorada con cemento de 15 cm.

Respecto al costo de mantenimiento se tiene para el pavimento flexible ₡36 895 950.000, semi-rígido ₡29 824 025.000 y para el rígido ₡12 229 787.500; si se considera el costo de mantenimiento por metro cuadrado se tiene ₡4 216.680 para el flexible, ₡3 408.460 para el semi-rígido y ₡1 397.690 para el rígido.

Como es de esperarse el pavimento rígido es 67 % más económico que el flexible y 59 % más económico que el semi-rígido; puesto que tiene mayor durabilidad y mejor desempeño.

Para elegir la opción que más se ajusta a las condiciones particulares del lugar se consideran una serie de factores. En primer lugar, se tiene la propuesta creada por la municipalidad en el 2012 la cual contempla la construcción de un pavimento flexible; es fundamental considerar dicho antecedente porque corresponde a lo que la municipalidad quiere construir.

Otro punto importante a señalar es el costo económico que se divide en dos aspectos: construcción inicial y mantenimiento. Se tiene que el pavimento flexible es el más económico en cuanto a construcción inicial, sin embargo, es el que implica el mayor costo de mantenimiento. Al ser una ruta rodeada de casas de habitación con la presencia de niños, jóvenes y adultos que deben ir a la escuela, colegio y trabajo, respectivamente; resulta importante habilitar el paso al tránsito y para ello la mejor opción es el pavimento flexible.

Como se observa, la elección de una determinada alternativa no se puede basar únicamente en los costos pues se debe tomar en cuenta los impactos, ventajas y desventajas que tenga en la sociedad. Es por ello, que se recomienda la construcción de un pavimento flexible con los espesores determinados en la sección de resultados.

San Pablo

Pavimento Flexible

Con la metodología AASHTO 93 se tiene una carpeta asfáltica de 7 cm, una base granular con un mínimo de 10 cm y una sub-base de 26 cm. Al utilizar CR-ME para verificar que los espesores cumplan con los umbrales establecidos, se obtiene que las dimensiones propuestas no cumplen con el valor límite de ahuellamiento por lo que se debe que variar los espesores.

Se busca tener una sub-base de 30 cm para aprovechar el material granular existente en el sitio y a partir de ello determinar los espesores requeridos para las otras capas.

Con 5 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base y 30 cm de sub-base se cumplen con los criterios de aceptación del software y se aprovecha los 30 cm de material granular existente. De igual forma, para el material de mayor costo en la estructura de pavimento se tiene el espesor mínimo permitido, que para este tipo de caminos corresponde a 5 cm.

Como se mencionó anteriormente, se decide aumentar el espesor de la base granular para evitar un posible deterioro del agregado.

Además, con los nuevos espesores se acerca más a los valores propuestos por la municipalidad en el 2012 (5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 25 cm de sub-base). Para la base granular se plantea colocar 5 cm más de lo previsto por la municipalidad, aumento que se considera mínimo pues ésta nueva propuesta no contempla la compra de material de sub-base que sí estaba incluida en la propuesta original.

Pavimento Semi-rígido

Mediante la metodología AASHTO 93 se obtiene 5 cm para la carpeta asfáltica, 15 cm para la base estabilizada con cemento y 24 cm para la sub-base.

A pesar de que el ahuellamiento cumple con el umbral establecido, según el modelo de la PCA es necesario cambiar los espesores base, ya que no cumplen con el número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga.

Como se mencionó anteriormente el esfuerzo a tensión en la parte inferior de la base estabilizada alcanza valores muy altos que provocan el no cumplimiento del modelo.

Luego de varias iteraciones se obtiene que con 6 cm de carpeta asfáltica, 25 cm de base estabilizada con cemento y 30 cm de sub-base se cumple con el límite establecido para el ahuellamiento y la fatiga durante el periodo de diseño. Aunque la estructura de pavimento cumple con menores espesores de sub-base, se decide considerar esa dimensión pues se sabe que el material no debe ser adquirido porque se tiene en sitio por lo que tampoco tiene sentido buscar optimizar su espesor.

Asimismo, se tiene que al considerar 30 cm de sub-base y revisar los criterios de aceptación se obtienen valores para los deterioros que se acercan más a la realidad presente en el sitio, que si se disminuye su espesor pues los deterioros tendrían valores más altos a los que realmente se van a presentar.

Pavimento Rígido

Por medio del diseño con la metodología AASHTO 93 se obtiene una losa de 12 cm, con dovelas #5 separadas 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm. Al verificar que la dimensión de la losa cumpla con los modelos estudiados, se obtiene que según el modelo de fatiga y el de bombeo es necesario aumentar el espesor pues no cumple con los criterios de aceptación establecidos.

Se propone una losa de 15 cm con las mismas dimensiones y especificaciones dadas para el caso de Santo Domingo, pues cumple con el modelo de fatiga, bombeo y escalonamiento.

Análisis de costos y propuesta elegida

Para el caso de San Pablo los costos de los pavimentos y las diferencias entre ellos varían un poco, esto se debe a la presencia de material granular en el sitio que se decide emplear como sub-base. Por lo tanto, se tiene un costo inicial del pavimento flexible de ¢113 926 198.258, del semi-rígido de ¢196 918 581.807 y del rígido de ¢327 331 932.181; al considerar el costo por metro cuadrado se tiene para el flexible ¢13 104.003, del semi-rígido de ¢22 649.940 y del rígido de ¢37 650.326.

Un punto importante es que la construcción del pavimento flexible representa un ahorro del 42 % respecto al semi-rígido y del 65 % con respecto al rígido. La notable diferencia entre los precios obedece a que para el flexible se establece una carpeta asfáltica de 5 cm y una base granular de 20 cm, sin embargo, para el semi-rígido se tienen espesores mayores y una base estabilizada con cemento. En el caso del pavimento rígido la diferencia es aún mayor, ya que no se propone utilizar el material granular en sitio y, por lo tanto, no hubo ahorro en los costos. De igual forma que para Santo Domingo, el costo de mantenimiento que tiene el pavimento rígido es un 67 % menor que el flexible y 59 % menos que el semi-rígido.

Como se ha mencionado en varias secciones, el diseño de la estructura de pavimento para San Pablo se basa en establecer un espesor de 30 cm de sub-base para aprovechar el material que se tiene en sitio y así, lograr un ahorro significativo en los costos. Por lo tanto, la propuesta de pavimento rígido se descarta pues no considera el material existente al proponer una base mejorada con cemento que le dé mayor sustento a la losa diseñada. Además, este pavimento es más recomendable de usar en carreteras con volúmenes altos de tránsito.

El pavimento flexible resulta un 42 % más económico que el semi-rígido, aunque conlleva un costo mayor de mantenimiento; si se realiza una sumatoria del costo general, de igual forma se obtiene que el pavimento flexible es el más económico.

Si se considera el documento presentado en el 2012 por la municipalidad, se observa su preferencia con relación a una estructura de pavimento flexible.

Por todo lo mencionado anteriormente y como el pavimento flexible tiene el paquete estructural de menor espesor que implica menores acarreos de material, menor excavación, menores jornadas de trabajo y en general, un plazo estimado de ejecución menor; se recomienda como el más adecuado para construir en el cantón.

Santa Bárbara

Pavimento Flexible

Básicamente se obtienen los espesores mínimos por medio de la metodología AASHTO 93, con la excepción de la carpeta asfáltica con un centímetro más del mínimo.

Al verificar que los valores de los deterioros presentes a lo largo del periodo de diseño cumplan con los límites, se observa que el ahuellamiento se encuentra muy cerca del umbral permitido por lo que se decide variar los espesores.

Con una configuración de 5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 15 cm de sub-base se obtiene un ahuellamiento, un porcentaje de área agrietada y un agrietamiento longitudinal menor al que se tiene originalmente por lo que se garantiza mejores condiciones para la estructura de pavimento.

Pavimento Semi-rígido

El diseño por medio de AASHTO 93 establece un paquete estructural de 5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base estabilizada con cemento y 15 cm de sub-base. De hecho, el número estructural para la carpeta asfáltica da como resultado cero, lo que quiere decir que no se requiere de ésta capa pero que se decide colocar por un tema de rugosidad.

Si se revisa el diseño realizado se observa que se tiene un número estructural de cero porque al contar con una cantidad tan pequeña de ejes equivalentes y una base estabilizada con un módulo resiliente alto, el primer término de la ecuación de diseño posee un valor pequeño que no se va a obtener del otro lado de la ecuación ni utilizando un número estructural de cero; la diferencia va a ser notable y, por lo tanto, no cumplirá la condición establecida de que la diferencia debe ser menor a 0.0009. De ahí que la condición no se cumpla y los resultados arrojen que no se requiere contribución estructural de la carpeta asfáltica.

A pesar de ello, se decide revisar la estructura propuesta contemplando el mínimo para la carpeta asfáltica. De igual forma que para Santo Domingo y San Pablo, la baja calidad de la sub-rasante y el proponer los espesores mínimos ocasiona esfuerzos a tensión en la parte inferior de la base estabilizada muy altos que trae como consecuencia que los espesores base establecidos con la metodología AASHTO 93 no cumplan con la revisión por medio de la metodología mecánica-empírica.

Lo que implica la elección de nuevas dimensiones que cumplan con los parámetros establecidos; se tiene que 6 cm de carpeta asfáltica, 22 cm de base estabilizada con cemento y 15 cm de sub-base granular conforman un paquete estructural adecuado para esta ruta.

Pavimento Rígido

Al utilizar la metodología AASHTO 93 se obtiene una losa de 10.5 cm con dovelas #6 cada 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm. Sin embargo, se considera que una capa con alta rigidez y poco espesor propicia una falla frágil por lo que se decide aumentar su dimensión.

Si se considera una losa de 15 cm con dovelas #6 con longitud y espaciamiento de 30 cm y barras de amarre longitudinal #4 cada 60 cm y con 30 cm de longitud, de igual forma que para los dos cantones anteriores, se cumple con los modelos de deterioro analizados y se asegura el buen estado de la estructura de pavimento.

Análisis de costos y propuesta elegida

Para Santa Bárbara el pavimento flexible tiene un costo inicial de ₡151 477 896.128, el semi-rígido de ₡237 437 839.077 y el rígido de ₡344 455 489.134; con un costo por metro cuadrado para el flexible de ₡17 593.252, para el semi-rígido de ₡27 576.985 y el rígido de ₡40 006.445. Donde el flexible es un 36 % más económico que el semi-rígido y un 56 % más económico que el rígido.

Con el costo de mantenimiento se tiene el mismo escenario que para los dos cantones anteriores, donde el pavimento rígido presenta el menor valor seguido por el semi-rígido y el flexible.

En relación con el análisis de cual alternativa es la que más se ajusta, se tiene que al contar con una cantidad tan baja de ejes equivalentes de carga la mejor opción es el pavimento flexible pues considera prácticamente los espesores mínimos de las capas y el menor costo. De hecho, como antecedente la municipalidad no considera la colocación de ningún tipo de pavimento, ya que no justifican invertir grandes sumas de dinero; sin embargo, conocen la importancia de la ruta y del aumento en el tránsito promedio diario una vez que su condición sea mejorada. Por lo tanto, el incremento ocasionado en el costo por colocar una estructura de pavimento flexible se justifica al predecir el aumento de las solicitudes a las que va estar expuesto; además porque la solución propuesta por la municipalidad en el 2012 es a corto plazo y requerirá de intervenciones continuamente.

Estructura de pavimento con Material de préstamo

Como parte de las consultas realizadas a diferentes profesionales el Ing. Eliécer Arias Barrantes de LanammeUCR recomendó analizar la posibilidad de utilizar un material de sustitución debido a que se tienen suelos con CBR menores o iguales a tres.

Para el caso de San Pablo se tiene un material granular existente de aproximadamente 30 cm, que se decide emplear como sub-base pues cumple con la mayoría de las especificaciones establecidas para la sub-base en el CR-2010; por lo tanto, no se justifica retirar un material de buena calidad que se tiene en sitio por otro de menor calidad y que se debe comprar y acarrear.

De hecho, el objetivo principal buscado al dimensionar la estructura de pavimento es aprovechar ese material granular que se tiene en sitio y a partir de ello, dimensionar los espesores de las otras capas, pues esto representa un ahorro en los costos.

En el cantón donde se veía más factible o viable emplear un material de préstamo porque posee el suelo de más baja calidad, también se descartó esa alternativa; pues para Santo Domingo se realiza el diseño de pavimento flexible por medio de la metodología AASHTO 93 y se determina que si se emplea un material de sustitución y, además, se cuenta con la carpeta asfáltica, base y sub-base cuyos espesores son mínimos pero se les debe sumar el material de sustitución, al final el paquete estructural aumenta considerablemente; si bien se reduce el espesor de sub-base al mínimo eso implica la adición de una cama de material de sustitución y tampoco se justifica ni desde el punto de vista económico ni constructivo. (Ver Apéndice10).

Por otro lado, si no se coloca la sub-base granular se requiere mayores espesores del material de sustitución y el paquete estructural continúa siendo mayor por lo que tampoco representa una buena opción. (Ver Apéndice 11).

En el diseño para Santa Bárbara se elige un CBR de tres como el más representativo y crítico para realizar los cálculos aunque en algunos casos se tienen CBR de 14; aunado a esto, constituye un camino con muy bajo tránsito vehicular y para el cual la municipalidad no concibe realizar una sustitución.

Con respecto a los antecedentes, ninguna municipalidad considera necesario emplear material de sustitución en sus propuestas; por el contrario, proponen espesores mínimos pues su idea es reducir los costos al máximo.

La idea de emplear un material de préstamo es completamente descartada cuando se revisan los espesores base (sin considerar este material) con la metodología mecánica empírica y se obtiene, para todos los casos, la posibilidad de optimizar los diseños. Precisamente la metodología mecánica-empírica permite verificar que los diseños cumplan con todos los criterios de aceptación para los diferentes tipos de deterioros y optimizar las estructuras de pavimento hasta valores cercanos a los mínimos.

Debido a lo anterior se demuestra que no es necesario emplear un material de préstamo que genera paquetes estructurales más robustos pues sin emplear ese material se obtienen estructuras de pavimento de menor espesor y que cumplen con los umbrales establecidos para los deterioros analizados con lo cual se garantiza que el pavimento se va a encontrar en buenas condiciones a lo largo del periodo de diseño.

Para el pavimento semi-rígido diseñado por medio de la metodología AASHTO 93 el colocar un material de préstamo tampoco representa una disminución significativa en los costos puesto que, se deben colocar los espesores mínimos para la carpeta asfáltica y la base estabilizada con cemento y un espesor bastante considerable de material de sustitución.

Con la metodología mecánica-empírica el diseño del pavimento semi-rígido varía un poco, ya que su diseño depende del máximo esfuerzo de tensión en la última fibra de la base estabilizada que determina si el paquete estructural cumple o no por fatiga. En los casos analizados se encuentran esfuerzos de tensión muy altos que se deben disminuir aumentando los espesores de la carpeta asfáltica y de la base estabilizada con cemento.

A modo de resumen, con ninguna metodología la estructura de pavimento semi-rígido muestra beneficios significativos al emplear un material de préstamo.

Comparación entre metodologías de diseño

El diseño por medio de la metodología AASHTO 93 se basa principalmente en los ejes equivalentes del periodo de diseño y en los módulos resilientes de los materiales; estos últimos se obtienen de nomogramas de la AASHTO, que no consideran las características particulares de nuestro país. Precisamente ésta metodología se basa en conceptos empíricos, con presiones de inflado inferiores a las actuales, considera solamente un tipo de suelo y posee limitaciones en materiales de base (no considera bases asfálticas o estabilizadas con cemento); lo anterior se debe a que fue desarrollada en el Estado de Illinois (USA) para las particularidades de ese sitio.

Caso contrario sucede con la metodología mecanística-empírica porque considera las características específicas de los materiales que se tienen en el país y que se utilizarán para el proyecto, también incluye el clima particular de la zona. Como se aprecia con ésta metodología se obtienen estructuras de pavimento más certeras y adecuadas para el lugar en cuestión, porque contempla las particularidades del sitio y a las que va a estar expuesta, por lo que también se garantiza con más confianza que el pavimento se va a encontrar en buenas condiciones durante su vida útil.

Otro punto importante a mencionar es que permite conocer el comportamiento del pavimento a lo largo del periodo de diseño y con ello brinda la posibilidad de establecer en que momento requiere algún tipo de intervención. Como se observa en la sección de resultados CR-ME muestra el daño por fatiga de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo, el porcentaje de área agrietada, el agrietamiento longitudinal y el ahuellamiento para cada mes del periodo de diseño y así, se puede reconocer cuando es necesario intervenir la estructura de pavimento.

Las precipitaciones, la humedad y el grado de saturación al cual está expuesto el suelo tiene un impacto significativo en la estructura de pavimento que es considerado con la metodología mecanística-empírica; sin embargo, al utilizar la establecida por AASHTO en 1993 ese factor tan importante solo se considera al elegir el coeficiente de drenaje que depende mucho del criterio del diseñador.

Todos los diseños realizados por medio de la metodología AASHTO 93 difieren con los establecidos a través de la metodología mecanística-empírica.

En el caso del pavimento flexible, los espesores determinados por medio de AASHTO 93 para la carpeta asfáltica son considerados conservadores, esto porque al utilizar la metodología mecanística-empírica se logra disminuir su espesor significativamente.

En el pavimento semi-rígido sucede lo contrario pues la metodología mecanística-empírica sugiere espesores mayores para la carpeta asfáltica y la base estabilizada, lo anterior obedece principalmente al alto valor de esfuerzo a tensión presentado en la última fibra de la base estabilizada que provoca que el modelo de fatiga de la PCA no cumpla con lo establecido.

Sucede similar con el pavimento rígido donde la metodología mecanística-empírica exige mayores espesores de losa para disminuir el esfuerzo aplicado pues esfuerzos tan grandes forman microfisuras en el material que luego lo llevan a la ruptura.

Como se nota, para el pavimento semi-rígido y para el rígido se deben realizar aumentos en los espesores al ser revisados con la metodología mecanística-empírica; lo anterior se debe a que al utilizar la metodología AASHTO 93 no se analizan las respuestas del pavimento por lo que se desconoce su desempeño y los espesores son determinados considerando otros parámetros, pero no sus respuestas mecánicas.

Como la metodología mecanística-empírica sí calcula las respuestas del pavimento como esfuerzos, deformaciones y deflexiones, se pueden predecir situaciones como las anteriores donde los esfuerzos obtenidos son altos y es necesario aumentar espesores para asegurar su cumplimiento con los diferentes modelos de deterioro.

Por lo tanto, si se realiza una comparación entre ambas metodologías desde el punto de vista económico se tiene que para el caso del pavimento flexible, el costo por metro cuadrado es mayor con la metodología AASHTO 93 pues su diseño considera una estructura más robusta o mayores espesores de la carpeta asfáltica que es el elemento de mayor costo en el paquete estructural.

Para el caso del pavimento semi-rígido y rígido, sucede lo contrario pues es la metodología mecanística-empírica la que posee mayor costo por metro cuadrado de construcción inicial. Esto debido a que, como se mencionó anteriormente, los modelos de desempeño no cumplían con lo establecido y era necesario incrementar los espesores de las capas.

Conclusiones

1. La metodología AASHTO 93 se basa principalmente en los ejes equivalentes del periodo de diseño y en los módulos resilientes de los materiales pero sin afectarlos con el paso del tiempo pues no considera las condiciones climáticas específicas de la zona. Por el contrario; la metodología mecanística-empírica calcula las respuestas del pavimento y estima su desempeño considerando el clima, el tránsito y los materiales presentes.
2. Con la metodología AASHTO 93 se tiene mayor costo por metro cuadrado de construcción inicial para el pavimento flexible, sin embargo, para el rígido y semi-rígido el costo es menor con respecto a la metodología mecanística-empírica.
3. El TPD utilizado para realizar el diseño es aproximado, ya que el valor obtenido por medio de contadores vehiculares se aumentó con un factor de expansión que se asumió de 20 % pues es un factor que no se puede conocer con certeza.
4. El pavimento flexible posee el menor costo de construcción inicial, tiene mayor facilidad constructiva y las actividades de mantenimiento son más sencillas por lo que requiere de menor tiempo para reanudar el tránsito. No obstante, tiene el mayor costo de mantenimiento pues requiere de mayor frecuencia y cantidad en las intervenciones debido al tipo de estructura.
5. El pavimento rígido tiene el mayor costo de construcción inicial, sin embargo, al tener mayor durabilidad y mejor desempeño requiere de un menor mantenimiento a lo largo de su vida útil.
6. El pavimento semi-rígido posee un costo considerable ya que incluye una carpeta asfáltica y, además, una base estabilizada con cemento hidráulico. Se emplea cuando se requieren materiales con mayor capacidad estructural para volúmenes de tránsito alto o tránsito pesado.
7. Para Santo Domingo el costo por metro cuadrado del pavimento flexible es de ₡25 906.250, el semi-rígido ₡31 625.481 y el rígido ₡40 787.965; donde el flexible representa un ahorro del 18 % con respecto al semi-rígido y un 36 % respecto al rígido.
8. El pavimento flexible es el que más se adapta para las condiciones de Santo Domingo con 7 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 30 cm de sub-base.
9. En San Pablo el pavimento flexible posee un costo por metro cuadrado de ₡13 104.003, el semi-rígido de ₡22 649.940 y del rígido de ₡37 650.326. Para este caso, el flexible es 42 % más económico que el semi-rígido y 65 % más económico que el rígido.
10. Para San Pablo se recomienda una estructura de pavimento flexible de 5 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base granular y 30 cm de sub-base.

11. En Santa Bárbara se tiene un costo por metro cuadrado para el pavimento flexible de ¢17 593.252, para el semi-rígido de ¢27 576.985 y el rígido de ¢40 006.445. El flexible es un 36 % más económico que el semi-rígido y un 56 % más económico que el rígido.
12. En Santa Bárbara el pavimento flexible es el que más se ajusta a las características presentes con 5 cm de carpeta asfáltica, 15 cm de base granular y 15 de sub-base.

Recomendaciones

1. Evaluar si algún tipo de estabilización puede mejorar las características del suelo, cuando éstos son arcillosos con elevado contenido de finos de plasticidad media o alta.
2. Utilizar espectros de carga pues es una manera más específica de tomar en cuenta la variable tránsito, ya que suma el daño producido por cada carga de cada tipo de eje.
3. Al realizar un diseño de pavimento se deben utilizar las características específicas de los materiales que se van a colocar para no sobreestimar o subestimar sus propiedades.
4. Se pueden reducir los espesores del paquete estructural empleando materiales de mejor calidad para la base y sub-base, con valores de CBR mayores a los mínimos establecidos en el CR-2010; evidentemente se tienen que respetar y utilizar los materiales con las características especificadas.
5. Con respecto al costo de construcción, es importante emplear la estructura de costos del proyecto en específico para considerar las características presentes en la zona. De lo contrario, es deseable recopilar precios de la mayor cantidad de empresas constructoras y proveedoras para así obtener un promedio, y con ello, valores más confiables.
6. Para el costo de mantenimiento determinado por el tipo de intervención y el total a intervenir, se recomienda consultar a más profesionales con experiencia para formular una propuesta con un resultado mucho más preciso.
7. Como en los tramos a diseñar no se detectaron sistemas de drenaje se recomienda su creación para prevenir daños futuros en la estructura de pavimento.
8. Para Santo Domingo se recomienda construir una acera con ancho de 1.20 m y cordón y caño con un ancho total de 0.65 m a ambos lados.
9. En el caso de San Pablo y Santa Bárbara se recomienda la creación de cunetas con un área de sección transversal de 0.30 m² con un tirante de 0.5 m respecto al nivel de la rasante.

Apéndices

1.	Diseño de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santo Domingo.	125
2.	Diseño de pavimento semi-rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santo Domingo.	127
3.	Diseño del pavimento rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santo Domingo.	129
4.	Diseño de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en San Pablo.	131
5.	Diseño de pavimento semi-rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en San Pablo.	133
6.	Diseño de pavimento rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en San Pablo.	135
7.	Diseño de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santa Bárbara.	137
8.	Diseño de pavimento semi-rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santa Bárbara.	139
9.	Diseño de pavimento rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santa Bárbara.	141
10.	Diseño de pavimento flexible con material de préstamo para el tramo en Santo Domingo.	143
11.	Diseño de pavimento flexible con material de préstamo y sin considerar sub-base para el tramo en Santo Domingo.	145
12.	Diseño de pavimento semi-rígido con material de préstamo y sin considerar sub-base para el tramo en Santo Domingo.	147
13.	Deterioros presentes en la superficie de rodadura del tramo en Santo Domingo.	149
14.	Límite entre el cantón de Santo Domingo y San Pablo.	150
15.	Ubicación de contadores vehiculares en el tramo de Santo Domingo y de San Pablo.	151

Apéndice 1. Diseño de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santo Domingo.

Diseño de Pavimento Flexible AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	83 697
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.2
Índice de servicio final	2.0
ΔPSI	2.2
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_i	m_i
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base granular	28 000	0.13	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Sub-rasante	1 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN _i (in)	$h_{iTeórico}$ (in)	$h_{iTeórico}$ (cm)	$h_{iPropuesto}$ (cm)	SN _i requerido (in)	SN _i Total (in)
Carpeta asfáltica	1.152	2.607	6.622	7.000	1.152	1.218
Base granular	1.515	2.282	5.796	10.000	0.297	0.513
Sub-base	3.562	16.798	42.667	43.000	1.831	1.845
				60.000	3.280	3.576

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN ₁)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-log Obt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.9171	-3.9944	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.8603	-1.9376	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	5.1025	-0.1798	No Cumple
4.9227	0.0000	0.6250	1.2500	3.7840	1.1387	No Cumple
4.9227	0.6250	0.9375	1.2500	4.4975	0.4252	No Cumple
4.9227	0.9375	1.0938	1.2500	4.8116	0.1111	No Cumple
4.9227	1.0938	1.1719	1.2500	4.9597	-0.0370	No Cumple
4.9227	1.0938	1.1328	1.1719	4.8864	0.0364	No Cumple
4.9227	1.1328	1.1523	1.1719	4.9232	-0.0005	No Cumple
4.9227	1.1328	1.1426	1.1523	4.9048	0.0179	No Cumple
4.9227	1.1426	1.1475	1.1523	4.9140	0.0087	No Cumple
4.9227	1.1475	1.1499	1.1523	4.9186	0.0041	No Cumple
4.9227	1.1499	1.1511	1.1523	4.9209	0.0018	No Cumple
4.9227	1.1511	1.1517	1.1523	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.1517	1.1520	1.1523	4.9226	0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para la base granular (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.2882	-3.3655	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.2315	-1.3088	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.4736	0.4491	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.4575	-0.5347	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.9974	-0.0747	No Cumple
4.9227	1.2500	1.4063	1.5625	4.7444	0.1783	No Cumple
4.9227	1.4063	1.4844	1.5625	4.8730	0.0497	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5234	1.5625	4.9357	-0.0130	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5039	1.5234	4.9045	0.0182	No Cumple
4.9227	1.5039	1.5137	1.5234	4.9201	0.0026	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5186	1.5234	4.9279	-0.0052	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5161	1.5186	4.9240	-0.0013	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5149	1.5161	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.5149	1.5155	1.5161	4.9231	-0.0003	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	5.9682	-1.0455	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	3.9115	1.0112	No Cumple
4.9227	2.5000	3.7500	5.0000	5.0756	-0.1529	No Cumple
4.9227	2.5000	3.1250	3.7500	4.5420	0.3807	No Cumple
4.9227	3.1250	3.4375	3.7500	4.8186	0.1041	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5938	3.7500	4.9493	-0.0266	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5156	3.5938	4.8845	0.0382	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5547	3.5938	4.9171	0.0057	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5742	3.5938	4.9332	-0.0105	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5645	3.5742	4.9251	-0.0024	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5596	3.5645	4.9211	0.0016	No Cumple
4.9227	3.5596	3.5620	3.5645	4.9231	-0.0004	Cumple
4.9227	3.5596	3.5608	3.5620	4.9221	0.0006	Cumple

Apéndice 2. Diseño de pavimento semi-rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santo Domingo.

Diseño De Pavimento Semi-Rígido AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	83 697
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.3
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.3
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_1	m_1
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base estabilizada con cemen	610 000	0.16	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Sub-rasante	1 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN _i (in)	$h_{Teórico}$ (in)	$h_{Teórico}$ (cm)	$h_{Propuesto}$ (cm)	SN _i requerido (in)	SN _i Total (in)
Carpeta asfáltica	0.002	0.004	0.010	5.000	0.002	0.870
Base estabilizada con cem	1.514	4.076	10.354	15.000	0.644	0.933
Sub-base	3.533	15.880	40.336	41.000	1.731	1.759
				61.000	2.376	3.562

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN ₁)						
$\log W_{18}$ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	$\log W_{18}$ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	7.5000	15.0000	13.4481	-8.5254	No Cumple
4.9227	0.0000	3.7500	7.5000	11.1553	-6.2326	No Cumple
4.9227	0.0000	1.8750	3.7500	9.1948	-4.2721	No Cumple
4.9227	0.0000	0.9375	1.8750	7.6026	-2.6799	No Cumple
4.9227	0.0000	0.4688	0.9375	6.4782	-1.5554	No Cumple
4.9227	0.0000	0.2344	0.4688	5.7717	-0.8490	No Cumple
4.9227	0.0000	0.1172	0.2344	5.3663	-0.4436	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0586	0.1172	5.1474	-0.2247	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0293	0.0586	5.0333	-0.1106	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0146	0.0293	4.9750	-0.0523	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0073	0.0146	4.9456	-0.0229	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0037	0.0073	4.9308	-0.0081	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0018	0.0037	4.9234	-0.0006	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0009	0.0018	4.9196	0.0031	No Cumple
4.9227	0.0009	0.0014	0.0018	4.9215	0.0012	No Cumple
4.9227	0.0014	0.0016	0.0018	4.9224	0.0003	Cumple
4.9227	0.0016	0.0017	0.0018	4.9229	-0.0002	Cumple

Cálculo de número estructural para la base estabilizada con cemento (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	7.5000	15.0000	9.7147	-4.7920	No Cumple
4.9227	0.0000	3.7500	7.5000	7.4219	-2.4991	No Cumple
4.9227	0.0000	1.8750	3.7500	5.4614	-0.5386	No Cumple
4.9227	0.0000	0.9375	1.8750	3.8692	1.0535	No Cumple
4.9227	0.9375	1.4063	1.8750	4.7460	0.1767	No Cumple
4.9227	1.4063	1.6406	1.8750	5.1204	-0.1977	No Cumple
4.9227	1.4063	1.5234	1.6406	4.9378	-0.0151	No Cumple
4.9227	1.4063	1.4648	1.5234	4.8431	0.0796	No Cumple
4.9227	1.4648	1.4941	1.5234	4.8907	0.0320	No Cumple
4.9227	1.4941	1.5088	1.5234	4.9143	0.0084	No Cumple
4.9227	1.5088	1.5161	1.5234	4.9261	-0.0033	No Cumple
4.9227	1.5088	1.5125	1.5161	4.9202	0.0025	No Cumple
4.9227	1.5125	1.5143	1.5161	4.9231	-0.0004	No Cumple
4.9227	1.5125	1.5134	1.5143	4.9217	0.0011	No Cumple
4.9227	1.5134	1.5138	1.5143	4.9224	0.0003	Cumple
4.9227	1.5138	1.5141	1.5143	4.9228	0.0000	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	7.5000	15.0000	7.3947	-2.4720	No Cumple
4.9227	0.0000	3.7500	7.5000	5.1019	-0.1791	No Cumple
4.9227	0.0000	1.8750	3.7500	3.1414	1.7814	No Cumple
4.9227	1.8750	2.8125	3.7500	4.2548	0.6680	No Cumple
4.9227	2.8125	3.2813	3.7500	4.7028	0.2199	No Cumple
4.9227	3.2813	3.5156	3.7500	4.9076	0.0151	No Cumple
4.9227	3.5156	3.6328	3.7500	5.0059	-0.0832	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5742	3.6328	4.9571	-0.0344	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5449	3.5742	4.9324	-0.0097	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5303	3.5449	4.9200	0.0027	No Cumple
4.9227	3.5303	3.5376	3.5449	4.9262	-0.0035	No Cumple
4.9227	3.5303	3.5339	3.5376	4.9231	-0.0004	No Cumple
4.9227	3.5303	3.5321	3.5339	4.9216	0.0012	No Cumple
4.9227	3.5321	3.5330	3.5339	4.9223	0.0004	Cumple
4.9227	3.5330	3.5335	3.5339	4.9227	0.0000	Cumple

Apéndice 3. Diseño del pavimento rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santo Domingo.

Diseño De Pavimento Rígido AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	124 921
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.35
Índice de servicio inicial	4.5
Índice de servicio final	2
Δ PSI	2.5
Estadístico Z	-0.524

Propiedades del concreto hidráulico	
Resistencia a la compresión 28 días (psi)	3 627
Módulo de Elasticidad (psi)	3 432 777
Módulo de Ruptura (psi)	640

Coeficiente de drenaje	
Calidad	Bueno
Tiempo de exposición a niveles de humedad que se aproximan a la saturación (%)	30%
Cd	1

Coeficiente de transferencia de carga	
Tipo de espaldón	Asfalto
Utiliza dovelas	Si
Tipo de pavimento	JPCP
J	3.2

Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto (plg)	6
Espesor de base supuesto (plg)	6
Módulo resiliente de la sub-rasante	1500
Módulo resiliente de la base mejorada con cemento	31000
Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante (pci)	107
Estrato rígido	No
Profundidad de estrato rígido (ft)	0
Módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido (pci)	107
Daño relativo	25.54
LS	1.5
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante corregido por potencial pérdida de soporte (pci)	25

Cálculo de espesor de losa (D)						
$\log W_{18}$ Total	D _{inicial}	D _{promedio}	D _{final}	$\log W_{18}$ Obt	log Total-log Obt	Condición
5.0966	0.0000	10.0000	20.0000	7.1570	-2.0604	No Cumple
5.0966	0.0000	5.0000	10.0000	5.2253	-0.1287	No Cumple
5.0966	0.0000	2.5000	5.0000	3.3489	1.7478	No Cumple
5.0966	2.5000	3.7500	5.0000	4.4455	0.6511	No Cumple
5.0966	3.7500	4.3750	5.0000	4.8635	0.2332	No Cumple
5.0966	4.3750	4.6875	5.0000	5.0506	0.0460	No Cumple
5.0966	4.6875	4.8438	5.0000	5.1394	-0.0428	No Cumple
5.0966	4.6875	4.7656	4.8438	5.0954	0.0013	No Cumple
5.0966	4.7656	4.8047	4.8438	5.1175	-0.0209	No Cumple
5.0966	4.7656	4.7852	4.8047	5.1065	-0.0098	No Cumple
5.0966	4.7656	4.7754	4.7852	5.1009	-0.0043	No Cumple
5.0966	4.7656	4.7705	4.7754	5.0982	-0.0015	No Cumple
5.0966	4.7656	4.7681	4.7705	5.0968	-0.0001	Cumple
5.0966	4.7656	4.7668	4.7681	5.0961	0.0006	Cumple
Espesor final de losa (in)				4.77		
Espesor redondeado (cm)				12.5		

Dovelas

Parámetros de diseño	
Ec (psi)	3 432 777
f'c (psi)	3 627
h (in)	4.77
k (pci)	25
μ	0.15
kd (pci)	300000
Ea (psi)	2.90E+07
z (in)	0.2
Dovela #	5
Separación (cm)	30

Rigidez Relativa (in)	33.56
1.8 I (in)	60.41
Dovelas involucradas	5.11

Dovela	Distancia(in)	Rci	Pdi (lb)
1	0.00	1.00	1477.88
2	11.81	0.80	1188.94
3	23.62	0.61	900.00
4	35.43	0.41	611.06
5	47.24	0.22	322.12
	Σ	3.04	

Cálculo de esfuerzos en la dovela crítica	
I (in ⁴)	0.01
β (in)	0.68
σ_b (psi)	3443.00
fb (psi)	4080.32
Esfuerzo aplicado < Esfuerzo de falla	Cumple

Barras de amarre longitudinal

Área de acero requerido por ft lineal	
fa	1.5
fs (psi)	27000
h (in)	4.77
L' (in)	137.80
σ_c	0.0868
As (in ² /in)	0.0032
As (in ² /ft)	0.0380

Área de acero propuesta por ft lineal	
Varilla #	4
Diámetro (in)	0.5
Separación (cm)	60
As (in ² /ft)	0.098

Acero requerido < Acero propuesto	Cumple
---------------------------------------------	---------------

Apéndice 4. Diseño de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en San Pablo.

Diseño De Pavimento Flexible AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	91 661
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.2
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.2
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_1	m_1
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base granular	28 000	0.13	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Sub-rasante	3 000	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN_i (in)	$h_{Teórico}$ (in)	$h_{Teórico}$ (cm)	$h_{Propuesto}$ (cm)	SN_i requerido (in)	SN_i Total (in)
Carpeta asfáltica	1.173	2.655	6.743	7.000	1.173	1.218
Base granular	1.540	2.473	6.281	10.000	0.322	0.513
Sub-base	2.835	10.129	25.727	26.000	1.104	1.115
				43.000	2.599	2.846

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN_1)						
$\log W_{18}$ Total	$SN_{inicial}$	$SN_{promedio}$	SN_{final}	$\log W_{18}$ Obt	$\log Tot - \log Obt$	Condición
4.9622	0.0000	5.0000	10.0000	8.9171	-3.9549	No Cumple
4.9622	0.0000	2.5000	5.0000	6.8603	-1.8982	No Cumple
4.9622	0.0000	1.2500	2.5000	5.1025	-0.1403	No Cumple
4.9622	0.0000	0.6250	1.2500	3.7840	1.1782	No Cumple
4.9622	0.6250	0.9375	1.2500	4.4975	0.4647	No Cumple
4.9622	0.9375	1.0938	1.2500	4.8116	0.1506	No Cumple
4.9622	1.0938	1.1719	1.2500	4.9597	0.0024	No Cumple
4.9622	1.1719	1.2109	1.2500	5.0318	-0.0696	No Cumple
4.9622	1.1719	1.1914	1.2109	4.9959	-0.0337	No Cumple
4.9622	1.1719	1.1816	1.1914	4.9779	-0.0157	No Cumple
4.9622	1.1719	1.1768	1.1816	4.9688	-0.0066	No Cumple
4.9622	1.1719	1.1743	1.1768	4.9643	-0.0021	No Cumple
4.9622	1.1719	1.1731	1.1743	4.9620	0.0002	No Cumple
4.9622	1.1731	1.1737	1.1743	4.9631	-0.0010	No Cumple
4.9622	1.1731	1.1734	1.1737	4.9626	-0.0004	Cumple
4.9622	1.1731	1.1732	1.1734	4.9623	-0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para la base granular (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9622	0.0000	5.0000	10.0000	8.2882	-3.3260	No Cumple
4.9622	0.0000	2.5000	5.0000	6.2315	-1.2693	No Cumple
4.9622	0.0000	1.2500	2.5000	4.4736	0.4885	No Cumple
4.9622	1.2500	1.8750	2.5000	5.4575	-0.4953	No Cumple
4.9622	1.2500	1.5625	1.8750	4.9974	-0.0352	No Cumple
4.9622	1.2500	1.4063	1.5625	4.7444	0.2178	No Cumple
4.9622	1.4063	1.4844	1.5625	4.8730	0.0892	No Cumple
4.9622	1.4844	1.5234	1.5625	4.9357	0.0265	No Cumple
4.9622	1.5234	1.5430	1.5625	4.9667	-0.0045	No Cumple
4.9622	1.5234	1.5332	1.5430	4.9512	0.0110	No Cumple
4.9622	1.5332	1.5381	1.5430	4.9590	0.0032	No Cumple
4.9622	1.5381	1.5405	1.5430	4.9628	-0.0006	No Cumple
4.9622	1.5381	1.5393	1.5405	4.9609	0.0013	No Cumple
4.9622	1.5393	1.5399	1.5405	4.9619	0.0003	Cumple
4.9622	1.5399	1.5402	1.5405	4.9623	-0.0002	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9622	0.0000	5.0000	10.0000	6.6666	-1.7044	No Cumple
4.9622	0.0000	2.5000	5.0000	4.6099	0.3523	No Cumple
4.9622	2.5000	3.7500	5.0000	5.7740	-0.8118	No Cumple
4.9622	2.5000	3.1250	3.7500	5.2404	-0.2783	No Cumple
4.9622	2.5000	2.8125	3.1250	4.9399	0.0223	No Cumple
4.9622	2.8125	2.9688	3.1250	5.0935	-0.1313	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8906	2.9688	5.0175	-0.0554	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8516	2.8906	4.9789	-0.0167	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8320	2.8516	4.9595	0.0027	No Cumple
4.9622	2.8320	2.8418	2.8516	4.9692	-0.0070	No Cumple
4.9622	2.8320	2.8369	2.8418	4.9643	-0.0021	No Cumple
4.9622	2.8320	2.8345	2.8369	4.9619	0.0003	No Cumple
4.9622	2.8345	2.8357	2.8369	4.9631	-0.0009	No Cumple
4.9622	2.8345	2.8351	2.8357	4.9625	-0.0003	Cumple
4.9622	2.8345	2.8348	2.8351	4.9622	0.0000	Cumple

Apéndice 5. Diseño de pavimento semi-rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en San Pablo.

Diseño De Pavimento Semi-Rígido AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	91 661
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.3
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.3
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_1	m_1
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base estabilizada con cemen	610 000	0.16	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Sub-rasante	3 000	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN _i (in)	$h_{Teórico}$ (in)	$h_{Teórico}$ (cm)	$h_{Propuesto}$ (cm)	SN _i requerido (in)	SN _i Total (in)
Carpeta asfáltica	0.012	0.026	0.066	5.000	0.012	0.870
Base estabilizada con cemen	1.539	4.234	10.755	15.000	0.669	0.933
Sub-base	2.821	9.346	23.739	24.000	1.018	1.030
				44.000	1.699	2.833

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN ₁)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9622	0.0000	7.5000	15.0000	13.4481	-8.4859	No Cumple
4.9622	0.0000	3.7500	7.5000	11.1553	-6.1931	No Cumple
4.9622	0.0000	1.8750	3.7500	9.1948	-4.2326	No Cumple
4.9622	0.0000	0.9375	1.8750	7.6026	-2.6404	No Cumple
4.9622	0.0000	0.4688	0.9375	6.4782	-1.5160	No Cumple
4.9622	0.0000	0.2344	0.4688	5.7717	-0.8096	No Cumple
4.9622	0.0000	0.1172	0.2344	5.3663	-0.4041	No Cumple
4.9622	0.0000	0.0586	0.1172	5.1474	-0.1852	No Cumple
4.9622	0.0000	0.0293	0.0586	5.0333	-0.0711	No Cumple
4.9622	0.0000	0.0146	0.0293	4.9750	-0.0128	No Cumple
4.9622	0.0000	0.0073	0.0146	4.9456	0.0166	No Cumple
4.9622	0.0073	0.0110	0.0146	4.9603	0.0019	No Cumple
4.9622	0.0110	0.0128	0.0146	4.9677	-0.0055	No Cumple
4.9622	0.0110	0.0119	0.0128	4.9640	-0.0018	No Cumple
4.9622	0.0110	0.0114	0.0119	4.9622	0.0000	Cumple

Cálculo de número estructural para la base estabilizada con cemento (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9622	0.0000	7.5000	15.0000	9.7147	-4.7525	No Cumple
4.9622	0.0000	3.7500	7.5000	7.4219	-2.4597	No Cumple
4.9622	0.0000	1.8750	3.7500	5.4614	-0.4992	No Cumple
4.9622	0.0000	0.9375	1.8750	3.8692	1.0930	No Cumple
4.9622	0.9375	1.4063	1.8750	4.7460	0.2161	No Cumple
4.9622	1.4063	1.6406	1.8750	5.1204	-0.1582	No Cumple
4.9622	1.4063	1.5234	1.6406	4.9378	0.0244	No Cumple
4.9622	1.5234	1.5820	1.6406	5.0302	-0.0680	No Cumple
4.9622	1.5234	1.5527	1.5820	4.9843	-0.0221	No Cumple
4.9622	1.5234	1.5381	1.5527	4.9611	0.0011	No Cumple
4.9622	1.5381	1.5454	1.5527	4.9727	-0.0105	No Cumple
4.9622	1.5381	1.5417	1.5454	4.9669	-0.0047	No Cumple
4.9622	1.5381	1.5399	1.5417	4.9640	-0.0018	No Cumple
4.9622	1.5381	1.5390	1.5399	4.9625	-0.0003	Cumple
4.9622	1.5381	1.5385	1.5390	4.9618	0.0004	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9622	0.0000	7.5000	15.0000	8.0931	-3.1309	No Cumple
4.9622	0.0000	3.7500	7.5000	5.8002	-0.8381	No Cumple
4.9622	0.0000	1.8750	3.7500	3.8397	1.1224	No Cumple
4.9622	1.8750	2.8125	3.7500	4.9531	0.0090	No Cumple
4.9622	2.8125	3.2813	3.7500	5.4012	-0.4390	No Cumple
4.9622	2.8125	3.0469	3.2813	5.1842	-0.2220	No Cumple
4.9622	2.8125	2.9297	3.0469	5.0706	-0.1084	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8711	2.9297	5.0124	-0.0502	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8418	2.8711	4.9829	-0.0207	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8271	2.8418	4.9680	-0.0059	No Cumple
4.9622	2.8125	2.8198	2.8271	4.9606	0.0016	No Cumple
4.9622	2.8198	2.8235	2.8271	4.9643	-0.0021	No Cumple
4.9622	2.8198	2.8217	2.8235	4.9625	-0.0003	Cumple
4.9622	2.8198	2.8207	2.8217	4.9615	0.0007	Cumple

Apéndice 6. Diseño de pavimento rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en San Pablo.

Diseño De Pavimento Rígido AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	136 808
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.35
Índice de servicio inicial	4.5
Índice de servicio final	2
ΔPSI	2.5
Estadístico Z	-0.524

Propiedades del concreto hidráulico	
Resistencia a la compresión 28 días (psi)	3 627
Módulo de Elasticidad (psi)	3 432 777
Módulo de Ruptura (psi)	640

Coeficiente de drenaje	
Calidad	Bueno
Tiempo de exposición a niveles de humedad que se aproximan a la saturación (%)	30%
Cd	1

Coeficiente de transferencia de carga	
Tipo de espaldón	Asfalto
Utiliza dovelas	Si
Tipo de pavimento	JPCP
J	3.2

Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto (plg)	6
Espesor de sub-base supuesto (plg)	6
Módulo resiliente de la sub-rasante	3000
Módulo resiliente de la base mejorada con cemento	31000
Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante (pci)	190
Estrato rígido	No
Profundidad de estrato rígido (ft)	-
Módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido (pci)	190
Daño relativo	19.57
LS	1.5
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante corregido por potencial pérdida de soporte (pci)	36

Cálculo de espesor de losa (D)						
logW ₁₈ Total	D _{inicial}	D _{promedio}	D _{final}	logW ₁₈ Obt	log Total-log Obt	Condición
5.1361	0.0000	10.0000	20.0000	7.1877	-2.0516	No Cumple
5.1361	0.0000	5.0000	10.0000	5.2860	-0.1499	No Cumple
5.1361	0.0000	2.5000	5.0000	3.4930	1.6431	No Cumple
5.1361	2.5000	3.7500	5.0000	4.5295	0.6066	No Cumple
5.1361	3.7500	4.3750	5.0000	4.9337	0.2024	No Cumple
5.1361	4.3750	4.6875	5.0000	5.1156	0.0205	No Cumple
5.1361	4.6875	4.8438	5.0000	5.2022	-0.0661	No Cumple
5.1361	4.6875	4.7656	4.8438	5.1593	-0.0232	No Cumple
5.1361	4.6875	4.7266	4.7656	5.1376	-0.0014	No Cumple
5.1361	4.6875	4.7070	4.7266	5.1266	0.0095	No Cumple
5.1361	4.7070	4.7168	4.7266	5.1321	0.0040	No Cumple
5.1361	4.7168	4.7217	4.7266	5.1348	0.0013	No Cumple
5.1361	4.7217	4.7241	4.7266	5.1362	-0.0001	Cumple
5.1361	4.7217	4.7229	4.7241	5.1355	0.0006	Cumple
Espesor final de losa (in)				4.72		
Espesor redondeado (cm)				12		

Diseño De Acero de Refuerzo

Dovelas

Parámetros de diseño

Ec (psi)	3 432 777
f'c (psi)	3 627
h (in)	4.72
k (pci)	36
μ	0.15
kd (pci)	300000
Ea (psi)	2.90E+07
z (in)	0.2
Dovela #	5
Separación (cm)	30

Rigidez Relativa (in)	30.43
1.8 I (in)	54.77
Dovelas involucradas	4.64

Dovela	Distancia(in)	Rci	Pdi (lb)
1	0.00	1.00	1662.95
2	11.81	0.78	1304.32
3	23.62	0.57	945.68
4	35.43	0.35	587.05
Σ		2.71	

Cálculo de esfuerzos en la dovela crítica

I (in4)	0.01
β (in)	0.68
σ_b (psi)	3874.17
fb (psi)	4080.32
Esfuerzo aplicado < Esfuerzo de falla	Cumple

Barras de amarre longitudinal

Área de acero requerido por ft lineal

fa	1.5
fs (psi)	27000
h (in)	4.72
L' (in)	137.80
σ_c	0.0868
As (in2/in)	0.0031
As (in2/ft)	0.0377

Área de acero propuesta por ft lineal

Varilla #	4
Diámetro (in)	0.5
Separación (cm)	60
As (in2/ft)	0.098

Acero requerido < Acero propuesto **Cumple**

Apéndice 7. Diseño de pavimento flexible mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santa Bárbara.

Diseño De Pavimento Flexible AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	44 870
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.2
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.2
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_i	m_i
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base granular	28 000	0.13	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Sub-rasante	4 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN _i (in)	$h_{iTeórico}$ (in)	$h_{iTeórico}$ (cm)	$h_{iPropuesta}$ (cm)	SN _i requerido (in)	SN _i Total (in)
Carpeta asfáltica	1.013	2.292	5.821	6.000	1.013	1.044
Base granular	1.352	2.362	5.999	10.000	0.308	0.513
Sub-base	2.187	5.780	14.681	15.000	0.630	0.644
				31.000	1.950	2.201

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN ₁)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.6520	0.0000	5.0000	10.0000	8.9171	-4.2651	No Cumple
4.6520	0.0000	2.5000	5.0000	6.8603	-2.2084	No Cumple
4.6520	0.0000	1.2500	2.5000	5.1025	-0.4506	No Cumple
4.6520	0.0000	0.6250	1.2500	3.7840	0.8679	No Cumple
4.6520	0.6250	0.9375	1.2500	4.4975	0.1544	No Cumple
4.6520	0.9375	1.0938	1.2500	4.8116	-0.1596	No Cumple
4.6520	0.9375	1.0156	1.0938	4.6577	-0.0057	No Cumple
4.6520	0.9375	0.9766	1.0156	4.5784	0.0736	No Cumple
4.6520	0.9766	0.9961	1.0156	4.6182	0.0337	No Cumple
4.6520	0.9961	1.0059	1.0156	4.6380	0.0140	No Cumple
4.6520	1.0059	1.0107	1.0156	4.6478	0.0041	No Cumple
4.6520	1.0107	1.0132	1.0156	4.6527	-0.0008	No Cumple
4.6520	1.0107	1.0120	1.0132	4.6503	0.0017	No Cumple
4.6520	1.0120	1.0126	1.0132	4.6515	0.0004	Cumple
4.6520	1.0126	1.0129	1.0132	4.6521	-0.0002	Cumple

Cálculo de número estructural para la base granular (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.6520	0.0000	5.0000	10.0000	8.2882	-3.6362	No Cumple
4.6520	0.0000	2.5000	5.0000	6.2315	-1.5795	No Cumple
4.6520	0.0000	1.2500	2.5000	4.4736	0.1783	No Cumple
4.6520	1.2500	1.8750	2.5000	5.4575	-0.8055	No Cumple
4.6520	1.2500	1.5625	1.8750	4.9974	-0.3454	No Cumple
4.6520	1.2500	1.4063	1.5625	4.7444	-0.0925	No Cumple
4.6520	1.2500	1.3281	1.4063	4.6114	0.0406	No Cumple
4.6520	1.3281	1.3672	1.4063	4.6785	-0.0265	No Cumple
4.6520	1.3281	1.3477	1.3672	4.6451	0.0069	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3574	1.3672	4.6618	-0.0099	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3525	1.3574	4.6535	-0.0015	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3501	1.3525	4.6493	0.0027	No Cumple
4.6520	1.3501	1.3513	1.3525	4.6514	0.0006	Cumple
4.6520	1.3513	1.3519	1.3525	4.6524	-0.0005	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.6520	0.0000	5.0000	10.0000	7.0751	-2.4232	No Cumple
4.6520	0.0000	2.5000	5.0000	5.0184	-0.3664	No Cumple
4.6520	0.0000	1.2500	2.5000	3.2606	1.3914	No Cumple
4.6520	1.2500	1.8750	2.5000	4.2444	0.4076	No Cumple
4.6520	1.8750	2.1875	2.5000	4.6528	-0.0008	No Cumple
4.6520	1.8750	2.0313	2.1875	4.4544	0.1975	No Cumple
4.6520	2.0313	2.1094	2.1875	4.5550	0.0970	No Cumple
4.6520	2.1094	2.1484	2.1875	4.6042	0.0477	No Cumple
4.6520	2.1484	2.1680	2.1875	4.6286	0.0234	No Cumple
4.6520	2.1680	2.1777	2.1875	4.6407	0.0113	No Cumple
4.6520	2.1777	2.1826	2.1875	4.6467	0.0052	No Cumple
4.6520	2.1826	2.1851	2.1875	4.6498	0.0022	No Cumple
4.6520	2.1851	2.1863	2.1875	4.6513	0.0007	Cumple
4.6520	2.1863	2.1869	2.1875	4.6520	-0.0001	Cumple

Apéndice 8. Diseño de pavimento semi-rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santa Bárbara.

Diseño De Pavimento Semi-Rígido AASHTO 1993

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	44 870
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.3
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.3
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_i	m_i
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base estabilizada con cemen	610 000	0.16	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Sub-rasante	4 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN_i (in)	$h_{iTeórico}$ (in)	$h_{iTeórico}$ (cm)	$h_{iPropuesto}$ (cm)	SN_i requerido (in)	SN_i Total (in)
Carpeta asfáltica	0.000	0.000	0.000	5.000	0.000	0.870
Base estabilizada con cemen	1.351	3.043	7.730	15.000	0.481	0.933
Sub-base	2.182	3.478	8.833	15.000	0.379	0.644
				35.000	0.860	2.447

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN_1)						
$\log W_{18}$ Total	$SN_{inicial}$	$SN_{promedio}$	SN_{final}	$\log W_{18}$ Obt	$\log Tot - \log Obt$	Condición
4.6520	0.0000	7.5000	15.0000	13.4481	-8.7962	No Cumple
4.6520	0.0000	3.7500	7.5000	11.1553	-6.5033	No Cumple
4.6520	0.0000	1.8750	3.7500	9.1948	-4.5428	No Cumple
4.6520	0.0000	0.9375	1.8750	7.6026	-2.9507	No Cumple
4.6520	0.0000	0.4688	0.9375	6.4782	-1.8262	No Cumple
4.6520	0.0000	0.2344	0.4688	5.7717	-1.1198	No Cumple
4.6520	0.0000	0.1172	0.2344	5.3663	-0.7144	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0586	0.1172	5.1474	-0.4954	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0293	0.0586	5.0333	-0.3813	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0146	0.0293	4.9750	-0.3231	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0073	0.0146	4.9456	-0.2936	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0037	0.0073	4.9308	-0.2788	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0018	0.0037	4.9234	-0.2714	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0009	0.0018	4.9196	-0.2677	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0005	0.0009	4.9178	-0.2658	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0002	0.0005	4.9169	-0.2649	No Cumple
4.6520	0.0000	0.0001	0.0002	4.9164	-0.2644	No Cumple

Cálculo de número estructural para la base estabilizada con cemento (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.6520	0.0000	7.5000	15.0000	9.7147	-5.0627	No Cumple
4.6520	0.0000	3.7500	7.5000	7.4219	-2.7699	No Cumple
4.6520	0.0000	1.8750	3.7500	5.4614	-0.8094	No Cumple
4.6520	0.0000	0.9375	1.8750	3.8692	0.7828	No Cumple
4.6520	0.9375	1.4063	1.8750	4.7460	-0.0941	No Cumple
4.6520	0.9375	1.1719	1.4063	4.3318	0.3201	No Cumple
4.6520	1.1719	1.2891	1.4063	4.5444	0.1076	No Cumple
4.6520	1.2891	1.3477	1.4063	4.6465	0.0054	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3770	1.4063	4.6966	-0.0446	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3623	1.3770	4.6716	-0.0197	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3550	1.3623	4.6591	-0.0071	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3513	1.3550	4.6528	-0.0009	No Cumple
4.6520	1.3477	1.3495	1.3513	4.6497	0.0023	No Cumple
4.6520	1.3495	1.3504	1.3513	4.6512	0.0007	Cumple
4.6520	1.3504	1.3509	1.3513	4.6520	-0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.6520	0.0000	7.5000	15.0000	8.5016	-3.8497	No Cumple
4.6520	0.0000	3.7500	7.5000	6.2088	-1.5568	No Cumple
4.6520	0.0000	1.8750	3.7500	4.2483	0.4037	No Cumple
4.6520	1.8750	2.8125	3.7500	5.3617	-0.7097	No Cumple
4.6520	1.8750	2.3438	2.8125	4.8482	-0.1963	No Cumple
4.6520	1.8750	2.1094	2.3438	4.5606	0.0913	No Cumple
4.6520	2.1094	2.2266	2.3438	4.7073	-0.0553	No Cumple
4.6520	2.1094	2.1680	2.2266	4.6347	0.0172	No Cumple
4.6520	2.1680	2.1973	2.2266	4.6712	-0.0192	No Cumple
4.6520	2.1680	2.1826	2.1973	4.6530	-0.0010	No Cumple
4.6520	2.1680	2.1753	2.1826	4.6439	0.0081	No Cumple
4.6520	2.1753	2.1790	2.1826	4.6484	0.0035	No Cumple
4.6520	2.1790	2.1808	2.1826	4.6507	0.0012	No Cumple
4.6520	2.1808	2.1817	2.1826	4.6519	0.0001	Cumple
4.6520	2.1817	2.1822	2.1826	4.6524	-0.0005	Cumple

Apéndice 9. Diseño de pavimento rígido mediante la metodología AASHTO 93 para el tramo en Santa Bárbara.

Diseño De Pavimento Rígido AASHTO 1993						
Parámetros de diseño			Propiedades del concreto hidráulico			
Ejes equivalentes de diseño	66 970		Resistencia a la compresión 28 días (psi)	3 627		
Nivel de confianza (%)	70		Módulo de Elasticidad (psi)	3 432 777		
Desviación estándar de desempeño	0.35		Módulo de Ruptura (psi)	640		
Índice de servicio inicial	4.5					
Índice de servicio final	2					
ΔPSI	2.5					
Estadístico Z	-0.524					
Coefficiente de drenaje			Coefficiente de transferencia de carga			
Calidad	Bueno		Tipo de espaldón	Asfalto		
Tiempo de exposición a niveles de humedad que se aproximan a la saturación (%)	30%		Utiliza dovelas	Si		
Cd	1		Tipo de pavimento	JPCP		
			J	3.2		
Módulo de reacción de la sub-rasante						
Espesor de losa supuesto (plg)						6
Espesor de base supuesto (plg)						6
Módulo resiliente de la sub-rasante						4500
Módulo resiliente de la base mejorada con cemento						31000
Módulo de reacción compuesto de la sub-rasante (pci)						265
Estrato rígido						No
Profundidad de estrato rígido (ft)						0
Módulo de reacción de la sub-rasante corregido por estrato rígido (pci)						265
Daño relativo						16.25
LS						1.5
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante corregido por potencial pérdida de soporte (pci)						46
Cálculo de espesor de losa (D)						
logW ₁₈ Total	D _{inicial}	D _{promedio}	D _{final}	logW ₁₈ Obt	log Total-log Obt	Condición
4.8259	0.0000	10.0000	20.0000	7.2104	-2.3845	No Cumple
4.8259	0.0000	5.0000	10.0000	5.3315	-0.5056	No Cumple
4.8259	0.0000	2.5000	5.0000	3.6067	1.2192	No Cumple
4.8259	2.5000	3.7500	5.0000	4.5933	0.2326	No Cumple
4.8259	3.7500	4.3750	5.0000	4.9867	-0.1608	No Cumple
4.8259	3.7500	4.0625	4.3750	4.7967	0.0292	No Cumple
4.8259	4.0625	4.2188	4.3750	4.8933	-0.0674	No Cumple
4.8259	4.0625	4.1406	4.2188	4.8454	-0.0195	No Cumple
4.8259	4.0625	4.1016	4.1406	4.8211	0.0048	No Cumple
4.8259	4.1016	4.1211	4.1406	4.8333	-0.0074	No Cumple
4.8259	4.1016	4.1113	4.1211	4.8272	-0.0013	No Cumple
4.8259	4.1016	4.1064	4.1113	4.8242	0.0017	No Cumple
4.8259	4.1064	4.1089	4.1113	4.8257	0.0002	Cumple
4.8259	4.1089	4.1101	4.1113	4.8264	-0.0006	Cumple
Espesor final de losa (in)				4.11		
Espesor redondeado (cm)				10.5		

Diseño De Acero de Refuerzo

Dovelas

Parámetros de diseño	
Ec (psi)	3 432 777
f'c (psi)	3 627
h (in)	4.11
k (pci)	46
μ	0.15
kd (pci)	300000
Ea (psi)	2.90E+07
z (in)	0.2
Dovela #	6
Separación (cm)	30

Rigidez Relativa (in)	25.78
1.8 I (in)	46.40
Dovelas involucradas	3.93

Dovela	Distancia(in)	Rci	Pdi (lb)
1	0.00	1.00	2012.23
2	11.81	0.75	1500.00
3	23.62	0.49	987.77
	Σ	2.24	

Cálculo de esfuerzos en la dovela crítica	
I (in ⁴)	0.02
β (in)	0.59
σ_c (psi)	3379.51
fb (psi)	3929.20
Esfuerzo aplicado < Esfuerzo de falla	Cumple

Barras de amarre longitudinal

Área de acero requerido por ft lineal	
fa	1.5
fs (psi)	27000
h (in)	4.11
L' (in)	137.80
σ_c	0.0868
As (in ² /in)	0.0027
As (in ² /ft)	0.0328

Área de acero propuesta por ft lineal	
Varilla #	4
Diámetro (in)	0.5
Separación (cm)	60
As (in ² /ft)	0.098

Acero requerido < Acero propuesto Cumple

Diseño de la estructura de pavimento con material de préstamo

Santo Domingo

Apéndice 10. Diseño de pavimento flexible con material de préstamo para el tramo en Santo Domingo.

Diseño de pavimento flexible AASHTO 1993 con material de préstamo

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	83 697
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.2
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.2
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_i	m_i
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base granular	28 000	0.13	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Material de sustitución	10 000	0.08	1
Sub-rasante	1 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN_i (in)	$h_{iTeórico}$ (in)	$h_{iTeórico}$ (cm)	$h_{iPropuesto}$ (cm)	$SN_{irequerido}$ (in)	SN_{iTotal} (in)
Carpeta asfáltica	1.152	2.607	6.622	7.000	1.152	1.218
Base granular	1.515	2.282	5.796	10.000	0.297	0.513
Sub-base	1.785	0.499	1.267	15.000	0.054	0.644
Material sustitución	3.561	14.837	37.685	40.000	1.187	1.260
				72.000	2.691	3.634

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN_1)						
$\log W_{18}$ Total	$SN_{inicial}$	$SN_{promedio}$	SN_{final}	$\log W_{18}$ Obt	$\log Tot - \log Obt$	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.9171	-3.9944	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.8603	-1.9376	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	5.1025	-0.1798	No Cumple
4.9227	0.0000	0.6250	1.2500	3.7840	1.1387	No Cumple
4.9227	0.6250	0.9375	1.2500	4.4975	0.4252	No Cumple
4.9227	0.9375	1.0938	1.2500	4.8116	0.1111	No Cumple
4.9227	1.0938	1.1719	1.2500	4.9597	-0.0370	No Cumple
4.9227	1.0938	1.1328	1.1719	4.8864	0.0364	No Cumple
4.9227	1.1328	1.1523	1.1719	4.9232	-0.0005	No Cumple
4.9227	1.1328	1.1426	1.1523	4.9048	0.0179	No Cumple
4.9227	1.1426	1.1475	1.1523	4.9140	0.0087	No Cumple
4.9227	1.1475	1.1499	1.1523	4.9186	0.0041	No Cumple
4.9227	1.1499	1.1511	1.1523	4.9209	0.0018	No Cumple
4.9227	1.1511	1.1517	1.1523	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.1517	1.1520	1.1523	4.9226	0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para la base granular (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.2882	-3.3655	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.2315	-1.3088	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.4736	0.4491	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.4575	-0.5347	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.9974	-0.0747	No Cumple
4.9227	1.2500	1.4063	1.5625	4.7444	0.1783	No Cumple
4.9227	1.4063	1.4844	1.5625	4.8730	0.0497	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5234	1.5625	4.9357	-0.0130	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5039	1.5234	4.9045	0.0182	No Cumple
4.9227	1.5039	1.5137	1.5234	4.9201	0.0026	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5186	1.5234	4.9279	-0.0052	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5161	1.5186	4.9240	-0.0013	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5149	1.5161	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.5149	1.5155	1.5161	4.9231	-0.0003	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	7.8797	-2.9570	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	5.8229	-0.9002	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.0651	0.8576	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.0489	-0.1262	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.5889	0.3338	No Cumple
4.9227	1.5625	1.7188	1.8750	4.8260	0.0967	No Cumple
4.9227	1.7188	1.7969	1.8750	4.9392	-0.0164	No Cumple
4.9227	1.7188	1.7578	1.7969	4.8830	0.0397	No Cumple
4.9227	1.7578	1.7773	1.7969	4.9112	0.0115	No Cumple
4.9227	1.7773	1.7871	1.7969	4.9252	-0.0025	No Cumple
4.9227	1.7773	1.7822	1.7871	4.9182	0.0045	No Cumple
4.9227	1.7822	1.7847	1.7871	4.9217	0.0010	No Cumple
4.9227	1.7847	1.7859	1.7871	4.9235	-0.0007	Cumple
4.9227	1.7847	1.7853	1.7859	4.9226	0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para material de sustitución (SN₄)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	5.9682	-1.0455	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	3.9115	1.0112	No Cumple
4.9227	2.5000	3.7500	5.0000	5.0756	-0.1529	No Cumple
4.9227	2.5000	3.1250	3.7500	4.5420	0.3807	No Cumple
4.9227	3.1250	3.4375	3.7500	4.8186	0.1041	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5938	3.7500	4.9493	-0.0266	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5156	3.5938	4.8845	0.0382	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5547	3.5938	4.9171	0.0057	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5742	3.5938	4.9332	-0.0105	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5645	3.5742	4.9251	-0.0024	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5596	3.5645	4.9211	0.0016	No Cumple
4.9227	3.5596	3.5620	3.5645	4.9231	-0.0004	Cumple
4.9227	3.5596	3.5608	3.5620	4.9221	0.0006	Cumple

Apéndice 11. Diseño de pavimento flexible con material de préstamo y sin considerar sub-base para el tramo en Santo Domingo.

Diseño de pavimento flexible AASHTO 1993 con material de préstamo

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	83 697
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.2
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.2
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_i	m_i
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base granular	28 000	0.13	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Material de sustitución	10 000	0.08	1
Sub-rasante	1 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN_i (in)	$h_{iTeórico}$ (in)	$h_{iTeórico}$ (cm)	$h_{iPropuesto}$ (cm)	SN_i requerido (in)	SN_i Total (in)
Carpeta asfáltica	1.152	2.607	6.622	7.000	1.152	1.218
Base granular	1.515	2.281	5.794	10.000	0.297	0.513
Sub-base	1.785	0.499	1.267	0.000	0.054	0.000
Material sustitución	3.561	22.881	58.117	60.000	1.830	1.890
				77.000	3.334	3.621

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN_1)						
$\log W_{18}$ Total	$SN_{inicial}$	$SN_{promedio}$	SN_{final}	$\log W_{18}$ Obt	$\log Tot - \log Obt$	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.9171	-3.9944	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.8603	-1.9376	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	5.1025	-0.1798	No Cumple
4.9227	0.0000	0.6250	1.2500	3.7840	1.1387	No Cumple
4.9227	0.6250	0.9375	1.2500	4.4975	0.4252	No Cumple
4.9227	0.9375	1.0938	1.2500	4.8116	0.1111	No Cumple
4.9227	1.0938	1.1719	1.2500	4.9597	-0.0370	No Cumple
4.9227	1.0938	1.1328	1.1719	4.8864	0.0364	No Cumple
4.9227	1.1328	1.1523	1.1719	4.9232	-0.0005	No Cumple
4.9227	1.1328	1.1426	1.1523	4.9048	0.0179	No Cumple
4.9227	1.1426	1.1475	1.1523	4.9140	0.0087	No Cumple
4.9227	1.1475	1.1499	1.1523	4.9186	0.0041	No Cumple
4.9227	1.1499	1.1511	1.1523	4.9209	0.0018	No Cumple
4.9227	1.1511	1.1517	1.1523	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.1517	1.1520	1.1523	4.9226	0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para la base granular (SN₂)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.2882	-3.3655	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.2315	-1.3088	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.4736	0.4491	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.4575	-0.5347	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.9974	-0.0747	No Cumple
4.9227	1.2500	1.4063	1.5625	4.7444	0.1783	No Cumple
4.9227	1.4063	1.4844	1.5625	4.8730	0.0497	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5234	1.5625	4.9357	-0.0130	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5039	1.5234	4.9045	0.0182	No Cumple
4.9227	1.5039	1.5137	1.5234	4.9201	0.0026	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5186	1.5234	4.9279	-0.0052	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5161	1.5186	4.9240	-0.0013	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5149	1.5161	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.5149	1.5155	1.5161	4.9231	-0.0003	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	7.8797	-2.9570	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	5.8229	-0.9002	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.0651	0.8576	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.0489	-0.1262	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.5889	0.3338	No Cumple
4.9227	1.5625	1.7188	1.8750	4.8260	0.0967	No Cumple
4.9227	1.7188	1.7969	1.8750	4.9392	-0.0164	No Cumple
4.9227	1.7188	1.7578	1.7969	4.8830	0.0397	No Cumple
4.9227	1.7578	1.7773	1.7969	4.9112	0.0115	No Cumple
4.9227	1.7773	1.7871	1.7969	4.9252	-0.0025	No Cumple
4.9227	1.7773	1.7822	1.7871	4.9182	0.0045	No Cumple
4.9227	1.7822	1.7847	1.7871	4.9217	0.0010	No Cumple
4.9227	1.7847	1.7859	1.7871	4.9235	-0.0007	Cumple
4.9227	1.7847	1.7853	1.7859	4.9226	0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para material de sustitución (SN₄)						
logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	5.9682	-1.0455	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	3.9115	1.0112	No Cumple
4.9227	2.5000	3.7500	5.0000	5.0756	-0.1529	No Cumple
4.9227	2.5000	3.1250	3.7500	4.5420	0.3807	No Cumple
4.9227	3.1250	3.4375	3.7500	4.8186	0.1041	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5938	3.7500	4.9493	-0.0266	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5156	3.5938	4.8845	0.0382	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5547	3.5938	4.9171	0.0057	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5742	3.5938	4.9332	-0.0105	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5645	3.5742	4.9251	-0.0024	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5596	3.5645	4.9211	0.0016	No Cumple
4.9227	3.5596	3.5620	3.5645	4.9231	-0.0004	Cumple
4.9227	3.5596	3.5608	3.5620	4.9221	0.0006	Cumple

Apéndice 12. Diseño de pavimento semi-rígido con material de préstamo y sin considerar sub-base para el tramo en Santo Domingo.

Diseño de pavimento Semi-Rígido AASHTO 1993 con material de préstamo

Parámetros de diseño	
Ejes equivalentes de diseño	83 697
Nivel de confianza (%)	70
Desviación estándar de desempeño	0.45
Índice de servicio inicial	4.2
Índice de servicio final	2.0
Δ PSI	2.2
Estadístico Z	-0.524

Propiedades de los materiales en la estructura de pavimento			
Material	MR (psi)	a_1	m_1
Carpeta asfáltica	450 000	0.44	-
Base estabilizada con cemento	610 000	0.16	1
Sub-base	15 000	0.11	1
Material de sustitución	10 000	0.08	1
Sub-rasante	1 500	-	-

Espesores y números estructurales						
Material	SN_1 (in)	$h_{Teórico}$ (in)	$h_{Teórico}$ (cm)	$h_{Propuesto}$ (cm)	$SN_{Requerido}$ (in)	SN_{Total} (in)
Carpeta asfáltica	0.002	0.004	0.009	5.000	0.002	0.870
Base estabilizada cemento	1.515	4.084	10.374	15.000	0.645	0.933
Sub-base	1.785	-0.162	-0.411	0.000	-0.018	0.000
Material sustitución	3.561	21.973	55.811	56.000	1.758	1.764
				76.000	2.387	3.567

Cumple

Cálculo de número estructural para la carpeta asfáltica (SN_1)						
$\log W_{18}$ Total	$SN_{Inicial}$	$SN_{Promedio}$	SN_{Final}	$\log W_{18}$ Obt	$\log Tot - \log Obt$	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	12.0216	-7.0989	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	9.9649	-5.0422	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	8.2071	-3.2844	No Cumple
4.9227	0.0000	0.6250	1.2500	6.8886	-1.9659	No Cumple
4.9227	0.0000	0.3125	0.6250	6.0211	-1.0984	No Cumple
4.9227	0.0000	0.1563	0.3125	5.5060	-0.5833	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0781	0.1563	5.2216	-0.2989	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0391	0.0781	5.0717	-0.1489	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0195	0.0391	4.9945	-0.0718	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0098	0.0195	4.9554	-0.0327	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0049	0.0098	4.9357	-0.0130	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0024	0.0049	4.9258	-0.0031	No Cumple
4.9227	0.0000	0.0012	0.0024	4.9209	0.0018	No Cumple
4.9227	0.0012	0.0018	0.0024	4.9233	-0.0006	Cumple
4.9227	0.0012	0.0015	0.0018	4.9221	0.0006	Cumple

Cálculo de número estructural para la base estabilizada con cemento (SN₂)

logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	8.2882	-3.3655	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	6.2315	-1.3088	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.4736	0.4491	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.4575	-0.5347	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.9974	-0.0747	No Cumple
4.9227	1.2500	1.4063	1.5625	4.7444	0.1783	No Cumple
4.9227	1.4063	1.4844	1.5625	4.8730	0.0497	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5234	1.5625	4.9357	-0.0130	No Cumple
4.9227	1.4844	1.5039	1.5234	4.9045	0.0182	No Cumple
4.9227	1.5039	1.5137	1.5234	4.9201	0.0026	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5186	1.5234	4.9279	-0.0052	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5161	1.5186	4.9240	-0.0013	No Cumple
4.9227	1.5137	1.5149	1.5161	4.9221	0.0006	Cumple
4.9227	1.5149	1.5155	1.5161	4.9231	-0.0003	Cumple

Cálculo de número estructural para la sub-base (SN₃)

logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	7.8797	-2.9570	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	5.8229	-0.9002	No Cumple
4.9227	0.0000	1.2500	2.5000	4.0651	0.8576	No Cumple
4.9227	1.2500	1.8750	2.5000	5.0489	-0.1262	No Cumple
4.9227	1.2500	1.5625	1.8750	4.5889	0.3338	No Cumple
4.9227	1.5625	1.7188	1.8750	4.8260	0.0967	No Cumple
4.9227	1.7188	1.7969	1.8750	4.9392	-0.0164	No Cumple
4.9227	1.7188	1.7578	1.7969	4.8830	0.0397	No Cumple
4.9227	1.7578	1.7773	1.7969	4.9112	0.0115	No Cumple
4.9227	1.7773	1.7871	1.7969	4.9252	-0.0025	No Cumple
4.9227	1.7773	1.7822	1.7871	4.9182	0.0045	No Cumple
4.9227	1.7822	1.7847	1.7871	4.9217	0.0010	No Cumple
4.9227	1.7847	1.7859	1.7871	4.9235	-0.0007	Cumple
4.9227	1.7847	1.7853	1.7859	4.9226	0.0001	Cumple

Cálculo de número estructural para material de sustitución (SN₄)

logW ₁₈ Total	SN _{inicial}	SN _{promedio}	SN _{final}	logW ₁₈ Obt	logTot-logObt	Condición
4.9227	0.0000	5.0000	10.0000	5.9682	-1.0455	No Cumple
4.9227	0.0000	2.5000	5.0000	3.9115	1.0112	No Cumple
4.9227	2.5000	3.7500	5.0000	5.0756	-0.1529	No Cumple
4.9227	2.5000	3.1250	3.7500	4.5420	0.3807	No Cumple
4.9227	3.1250	3.4375	3.7500	4.8186	0.1041	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5938	3.7500	4.9493	-0.0266	No Cumple
4.9227	3.4375	3.5156	3.5938	4.8845	0.0382	No Cumple
4.9227	3.5156	3.5547	3.5938	4.9171	0.0057	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5742	3.5938	4.9332	-0.0105	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5645	3.5742	4.9251	-0.0024	No Cumple
4.9227	3.5547	3.5596	3.5645	4.9211	0.0016	No Cumple
4.9227	3.5596	3.5620	3.5645	4.9231	-0.0004	Cumple
4.9227	3.5596	3.5608	3.5620	4.9221	0.0006	Cumple

Apéndice 13. Deterioros presentes en la superficie de rodadura del tramo en Santo Domingo.



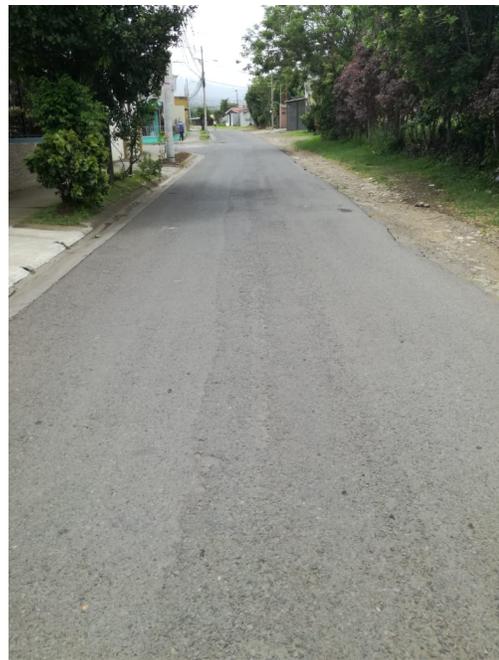
(a) Cuero de lagarto.



(b) Grieta longitudinal.



(c) Pulimiento.



(d) Desgaste superficial.



(e) Bache.



(f) Huecos.

Apéndice 14. Límite entre el cantón de Santo Domingo y San Pablo.



Apéndice 15. Ubicación de contadores vehiculares en el tramo de Santo Domingo y de San Pablo.



Anexos

1.	Tránsito promedio diario determinado con el contador vehicular MetroCount para el tramo en Santo Domingo que se decidió no intervenir.	153
2.	Tránsito promedio diario determinado con el contador vehicular MetroCount para el tramo a intervenir en Santo Domingo.	153
3.	Tránsito promedio diario determinado con el contador vehicular MetroCount para el tramo en San Pablo.	154
4.	Estimación del tránsito promedio diario realizada por la municipalidad de Santa Bárbara.	154
5.	Promedios mensuales de datos climáticos de la estación 84 121 TIBAS del Instituto Meteorológico Nacional.	155
6.	Promedios mensuales de datos climáticos de la estación 84 141 ARANJUEZ del Instituto Meteorológico Nacional.	155
7.	Características del material de sub-base que, usualmente, se emplea en la municipalidad de San Pablo.	156
8.	Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 1+130 en el tramo de Santo Domingo.	157
9.	Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 0+700 en el tramo de San Pablo.	158
10.	Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 0+700 en el tramo de San Pablo.	159
11.	Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 0+500 en el tramo de Santa Bárbara.	160
12.	Estructura de costos del proyecto: Rehabilitación del Sistema de drenaje y de la superficie de Ruedo del Camino 4-04-0.15 Calle Viquez, ubicado en Santa Bárbara de Heredia.	161
13.	Sumario de cantidades con precios unitarios para el proyecto: Rehabilitación del Sistema de drenaje y de la superficie de Ruedo del Camino 4-04-0.15 Calle Viquez.	162

Anexo 1. Tránsito promedio diario determinado con el contador vehicular MetroCount para el tramo en Santo Domingo que se decidió no intervenir.

Clases Diarias

ClasDiarias-168
Sitio: Calle Barro de Olla.0.1NS
Descripción: Proyecto María Fernanda Cerdas
Hora del Filtro: 12:00 lunes, 09 de julio de 2018 => 11:06 viernes, 13 de julio de 2018
Esquema: Clasificación Vehicular (VRX)
Filtro: Cls(1-12, 14-15) Sentido(NESO) Vel.(10,160) Intervalo Vehicular(>0) Span#(0 - 100) Carril(0-16)

lunes, 09 de julio de 2018															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	Total
lun*	1448	3	30	4	0	0	1	0	0	0	0	0	94	2	1582
(%)	91,5	0,2	1,9	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,1	
mar	2542	12	57	4	5	0	0	0	1	0	0	0	200	3	2824
(%)	90,0	0,4	2,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	0,1	
mié	2463	3	66	5	1	0	0	0	1	0	0	0	154	4	2697
(%)	91,3	0,1	2,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	0,1	
jue	2477	0	77	6	5	0	0	1	0	0	0	0	197	5	2768
(%)	89,5	0,0	2,8	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	0,2	
vie*	714	2	17	3	2	0	0	0	0	0	0	0	44	2	784
(%)	91,1	0,3	2,2	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	0,3	
sáb*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
dom*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Anexo 2. Tránsito promedio diario determinado con el contador vehicular MetroCount para el tramo a intervenir en Santo Domingo.

Clases Diarias

ClasDiarias-208
Sitio: Barro de Olla - San Vicente.0.1EO
Descripción: Proyecto María Fernanda Cerdas
Hora del Filtro: 12:00 lunes, 09 de julio de 2018 => 10:36 viernes, 13 de julio de 2018
Esquema: Clasificación Vehicular (VRX)
Filtro: Cls(1-12, 14-15) Sentido(NESO) Vel.(10,160) Intervalo Vehicular(>0) Span#(0 - 100) Carril(0-16)

lunes, 09 de julio de 2018															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	Total
lun*	208	0	3	12	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	251
(%)	82,9	0,0	1,2	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,2	0,0	
mar	402	1	20	11	0	0	0	0	0	0	0	0	49	7	490
(%)	82,0	0,2	4,1	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	1,4	
mié	413	0	13	9	0	0	0	0	0	0	0	0	39	4	478
(%)	86,4	0,0	2,7	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,2	0,8	
jue	362	1	20	32	2	0	0	0	0	0	0	0	58	6	481
(%)	75,3	0,2	4,2	6,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,1	1,2	
vie*	121	0	3	9	0	0	0	0	0	0	0	0	23	1	157
(%)	77,1	0,0	1,9	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,6	0,6	
sáb*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
dom*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Anexo 3. Tránsito promedio diario determinado con el contador vehicular MetroCount para el tramo en San Pablo.

Clases Diarias

ClasDiarias-212
Sitio: Barrio Las Cruces.0.1EO
Descripción: Proyecto María Fernanda Cerdas
Hora del Filtro: 12:00 lunes, 16 de julio de 2018 => 09:44 jueves, 19 de julio de 2018
Esquema: Clasificación Vehicular (VRX)
Filtro: Cls(1-12, 14-15) Sentido(NESO) Vel.(10,160) Intervalo Vehicular(>0) Span#(0 - 100) Carril(0-16)

lunes, 16 de julio de 2018															Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	
lun*	166	0	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	30	1	213
(%)	77,9	0,0	7,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,1	0,5	
mar	301	0	44	4	0	0	0	0	0	0	0	0	70	2	421
(%)	71,5	0,0	10,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,6	0,5	
mié	273	1	74	5	1	0	0	0	0	0	0	0	51	10	415
(%)	65,8	0,2	17,8	1,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,3	2,4	
jue*	86	0	44	3	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1	143
(%)	60,1	0,0	30,8	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3	0,7	
vie*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
sáb*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
dom*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Anexo 4. Estimación del tránsito promedio diario realizada por la municipalidad de Santa Bárbara.

Estimación del TPD _a del Camino 4-04-009						
AÑO	TPD Ruta 123	CLASIFICACIÓN				
		% Automovil	% C. LIV.	% BUSES*	% 2 EJES	% 3 EJES
2006	8230	62,45	33,62	1,36	1,16	1,14
2007	9677	72,95	18,75	2,72	5,09	0,40
Σ	17907	135,4	52,37	4,08	6,25	1,54
TPD promedio	8954	68	26	2	3	1
Transito inducido para camino 4-04-009 (5% de TPD promedio)	448	318	99	9	18	4
* No se consideran buses, por lo tanto el TPD _a inducido sería 439						

Anexo 5. Promedios mensuales de datos climáticos de la estación 84 121 TIBAS del Instituto Meteorológico Nacional.

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
 (estaciones mecánicas)

ESTACION : 84 121 TIBAS		Latitud: 09 ° 57 ' N Longitud: 84 ° 04 ' O Altitud. 1162 m.s.n.m												
Elementos	Periodos	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
LLUVIA	1998 2017	8.8	7.2	13.4	47.6	231.9	255.3	171.6	208.7	341.5	318.7	138.6	30.8	1774.1
VIENTO DIR. PREDOMINANTE														
Promedio dias con lluvia >= 0.1 mm.		3	2	3	7	19	21	19	21	24	24	16	8	166.5
														Total.

Lluvia en milímetros: 1mm = 1 litro de agua por m². Radiación Solar global en Megajulios (MJ/m²)
 Temperatura en Grados Celsius (°C). Evaporación en mm. Viento en km/h. Humedad Relativa en Porcentaje (%).
 VIENTO DIR PREDOM : 1 Norte, 2 Noreste, 3 Este, 4 Sureste, 5 Sur, 6 Suroeste, 7 Oeste, 8 Noreste, 9 Variable
 Brillo Solar en horas y décimas de horas.

Anexo 6. Promedios mensuales de datos climáticos de la estación 84 141 ARANJUEZ del Instituto Meteorológico Nacional.

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
 (estaciones automáticas)

ESTACION : 84 141 IMN, ARANJUEZ		Latitud: 09 ° 56 ' N Longitud: 84 ° 04 ' O Altitud. 1181 m.s.n.m													
Elementos	Periodos	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1996 2017	9.8	11.5	10.6	48.8	245.2	243.9	175.8	209.4	325.5	298.7	141.5	34.1	146.3	1755.0
TEM. MAX	1996 2017	22.9	23.5	24.5	25.6	26.1	26.2	25.3	25.8	26.4	25.5	24.2	23.2	24.9	
TEM. MIN	1996 2017	16.3	16.4	16.8	17.6	18.1	18.1	18.0	17.9	17.6	17.6	17.3	16.8	17.4	
TEM. MED.	1996 2017	19.6	19.9	20.6	21.6	22.1	22.1	21.7	21.9	22.0	21.6	20.7	20.0	21.2	
HUMEDAD	1996 2017	74.3	73.2	72.2	72.7	78.1	79.3	77.6	78.0	80.0	81.3	79.3	76.1	76.8	
VIENTO VEL.	1996 2017	13.7	13.5	13.4	11.9	8.7	7.8	9.1	8.2	6.8	7.0	9.5	12.1	10.1	
RADIACION	1996 2017	12.9	14.8	17.0	17.0	13.3	11.4	11.6	12.4	12.5	11.3	9.8	10.9	12.9	
PRESION	1998 2018	882.5	882.6	882.4	882.2	882.2	882.3	882.5	882.3	882.3	882.0	881.8	882.3	882.3	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE															
Promedio dias con lluvia >= 0.1 mm.		4	3	3	8	20	21	20	22	24	25	18	8	177	
														Total	

Lluvia en milímetros: 1mm = 1 litro de agua por m². Radiación Solar global en Megajulios (MJ/m²)
 Temperatura en Grados Celsius (°C). Evaporación en mm. Viento en km/h. Humedad Relativa en Porcentaje (%).
 VIENTO DIR PREDOM : 1 Norte, 2 Noreste, 3 Este, 4 Sureste, 5 Sur, 6 Suroeste, 7 Oeste, 8 Noreste, 9 Variable
 Brillo Solar en horas y décimas de horas. Presión hPa.

Anexo 7. Características del material de sub-base que, usualmente, se emplea en la municipalidad de San Pablo.

	<p align="center">LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A</p> <p align="center">INFORME DE ENSAYO</p>	RC-36 V.19
		Aprobado: 2015-09-21
		Páginas 4 de 5
		N° Informe 1808-2015

Tabla 3
Método de ensayo para la relación Densidad-humedad de suelos
 (*) "Ensayo Acreditado"
 AASHTO T-180
 Método modificado

Parámetro	Resultado	Incididumbre al 95 % de confianza
Densidad Máxima (kg/m ³)	1958 kg/m ³	27,9
Humedad Optima (%)	9,1 %	1,48

Anexo 8. Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 1+130 en el tramo de Santo Domingo.

Informe de Ensayos en Subrasante				
Información General:				
MOPT, Subdirección de Geotecnia y Materiales Dpto. Pavimentos				
Proyecto:	Camino 4-03-023		Informe Número	
Solicitado por:	Ing. Hugo Chaves Gutiérrez		Fecha de Realización	12/03/2018
Oficio:				
Descripción de la muestra:				
Fuente de Materiales:	No indica.		Muestra Número:	
Ubicación de la Muestra:	Sto Domingo Heredia, Estación 1 + 130		Fecha Muestreo:	31/01/2018
Punto de muestreo:	De 0.0 a 1.94 metros		Hora Muestreo:	No indica.
Responsable del muestreo:			Fecha Recepción:	31/01/2018
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL				
78,2 mm (3")	T-27	09-02-18	-	100
50,2 mm (2")			-	100
38,1 mm (1 1/2")			-	100
25,4 mm (1")			-	100
19,0 mm (3/4")			-	100
12,5 mm (1/2")			-	100
9,5 mm (3/8")			-	100
No. 4 (4,75 mm)			-	100
No. 10 (2,00 mm)			-	100
No. 40 (425 µm)			-	99
No. 200 (75 µm)	T-11		-	91
CONSTANTES DEL AGREGADO				
Límite Líquido, %	T 89	15-02-18	-	51
Límite Plástico, %	T 90		-	33
Índice de Plasticidad, %	-		-	18
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	08-03-18	-	A-7-5 (38)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	OH o MH
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD				
Densidad Máxima (kg/m ³)	T 99	14-02-18	-	1161
Humedad Óptima, %	T 99		-	35
CAPACIDAD DE SOPORTE				
C.B.R., %	al 91%	01-03-18	-	1
	al 95%		T 193	-

Anexo 9. Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 0+700 en el tramo de San Pablo.

Informe de Ensayos en Subrasante				
Información General:				
MOPT, Subdirección de Geotecnia y Materiales Dpto. Pavimentos				
Proyecto:	Camino 4-09-008		Informe Número	
Solicitado por:	Ing. Hugo Chaves Gutiérrez		Fecha de Informe	13/04/2018
Oficio:				
Descripción de la muestra:				
Fuente de Materiales:	No indica.		Muestra Número:	
Ubicación de la Muestra:	San Pablo Heredia, Estación 0+700		Fecha Muestreo:	01/02/2018
Punto de muestreo:	De 0.36 a 1.64 metros		Hora Muestreo:	No indica.
Responsable del muestreo:			Fecha Recepción:	02/02/2018
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL				
76,2 mm (3")	T-27	23-02-18	-	100
50,2 mm (2")			-	100
38,1 mm (1 1/2")			-	100
25,4 mm (1")			-	100
19,0 mm (3/4")			-	100
12,5 mm (1/2")			-	100
9,5 mm (3/8")			-	100
No. 4 (4,75 mm)			-	100
No. 10 (2,00 mm)			-	100
No. 40 (425 µm)			-	99
No. 200 (75 µm)	T-11		-	91
CONSTANTES DEL AGREGADO				
Límite Líquido, %	T 89	03-04-18	-	54
Límite Plástico, %	T 90		-	31
Índice de Plasticidad, %	-		-	23
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	05-04-18	-	A-7-5 (25)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	OH o MH
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD				
Densidad Máxima (kg/m ³)	T 99	28-02-18	-	1197
Humedad Óptima, %	T 99		-	24
CAPACIDAD DE SOPORTE				
C.B.R., %	al 91%	08-03-18	-	2
	al 95%		-	-

Anexo 10. Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 0+700 en el tramo de San Pablo.

Informe de Ensayos en Material Granular				
Información General:				
MOPT, Subdirección de Geotecnia y Materiales Dpto. Pavimentos				
Proyecto:	Camino 4-09-008		Informe Número	
Solicitado por:	Ing. Hugo Chaves Gutiérrez		Fecha de Informe	18/04/2018
Oficio:				
Descripción de la muestra:				
Fuente de Materiales:	No indica.		Muestra Número:	
Ubicación de la Muestra:	San Pablo, Heredia		Fecha Muestreo:	01/02/2018
Punto de muestreo	En el camino, estación 0+700, Prof. de 0.0 a 0.36 metros		Hora Muestreo:	No indica.
Responsable del Muestreo:			Fecha Recepción:	02/02/2018
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL				
76,2 mm (3")	T 27	20-02-18	-	93
50,2 mm (2")			-	89
38,1 mm (1 1/2")			-	81
25,4 mm (1")			-	73
19,0 mm (3/4")			-	67
12,5 mm (1/2")			-	58
9,5 mm (3/8")			-	53
No. 4 (4,75 mm)			-	41
No. 10 (2,00 mm)			-	26
No. 40 (425 µm)			-	11
No. 200 (75 µm)			-	1.2
CONSTANTES DEL AGREGADO				
Límite Líquido, %	T 89	03-04-18	-	28
Límite Plástico, %	T 90		-	19
Índice de Plasticidad, %	-		-	9
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	05-04-18	-	A-2-4 (0)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	GW
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD				
Densidad Máxima (kg/m ³)	T 180	12-03-18	-	1905
Humedad Óptima, %	T 180		-	11
CAPACIDAD DE SOPORTE				
C.B.R., %	al 91%	15-03-18	-	-
	al 95%		-	27

Anexo 11. Informe con los resultados de los ensayos realizados por el MOPT para la estación 0+500 en el tramo de Santa Bárbara.

Informe de Ensayos en Subrasante				
Información General:				
MOPT, Subdirección de Geotecnia y Materiales Dpto. Pavimentos				
Proyecto:	Camino 4-04-009		Informe Número	
Solicitado por:	Ing. Hugo Chaves Gutiérrez		Fecha de Informe	18/06/2018
Oficio:				
Descripción de la muestra:				
Fuente de Materiales:	No indica.		Muestra Número:	
Ubicación de la Muestra:	Santa Bárbara Heredia, Estación 0+500		Fecha Muestreo:	19/04/2018
Punto de muestreo:	De 0.0 a 1.59 metros		Hora Muestreo:	No indica.
Responsable del muestreo:			Fecha Recepción:	20/04/2018
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL				
76,2 mm (3")	T-27	16-05-18	-	100
50,2 mm (2")			-	100
38,1 mm (1 1/2")			-	100
25,4 mm (1")			-	100
19,0 mm (3/4")			-	100
12,5 mm (1/2")			-	100
9,5 mm (3/8")			-	100
No. 4 (4,75 mm)			-	100
No. 10 (2,00 mm)			-	100
No. 40 (425 µm)			-	98
No. 200 (75 µm)	T-11		-	94
CONSTANTES DEL AGREGADO				
Límite Líquido, %	T 89	23-05-18	-	58
Límite Plástico, %	T 90		-	44
Índice de Plasticidad, %	-		-	14
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	30-05-18	-	A-7-5 (20)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	OH-MH
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD				
Densidad Máxima (kg/m ³)	T 99	23-05-18	-	1056
Humedad Óptima, %	T 99		-	32
CAPACIDAD DE SOPORTE				
C.B.R., %	al 91%	08-06-18	-	3
	al 95%		-	-

Anexo 12. Estructura de costos del proyecto: Rehabilitación del Sistema de drenaje y de la superficie de Ruedo del Camino 4-04-0.15 Calle Viquez, ubicado en Santa Bárbara de Heredia.

Estructuras de Costos														
Provincia: Heredia										Provincia: Heredia				
Región de pago	Descripción del región	Unidad de pago	Costos Fijos	Repuestos	Combustible	Lubricantes	Liantas	Mano de obra directa	Materiales	Mano de obra indirecta	Administración (overhead)	Imprevistos	Utilidad	TOTAL
CR.209.01 A	Excavación para otras estructuras, alcantarillas y obras de arte.	m ³	20.0%	12.4%	15.1%	2.4%	2.4%	27.7%	0.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.209.04 A	Relleno para estructuras, alcantarillas y obras de arte.	m ³	5.9%	3.5%	9.4%	1.3%	1.3%	11.9%	46.7%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.301.03	Base de agregados graduación C, caso 2	m ³	6.5%	3.8%	9.7%	1.5%	1.5%	5.7%	51.2%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.301.06	Subbase de agregados, graduación B, caso 2	m ³	6.5%	3.8%	9.7%	1.5%	1.5%	5.7%	51.2%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.303.01	Reacondicionamiento de subrasante y espaldones	km	18.7%	13.5%	25.6%	3.7%	2.0%	16.5%	0.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
PRVC-1.402	Capa de concreto asfáltico preparado en planta en caliente, diseñado por la metodología Marshall.	m ³	5.0%	1.0%	14.7%	1.9%	0.9%	6.7%	50.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.552.01	Concreto estructural clase A (25MPa)	m ³	3.6%	2.9%	5.5%	0.8%	0.6%	17.5%	49.1%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.602.01 (b)	Tubería de Concreto reforzado clase III - C 76, con diámetro de 800 mm	m	2.0%	1.0%	2.1%	0.4%	0.4%	5.3%	69.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.609.02	Cuneta y cordón de hormigón	m	3.9%	3.7%	7.7%	0.7%	0.8%	16.2%	47.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.633.01	Instalación de Señales verticales, tipo IV	Unidad	0.2%	0.2%	0.4%	0.1%	0.0%	7.9%	71.2%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.634.01 (b)	Señalización Línea continua amarilla, tipo A	m	2.9%	0.5%	9.6%	0.6%	0.3%	12.7%	53.4%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.634.02	Señalización tipo A	m ²	2.9%	0.5%	9.6%	0.6%	0.3%	12.7%	53.4%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.651.02 (e)	Tubería de concreto sin refuerzo 800 mm	m	2.0%	1.0%	2.1%	0.4%	0.4%	5.3%	69.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%
CR.608.01 (d)	Canal revestidos tipo IV, Concreto Hidráulico	m ²	3.9%	3.7%	7.7%	0.7%	0.8%	16.2%	47.0%	4.0%	4.0%	4.0%	8.0%	100%

Anexo 13. Sumario de cantidades con precios unitarios para el proyecto: Rehabilitación del Sistema de drenaje y de la superficie de Ruedo del Camino 4-04-0.15 Calle Viquez.

Sumario de cantidades					
Línea No.:		4		Longitudes a intervenir (km): 0.380	
Nombre del Proyecto:		Rehabilitación del sistema de drenaje y de la superficie de ruedo del camino código 4-04-015 de: Ent C.09 Los Mora a: Limite cantón de Barva conocida como Calle Viquez, Cantón de Santa Bárbara.			
Camino No.:		4-04-015		De: Ent C.9 Los Mora A: Limite cantón de Barva	
Cantón:		Santa Bárbara		Provincia: Heredia	
Región de pago	Descripción del Región	Unidad de pago	Cantidades Estimadas	Precio unitario	Precio Total
CR.110.06	Trabajo a costo más porcentaje	gbl	1.00	€ 6,200,743.65	€ 6,200,743.65
CR.77 103.09 (b)	Reajustes	gbl	1.00	€ 6,200,743.65	€ 6,200,743.65
CR.209.05	Remoción de estructura y obstáculos	gbl	1.00	€ 500,000.00	€ 500,000.00
CR.209.01 A	Excavación para otras estructuras, alcantarillas y obras de arte. A:Tres mil colones 00/100	m ³	996.00	€ 3,000.00	€ 2,988,000.00
CR.209.04 A	Relleno para estructuras, alcantarillas y obras de arte. A:Catorce mil colones 00/100	m ³	815.00	€ 14,000.00	€ 11,410,000.00
CR.301.03	Base de agregados, gradación C, caso 2. A:Diecisiete mil quinientos colones 00/100	m ³	558.00	€ 17,500.00	€ 9,765,000.00
CR.301.06	Subbase de agregados, gradación B, caso 2. A:Diecisiete mil quinientos colones 00/100	m ³	558.00	€ 17,500.00	€ 9,765,000.00
CR.303.01	Reacondicionamiento de subrasante y espaldones. A:Ochocientos cincuenta mil colones 00/100	km	0.53	€ 850,000.00	€ 450,500.00
PRVC-L.402	Capa de concreto asfáltico preparado en planta en caliente, diseñado por la metodología Marshall. A:Ciento cuarenta mil colones 00/100	m ³	219.00	€ 140,000.00	€ 30,660,000.00
CR.552.01(a)	Concreto estructural clase A (25MPa) A:Ciento ochenta y cinco mil colones 00/100	m ³	27.00	€ 185,000.00	€ 4,995,000.00
CR.602.01(b)	Tubería de concreto reforzado clase III-C 76, con diámetro de 800 mm. A:Ciento diez mil colones 00/100	m	10.00	€ 110,000.00	€ 1,100,000.00
CR.608.01(d)	Canal revestido Tipo IV, Concreto hidráulico. A:Dieciséis mil colones 00/100	m ²	1237.00	€ 16,000.00	€ 19,792,000.00
CR.609.02	Cordon y cuneta de concreto de cemento hidráulico de mm de espesor. A:Diecisiete mil quinientos colones 00/100	m	287.00	€ 17,500.00	€ 5,022,500.00
CR.633.01	Instalación de señales verticales, tipo IV. A:Ochenta y cinco mil colones 00/100	unidad	2.00	€ 85,000.00	€ 170,000.00
CR.634.01(b)	Señalización tipo línea continua amarilla. A:Ochocientos colones 00/100	m	1590.00	€ 800.00	€ 1,272,000.00
CR.634.02 (a)	Señalización tipo A. A:Ochenta y cinco mil colones 00/100	m ²	12.00	€ 85,000.00	€ 1,020,000.00
CR.651.02 (e)	Tubería de concreto sin refuerzo 800 mm. A:Seenta y cinco mil quinientos colones 00/100	m	287.00	€ 64,500.00	€ 18,511,500.00
Total: Ciento veintinueve millones setecientos noventa y dos mil novecientos ochenta y siete colones con 30/100					€ 129,792,987.30

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*.
- (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice*.
- Ávila, Tania (2010). *Evaluación de las propiedades de la cal como material estabilizante de suelos plásticos para carreteras y su efecto en las características del material a estabilizar*. URL: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3241/1/32282.pdf>.
- Badilla, Gustavo y Fabián Elizondo (2010). *Mejoramiento y estabilización de subrasantes con cal*. URL: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/publicaciones-mp/publicaciones-boletin/61-articulos-boletin-tecnico/439-mejoramiento-y-estabilizacion-de-subrasantes-con-cal.html>.
- Bustillos, William (2010). *Estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento*.
- Castro, Pedro (2018a). *Diseño estructural pavimentos rígidos*. Tecnológico de Costa Rica.
- (2018b). *Generalidades de la guía de diseño AASHTO de 1993*.
- (2018c). *Ligantes asfálticos*. Tecnológico de Costa Rica.
- Coronado, Jorge (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*.
- Corredor, Gustavo (2008). *Experimento Vial de la AASHTO y las Guías de Diseño AASHTO*. URL: <https://snavarro.files.wordpress.com/2008/08/aashto-931.pdf>.
- Coto, José (2016). *Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a carreteras de tránsito pesado*.
- Huang, Yang H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- La Gaceta (2012). *RECOPE propone ajuste en los precios de los combustibles*. URL: http://www.gaceta.go.cr/pub/2012/01/27/COMP_27_01_2012.pdf.
- LanammeUCR (s.f.). *Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánico-Empíricos*. URL: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Informes/2014/LM-PI-GM-INF-22014.pdf>.
- Leiva, Fabricio (s.f.). *Desarrollo de una Guía de Diseño para Pavimentos de Bajo Volumen de Tránsito en Costa Rica*. URL: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/INFORMES/SIN%20FECHA/GUIA-DISENO_PAVIMENTOS.pdf.
- (2002). *Nueva Guía de Diseño Mecánica-Empírica para estructuras de Pavimento (Vistazo a la Guía 2002, Proyecto NCHRP I 37A)*. URL: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/INFORMES/SIN20FECHA/GUIA_DISENO_MECANISTICA_EMPIRICA.pdf.
- Leiva, Fabricio, Mario Arce y Pedro Castro (2005). *Desarrollo de Leyes de Fatiga para Bases Estabilizadas con Cemento*. URL: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Investigaciones/2005/LM-PI-PV-IN-16B-05%>

20DESARROLLO%20DE%20LEYES%20DE%20FATIGA%20PARA%20BASES%20ESTABILIZADAS%
20CON%20CEMENTO.pdf.

Loría, Luis (2013). *Desarrollo de la guía de diseño de pavimentos de Costa Rica: CR-ME*.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. URL: <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/391>.

— (2016a). *Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica*. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/850>.

— (2016b). *Plan de Gestión Ambiental y Social, Programa Red Vial Cantonal-II*. URL: <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/37421c09-956c-4ada-ba30-d3cfd86ffd64/PGAS++Cantonal+II+190218.pdf?MOD=AJPERES>.

Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (2018). *Programa Red Vial Cantonal I concluyó exitosamente y benefició a todas las municipalidades del país*. URL: <https://www.mideplan.go.cr/prensa/118-noticias-comunicados/1881-programa-red-vial-cantonal-i-concluyo-exitosamente-y-beneficio-a-todas-las-municipalidades-del-pais>.

Monge, Sukti (2013). *Evaluación del Comportamiento a la Fatiga de una Mezcla de Concreto MR-4.5 MPa con Adición de Fibras de Polipropileno*. URL: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3108/1/34921.pdf>.

Trejos, Christopher, José Aguilar y Luis Loría (2016). *Desarrollo de software de Análisis y Diseño de Pavimentos para Costa Rica*. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/294/LM-PI-UMP-057-R2Desarrollo%20del%20Software%20de%20An%C3%A1lisis%20y%20Dise%C3%B1o%20de%20Pavimentos%20para%20Costa%20Rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.