

## 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. Pedro Castro Fernández, Ing. Tania Ávila Esquivel, Ing. Alejandro Medina Angulo, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO  
ADOLFO  
ROJAS MOYA  
(FIRMA)



Firmado digitalmente  
por GUSTAVO  
ADOLFO ROJAS  
MOYA (FIRMA)  
Fecha: 2020.09.30  
16:26:59 -06'00'

---

Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Director

PEDRO LUIS CASTRO  
FERNANDEZ (FIRMA)



Firmado digitalmente por PEDRO  
LUIS CASTRO FERNANDEZ (FIRMA)  
Fecha: 2020.10.05 16:35:13 -06'00'

---

Ing. Pedro Castro Fernández.  
Profesor Guía



Firmado  
digitalmente por  
TANIA AVILA  
ESQUIVEL (FIRMA)  
Fecha: 2020.08.25  
14:57:16 -06'00'

---

Ing. Tania Ávila Esquivel.  
Profesora Lectora

EZEQUIEL  
ALEJANDRO  
MEDINA  
ANGULO (FIRMA)



Firmado digitalmente por EZEQUIEL  
ALEJANDRO MEDINA ANGULO (FIRMA)  
Fecha: 2020.10.02 17:03:24 -06'00'

---

Ing. Alejandro Medina Angulo.  
Profesor Observador

**Diseño mecánico-empírico,  
optimización de la estructura de  
pavimento y plan de conservación para  
Ruta Nacional 911**

# Abstract

The development of the national road network, an essential key for the country's mobility, is one of the primary functions of the Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). This project aims to develop the design of the pavement structure for two control sections (50443 and 51170) of national route 911. The pavement design is based on: subgrade characterization by the DCP test, homogeneous sectioning based on statistical methods, a pre-dimensioning by AASTHO 93 methodology and mechanistic-empirical analysis employing transfer functions, using the following softwares: CR-ME, AP-Rigid and 3DMOVE. Pavement designs have been performed for three different pavement structures (flexible, rigid and semi-rigid). Initial investment budget and life-long preservation scenarios are built for each alternative. Pavement structures are compared, based on equivalent uniform annual cost and technical variables. After the analysis, it is concluded that the most appropriate pavement structure is semi-rigid.

*Key words: pavement, homogeneous sections, AASHTO-93, equivalent uniform annual cost.*

# Resumen

El desarrollo de la red vial nacional, pilar fundamental de la movilidad del país, es una de las funciones primordiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

El presente proyecto pretende el diseño de la estructura de pavimento para dos secciones de control de la ruta nacional 911 (50443 y 51170), a partir de: una caracterización de la subrasante por medio del ensayo de DCP, un seccionamiento homogéneo fundamentado en criterios estadísticos, un predimensionamiento por la metodología AASTHO 93 y una comprobación por funciones de transferencia (conceptos mecanísticos-empíricos); con ayuda de las herramientas CR-ME, AP-Rigid y 3DMOVE, para tres diferentes estrategias de pavimentación (flexible, rígido y semi-rígido).

Se construye un presupuesto de inversión inicial y escenarios de conservación a lo largo de la vida útil para cada alternativa. Por medio de una comparación económica con ayuda del costo anual uniforme equivalente y variables técnicas se concluye que la estructura de pavimento que más se adecúa a las condiciones de sitio expuestas es la semi-rígida.

*Palabras claves: pavimento, secciones homogéneas, AASHTO-93, costo anual uniforme equivalente.*

# **Diseño mecanístico-empírico, optimización de la estructura de pavimento y plan de conservación para Ruta Nacional 911**

ANTHONY JOSÉ BRENES CALDERÓN

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

**Julio del 2020**

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

# Índice

Índice de figuras	2
Índice de cuadros	4
Prefacio	6
Resumen Ejecutivo	7
Introducción	9
Marco Teórico	12
Metodología	42
Resultados	78
Análisis de los resultados	104
Conclusiones	109
Recomendaciones	111
Apéndices	116
Anexos	183

# Índice de figuras

1.	Ubicación estratégica de Ruta Nacional 911 . . . . .	9
2.	Secciones de control 50441 y 50442 de Ruta Nacional 911 . . . . .	10
3.	Sección típica de pavimento flexible . . . . .	13
4.	Sección típica de pavimento rígido . . . . .	14
5.	Sección típica de pavimento rígido JRCPC . . . . .	15
6.	Sección típica de pavimento rígido JPCPC . . . . .	16
7.	Sección típica de pavimento rígido CRCP . . . . .	16
8.	Sección típica de pavimento rígido PCP . . . . .	17
9.	Sección típica de pavimento semirígido . . . . .	17
10.	Zona de aceptación en distribución T-Student a dos colas . . . . .	22
11.	Zona de aceptación en distribución F . . . . .	23
12.	Secciones típicas utilizadas en tramos de prueba AASHTO de 1961 . . . . .	24
13.	Algoritmo de diseño CR-ME . . . . .	28
14.	Deterioro por agrietamiento cuero de lagarto en pavimentos flexibles y semi-rígidos. . . . .	30
15.	Deterioro por agrietamiento longitudinal en pavimentos flexibles y semi-rígidos. . . . .	31
16.	Deterioro por agrietamiento transversal en pavimentos flexibles y semi-rígidos. . . . .	32
17.	Deterioro por baches en pavimentos flexibles y semi-rígidos. . . . .	33
18.	Deterioro por roderas o ahuellamientos en pavimentos flexibles y semi-rígidos. . . . .	33
19.	Deterioro por exudación en pavimentos flexibles y semi-rígidos. . . . .	34
20.	Deterioro por agrietamiento longitudinal en pavimentos rígidos. . . . .	35
21.	Deterioro por agrietamiento transversal en pavimentos rígidos. . . . .	35
22.	Deterioro por escalonamiento en pavimentos rígidos. . . . .	36
23.	Deterioro por pérdida de sello en las juntas de las losas en pavimentos rígidos. . . . .	36
24.	Deterioro por separación de losas en pavimentos rígidos. . . . .	37
25.	Deterioro por separación de losas en pavimentos rígidos. . . . .	37
26.	Deterioro por bombeo de finos en pavimentos rígidos. . . . .	38
27.	Puntos de DCP y fuentes de materiales, Ruta Nacional 911 (SC. 50443 & 51170) . . . . .	43
28.	Determinación de espesores de acuerdo a AASHTO (1993) . . . . .	52
29.	Contribución de carga en cada dovela . . . . .	55
30.	Ingreso de eje de carga y presión en 3DMOVE . . . . .	64
31.	Ingreso de capas y respectivos espesores en 3DMOVE . . . . .	65
32.	Ingreso de parámetros capas en 3DMOVE . . . . .	65
33.	Puntos de análisis de base estabilizada en 3DMOVE . . . . .	66
34.	Representación de puntos de análisis de base estabilizada en 3DMOVE . . . . .	66
35.	Interfaz de inicio de herramienta CR-ME . . . . .	67
36.	Ingreso de parámetros de tránsito en herramienta CR-ME . . . . .	68
37.	Ingreso de parámetros de clima en herramienta CR-ME . . . . .	70
38.	Ingreso de parámetros de mezcla en herramienta CR-ME . . . . .	71
39.	Selección de ligante de mezcla en herramienta CR-ME . . . . .	71

40.	Curva maestra de mezcla en herramienta CR-ME . . . . .	72
41.	Ingreso de parámetros de capas inferiores en herramienta CR-ME. . . . .	72
42.	Ingreso de parámetros a herramienta de diseño AP-Rigid . . . . .	76
43.	Variación de módulos resilientes por capa, pavimento flexible (sección 1) . . . . .	80
44.	Evaluación de porcentaje de daño y agrietamiento, pavimento flexible (sección 1) . . . . .	80
45.	Evaluación de ahuellamiento, pavimento flexible (sección 1) . . . . .	81
46.	Variación de módulos resilientes por capa, pavimento flexible (sección 2) . . . . .	82
47.	Evaluación de porcentaje de daño y agrietamiento, pavimento flexible (sección 2) . . . . .	83
48.	Evaluación de ahuellamiento, pavimento flexible (sección 2) . . . . .	83
49.	Estructura de pavimento flexible propuesta para cada sección . . . . .	84
50.	Variación de módulos resilientes por capa, pavimento semi-rígido (sección 1) . . . . .	85
51.	Evaluación de ahuellamiento, pavimento semi-rígido (sección 1) . . . . .	86
52.	Esfuerzos en fibra superior e inferior de base estabilizada . . . . .	86
53.	Variación de módulos resilientes por capa, pavimento semi-rígido (sección 2) . . . . .	88
54.	Evaluación de ahuellamiento, pavimento semi-rígido (sección 2) . . . . .	89
55.	Esfuerzos en fibra superior e inferior de base estabilizada (15cm) . . . . .	89
56.	Esfuerzos en fibra superior e inferior de base estabilizada (20cm) . . . . .	90
57.	Estructura de pavimento semi-rígido propuesta para cada sección . . . . .	91
58.	Esfuerzos en losa de sección 1 . . . . .	92
59.	Esfuerzos en losa de sección 2 . . . . .	94
60.	Estructura de pavimento rígido propuesta para cada sección (espaldón asfáltico) . . . . .	96
61.	Inversión inicial en función de la estrategia de pavimentación . . . . .	98
62.	Gráfico de CAUE por cada tipo y escenario . . . . .	102
63.	Gráfico de distribución de puntaje, evaluación técnica . . . . .	103

# Índice de cuadros

1.	Factores camión según Oficio DVOP-5170-07 . . . . .	48
2.	Parámetros de mezcla asfáltica DG-12 . . . . .	60
3.	Parámetros de Subbase Granular . . . . .	61
4.	Parámetros de Base Granular . . . . .	61
5.	Parámetros de Subrasante Sección Homogénea 1 . . . . .	62
6.	Parámetros de Subrasante Sección Homogénea 2 . . . . .	62
7.	Valores límites permisibles . . . . .	73
8.	Módulo de Rigidez equivalente y secciones homogéneas . . . . .	78
9.	Ejes equivalentes de diseño pavimentos flexibles y semi-rígidos . . . . .	78
10.	Espesores según metodología AASHTO (1993) de pavimento flexible, sección 1 . . . . .	79
11.	Revisión de espesores elegidos por conceptos mecanísticos-empíricos . . . . .	79
12.	Espesores reducidos según modelos de desempeño (ejercicio académico) . . . . .	81
13.	Revisión de espesores reducidos (ejercicio académico) . . . . .	81
14.	Espesores según metodología AASHTO (1993) de pavimento flexible, sección 2 . . . . .	82
15.	Revisión de espesores elegidos por conceptos mecanísticos-empíricos . . . . .	82
16.	Espesores reducidos según modelos de desempeño sección 2 (ejercicio académico) . . . . .	84
17.	Revisión de espesores reducidos sección 2 (ejercicio académico) . . . . .	84
18.	Espesores según metodología AASHTO (1993), pavimento semi-rígido sección 1 . . . . .	85
19.	Ahuellamiento total de pavimento semi-rígido, sección 1 . . . . .	85
20.	Modelo de fatiga PCA, expuesto por: Zhou, Emmanuel y Scullion (2008) . . . . .	87
21.	Modelo de fatiga Guía de Diseño de Pavimentos Australiana, expuesto por: Leiva (2005), sección 1 . . . . .	87
22.	Modelo de fatiga en fibra superior, expuesto por: Li y col. (2019), sección 1 . . . . .	87
23.	Espesores según metodología AASHTO (1993), pavimento semi-rígido sección 2. . . . .	88
24.	Ahuellamiento total de pavimento semi-rígido, sección 2 . . . . .	88
25.	Modelo de fatiga PCA, expuesto por: Zhou, Emmanuel y Scullion (2008) . . . . .	90
26.	Modelo de fatiga Guía de Diseño de Pavimentos Australiana, expuesto por: Leiva (2005), sección 2 . . . . .	90
27.	Modelo de fatiga en fibra superior, expuesto por: Li y col. (2019), sección 2 . . . . .	91
28.	Espesores de losa y módulos de reacción (K), según AASHTO 1993, para condiciones evaluadas . . . . .	92
29.	Distribución de acero en losas de sección 1 . . . . .	92
30.	Modelo de bombeo, expuesto por Huang (2004), sección 1 . . . . .	93
31.	Modelo de escalonamiento, expuesto por Huang (2004), sección 1 . . . . .	93
32.	Modelos de fatiga, expuestos por Monge (2013) y Anguas, Gómez y Sesma (2002), sección 1 . . . . .	93
33.	Espesores de losa y módulos de reacción (K), según AASHTO 1993, para condiciones evaluadas . . . . .	94
34.	Distribución de acero en losas de sección 2 . . . . .	94

35.	Modelo de bombeo, expuesto por Huang (2004), sección 2 . . . . .	95
36.	Modelo de escalonamiento, expuesto por Huang (2004), sección 2 . . . . .	95
37.	Modelos de fatiga, expuestos por Monge (2013) y Anguas, Gómez y Sesma (2002), sección 2 . . . . .	95
38.	Inversión inicial para estructura de pavimento flexible . . . . .	97
39.	Inversión inicial para estructura de pavimento semi-rígido . . . . .	97
40.	Inversión inicial para estructura de pavimento rígido . . . . .	97
41.	Diferencias en inversiones iniciales de las estructuras . . . . .	97
42.	Escenario 1 de intervenciones propuestas para pavimento flexible . . . . .	98
43.	Escenario 2 de intervenciones propuestas para pavimento flexible . . . . .	99
44.	Escenario 1 de intervenciones propuestas para pavimento semi-rígido . . . . .	99
45.	Escenario 2 de intervenciones propuestas para pavimento semi-rígido . . . . .	100
46.	Escenario 1 de intervenciones propuestas para pavimento rígido . . . . .	100
47.	Escenario 2 de intervenciones propuestas para pavimento rígido . . . . .	101
48.	Costo anual unitario equivalente en función de cada estrategia y escenario . . .	101
49.	Evaluación técnica de acuerdo a apéndice 25 . . . . .	102

# Prefacio

El desarrollo en temas de infraestructura vial es un elemento preponderante para el progreso de un país, al punto que para distintas naciones actualmente es un factor de competitividad, que tiene como principal objetivo proveer un desplazamiento económicamente factible, rápido y de gran comodidad para el usuario. Es por esto que el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, al ser uno de los entes encargados del progreso de la infraestructura en el país, tiene la responsabilidad del desarrollo de la red vial nacional, la cual según datos del CONAVI ronda los 7700 km. Nuestra red vial nacional permite la movilidad al interno del país, que es fundamental en el desarrollo diario de la sociedad, donde a nivel económico se puede percibir en el transporte diario de las exportaciones hasta los puertos, que los trabajadores puedan viajar hasta sus centros de labor, que los turistas puedan recorrer el territorio nacional, entre otras actividades que fomentan la mejora del país.

Es por lo anteriormente descrito que se ha tomado la importancia de tratar de mantener en adecuadas condiciones estas rutas, y generar una mejora continua. Como lo es el caso de la Ruta Nacional 911 (específicamente sus secciones de control 50443 y 51170). Para la cual, como parte de las actividades competentes a esta institución, se planea el diseño de una estructura de pavimento para la mejora de las condiciones de la misma. En una zona donde su ubicación geográfica permite la comunicación directa a un importante foco del turismo nacional; cabe resaltar que esta actividad generalmente representa un valor cercano del 8.2 % del PIB, según **turismoguana:2017** (2017).

Por consiguiente, basados en lo descrito en los párrafos anteriores, este proyecto viene a apoyar el trabajo planeado por dicha institución, A través de un diseño comparativo de tres tipologías distintas de pavimento, primeramente por conceptos expuestos en la Guía de Diseño de AASHTO (1993), con una posterior verificación por medio de la metodología mecánica-empírica, con el fin de seleccionar la estructura más adecuada en función de las características del sitio, términos económicos y de desempeño, Así se puede asegurar que los usuarios se vean futuramente beneficiados con un pavimento que contemple el factor estructural y funcional.

Quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de llegar a la fase final de este nivel académico, y a mis padres Jose y Paula que siempre me han apoyado incondicionalmente para cumplir todas mis metas. Así como a toda mi familia, que me ha impulsado a seguir adelante. Finalmente quiero agradecer a la institución por brindarme las herramientas necesarias para un adecuado aprendizaje e incurrir en mi formación. En especial quiero agradecer a mi profesor guía Dr. Pedro Castro quien me ha transmitido y compartido parte de sus conocimientos, así como el apoyo durante el presente trabajo. También al Ing. Juan José Madriz (CONAVI), Ing. Hugo Chaves (MOPT), Ing. Adrián Sánchez (CONAVI) e Ing. Cristian Ramírez (CEMEX), Técnico Ramón Saborío, por los criterios y consejos brindados.

# Resumen Ejecutivo

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes, junto al Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), son los responsables de proveer una infraestructura adecuada, dentro la red vial nacional, que satisfaga la demanda de los costarricenses. Dentro de dicha red se ubica la división terciaria, a la cual pertenece la Ruta Nacional 911, que actualmente es bastante transcurrida por los usuarios que necesitan desplazarse a zonas de Guanacaste como: Potrero, Flamingo, Brasilito, etc; debido a su localización estratégica. CONAVI ha tenido que intervenir para la conservación de la ruta, que además no cuenta con una superficie de ruedo de gran durabilidad. Por lo que este proyecto enfatiza en el diseño de dicha estructura de pavimento, contemplando factores económicos, técnicos y de conservación que sirvan para fundamentar la elección final de la alternativa más adecuada para dos secciones de control en específico, 50443 y 51170, que conforman el objeto de este proyecto.

Primeramente se genera un proceso de obtención de las variables de entrada para el diseño. Esto de manera inicial por medio de ensayos de DCP a cada 500 metros, que permiten caracterizar la subrasante, así como de un proceso de investigación de las intervenciones en la ruta, como de las posibles fuentes de materiales cercanas a la zona, con el fin de establecer un diseño apegado a la condiciones presentes en el sitio. Para la cuantificación del tránsito se empleó información de los anuarios del MOPT. Por otra parte, producto de la longitud del proyecto aproximadamente 9 km, se decide generar un seccionamiento homogéneo a partir de criterios estadísticos y de un módulo de rigidez equivalente para la subrasante, obteniendo dos secciones homogéneas. Dentro de lo investigado se encuentra una previa colocación de una una superficie de ruedo de emulsión asfáltica y material de subbase granular en parte de la ruta (6km aproximadamente), por lo que se considera para efectos de diseño.

Con lo descrito en el párrafo anterior, fue posible el diseño de tres tipos distintos de estructura de pavimento (flexible, semi-rígido y rígido), a partir de la metodología AASHTO (1993), con el fin de obtener un predimensionamiento inicial, para después ser comprobados por criterios mecanísticos-empíricos con ayuda de la herramienta de diseño CR-ME y sus modelos intrínsecos. Estos últimos mencionados toman en cuenta las respuestas de los materiales y de la estructura en sí ante las cargas y condiciones de sitio, como por ejemplo el efecto que genera el clima en los materiales, en términos de humedad y temperatura de acuerdo con datos del Instituto Meteorológico Nacional, específicamente de la estación del Aeropuerto Nacional Daniel Oduber. Para el caso del pavimento flexible y semi-rígido se establecieron periodos de diseño de 15 años, mientras que para el rígido de 20 años. A partir de lo anterior, junto a procesos iterativos y cumplimiento de valores mínimos fundamentados, se determinan los espesores en función de cada capa.

Con los diseños listos y como herramienta de contraste, se genera un presupuesto de cada alternativa, basado en ofertas adjudicadas de licitaciones públicas de un índole similar al pro-

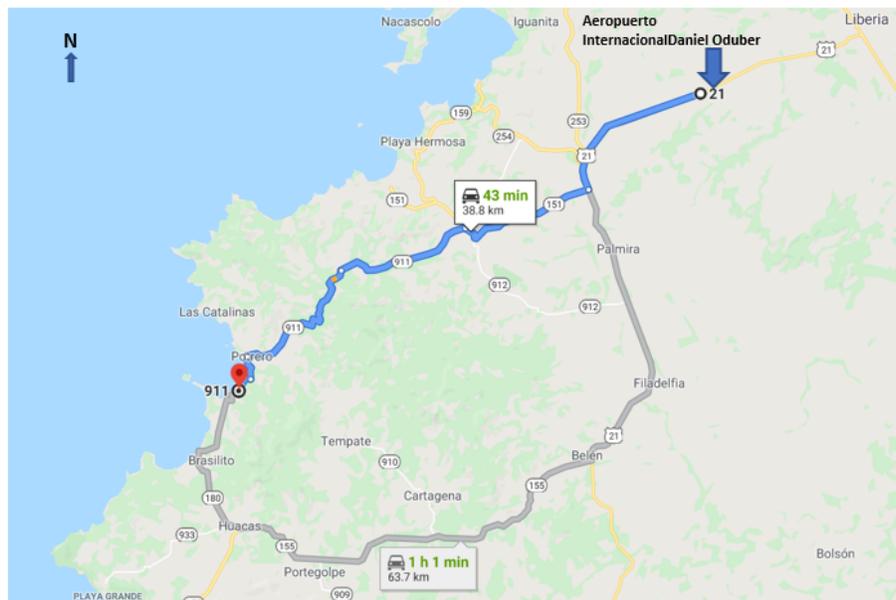
yecto y cercanas a la zona, con el fin de establecer un costo apegado a la realidad nacional. Se obtiene una inversión inicial, de la cual el pavimento rígido muestra la mayor, con un valor de ¢ 2 063 951 274.89 y una variación de 27.78% respecto al flexible y de 34.97% respecto al semi-rígido. Posteriormente se determinan escenarios de conservación por cada alternativa, con el fin de evaluar casos durante su vida útil y su valor en el tiempo. Por medio del costo anual unitario equivalente, se determina que el pavimento semi-rígido representa la mejor opción en términos económicos. Por otra parte, se analizan aspectos técnicos que demuestran la gran ventaja en términos de conservación de los pavimentos rígidos, así como la posibilidad del reciclaje de los pavimentos asfálticos.

De los diferentes puntos de vista analizados se determina que es posible seleccionar el pavimento semi-rígido, como la alternativa de diseño que mejor se adecúa a los requerimientos evaluados, Teniéndose para ambas secciones una estructura de 7.5cm de carpeta asfáltica, 20cm de base estabilizada BE-25 y una subbase granular de 35cm para la primera sección y de 30cm para la segunda. Finalmente como recomendación del proyecto se establece el fortalecimiento de la caracterización del material presente en el sitio.

# Introducción

Dentro de las principales labores actuales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) se destacan el mejoramiento y desarrollo de la Red Vial Nacional. La ruta 911 es parte de la Red Vial Nacional, específicamente en la subdivisión terciaria. Esta ruta, ubicada en la provincia de Guanacaste, permite la conexión directa entre el distrito de Sardinal de Carrillo y diversas zonas turísticas como lo son las playas de: Potrero, Flamingo, Las Catalinas, entre otras. Para el año 2018, 12,8 km fueron intervenidos con la colocación de mezcla asfáltica en caliente, por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) (específicamente para las secciones de control 50441 y 50442). Mientras que 9.0 km, que van desde el poblado de Nuevo Colón a Potrero (secciones de control 51170 y 50443), se encuentran, ya sea, a un nivel de subbase, ó bien a nivel de sello asfáltico solamente con emulsión asfáltica en el año 2019; mientras que otras zonas continúan en lastre. Esta últimas secciones de control, que requieren un mejoramiento de superficie de ruedo, son las tomadas como base para el proyecto.

Esta ruta es muy importante debido a la posición estratégica en la que se ubica, ya que comunica de una forma más directa la zona de Liberia y Sardinal, con una zona de gran desarrollo turístico, como ya se explicó. Tomando como partida el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber y como llegada Playa Flamingo, es posible visualizar un ahorro cercano a los 25 km, en comparación con la ruta más frecuentada actualmente (Rutas Nacionales: 21, 155 y 180) (Filadelfia-Belén-Huacas-Flamingo), como lo muestra la siguiente imagen:



**Figura 1.** Ubicación estratégica de Ruta Nacional 911  
Fuente: Google Maps, 2020.

Una variación considerable cercana al 39 % en términos de distancia, lo que podría incurrir en menores tiempos de desplazamiento, en un sitio donde el sustento económico gira alrededor del turismo, que como lo expone Flores (2017) para el periódico La República, donde indica que: “resulta incalculable estimar el impacto que tiene la actividad turística en Guanacaste; es sinónimo de empleo, inversiones y progreso para la provincia y por ende para Costa Rica en general”, que en datos concretos dicho autor expone que en esa zona se concentra el 25 % de las habitaciones hoteleras disponibles en el país; además alberga una quinta parte de los establecimientos dedicados al hospedaje en el territorio nacional. Sumado a esto, la remodelación del Aeropuerto Internacional Daniel Oduber ha sido pieza fundamental para este crecimiento turístico de la zona, donde Flores (2017) muestra que para finales de 2016 llegaron a ese punto más de 570 mil turistas, esta cifra representa un 35 % más que los registrados un año antes.

Es por lo anterior, que se busca dar una estrategia de pavimentación, para las dos secciones mencionadas y representadas en la figura 2; a una ruta que puede traer bastantes réditos a los usuarios (pobladores y turistas), en términos de los costos de operación vehicular y de viaje.



**Figura 2.** Secciones de control 50441 y 50442 de Ruta Nacional 911  
Fuente: Google Maps, 2020.

Consecuentemente, ante lo indagado referente al proyecto, se encuentra la licitación (2018LA-000011-0006000001) acerca de los trabajos de conservación en las secciones. Donde se toma como portillo para encontrar la caracterización de la subbase colocada, al establecer conversación con ingenieros de CONAVI del área de Conservación. Además, según lo indicado por el Ing. Hugo Chaves Gutiérrez (director del departamento de pavimentos del MOPT) únicamente se cuentan con 3 estudios de CBR y caracterización de la subrasante.

Ante todo lo anteriormente descrito, se proyecta como objetivo general diseñar la estructura de pavimento para la Ruta Nacional 911 por medio de la metodología mecánica empírica, con base en un predimensionamiento establecido por la guía de diseño de pavimentos AASHTO de 1993, y un plan de conservación para preservar la estructura a lo largo de un periodo de 15 años. Esto apoyado en los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los materiales y condiciones de sitio, necesarias como variables de entrada para el diseño de la estructura de pavimento, de acuerdo con las normativas vigentes a nivel nacional y criterios de diseño mecánico-empíricos a nivel internacional.
- Diseñar por medio de la metodología mecánica- empírica tres tipos de estructuras de pavimento, para la elección de la alternativa más adecuada a implementar.
- Generar un presupuesto de cada alternativa de pavimento diseñada, que se utilice como parámetro económico de comparación para inversión inicial.
- Desarrollar un plan de conservación, que funcione como herramienta para la comparación económica de alternativas.

Dentro de las limitantes del proyecto se encuentra la imposibilidad de generar un retro-cálculo de módulos con el fin de evaluar la capacidad del material colocado, al no contar con el equipo necesario. Otra de las limitaciones es no contar con un informe de diseño para la subbase ya colocada, contando con una única caracterización de la misma, facilitada por CONAVI. Además de la cuantificación del tránsito promedio diario por medio de anuarios, producto de la cancelación de la gira destinada a este ensayo, por causa de la crisis sanitaria que ha afectado el país en los últimos meses.

# Marco Teórico

## Pavimento

Como lo evidencia Castro (2019b) un pavimento es una estructura que se encarga de transmitir los esfuerzos, producto de las cargas vehiculares, al suelo o subrasante en el que se apoya. Además éste debe proporcionar una superficie de ruedo cómoda, segura y económica para el usuario, junto a una durabilidad mínima ante agentes externos durante el periodo de diseño. De esta manera el mismo autor sintetiza una serie de funciones elementales o requisitos para el buen desempeño, listados de forma:

- Suplir con un espesor y una resistencia interna adecuada, en función de las cargas de tráfico esperadas.
- Proveer una superficie de ruedo que prevenga la acumulación de humedad a lo interno de la estructura, en términos de permeabilidad y drenaje.
- Brindar una superficie que sea capaz de resistir los agentes externos como: condiciones climáticas, químicos o aceites de los vehículos, desgaste producto del contacto directo con las llantas, entre otros.
- Proporcionar una superficie que reúna las condiciones de seguridad y comodidad para el usuario; donde exista una regularidad de superficie a lo largo de la vía; que además prevenga el deslizamiento o derrape de los vehículos, a partir de un adecuado contacto llanta-superficie sin llegar a efectos de pulimiento.

## Tipos de Pavimentos

De manera típica es posible clasificar los pavimentos en tres categorías preponderantes en función de su composición estructural y con base en la rigidez de las mismas, donde se tiene:

1. Pavimentos Flexibles
2. Pavimentos Rígidos
3. Pavimentos Semi-Rígidos

Cada uno de estos tipos de pavimentos contienen sus respectivas ventajas y características funcionales que llevan al profesional encargado a decidir cuál se ajusta mejor al sitio en términos económicos y de desempeño, esto en función de diversos factores como: las cargas de tránsito, terreno sobre el que se asienta la estructura, disposición de recursos, entre otros.

## Pavimento Flexible

Este tipo de estructura de pavimento se compone de un conjunto de tres capas, donde característicamente la primer capa o superficie de ruedo es hecha de concreto asfáltico (mezcla de agregados pétreos, ligante asfáltico, aire y en ciertos casos algún aditivo o polímero). Seguida de una base granular y por último una sub-base granular. Esto dando origen a un ordenamiento típico en términos de rigidez, donde las capas superiores poseen una mayor rigidez que las inferiores.

Además según Castro (2019b), dentro de las principales ventajas que provee este tipo de estructura se encuentran: en términos económicos una menor inversión inicial, una mayor facilidad constructiva para procesos de intervención, mantenimiento ó rehabilitación; no necesita la implementación o diseño de acero de refuerzo y la mezcla colocada opera como una capa impermeabilizante para la estructura. En contraste a lo anterior, se puede decir que este tipo de pavimento es menos factible para altos volúmenes de tránsito, ya que los procesos de mantenimiento podrían incrementar de gran manera, influyendo en el costo de la estructura a lo largo de su vida útil. Un detalle típico de esta estructura se puede evidenciar en la figura 3 :



**Figura 3.** Sección típica de pavimento flexible

## Pavimento Rígido

El pavimento rígido consiste en una estructura compuesta principalmente de una losa o capa de concreto hidráulico (mezcla de agregados pétreos, cemento hidráulico utilizado como ligante, agua y posiblemente algún aditivo para mejorar sus propiedades), la cual puede ser apoyada directamente sobre el terreno natural o subrasante ó en algunos casos sobre capas de apoyo como: sub-base o base granular. Ver figura 4.



**Figura 4.** Sección típica de pavimento rígido

Dos características fundamentales e inherentes a este tipo de estructura son: la presencia de acero de refuerzo, en la mayoría de casos, y la separación de las losas por medio de juntas. Según Huang (2004) se genera una subdivisión en cuatro tipos preponderantes: Pavimento de Concreto Reforzado Articulado (JRCP), Pavimento de Concreto Simple Articulado o de Juntas (JPCP), Pavimento de Concreto Continuamente Reforzado (CRCP) y Pavimento de Concreto Preesforzado (PCP). En cuanto a las juntas se puede rescatar que estas son separaciones entre losas contiguas que permiten contrarrestar los cambios volumétricos por contracción ó expansión del material ante agentes externos. Principalmente se habla de dos tipos de juntas: transversales (presentes en dirección transversal al sentido del tránsito y buscan disminuir la posibilidad de agrietamiento por fatiga ) y longitudinales (dividen los carriles de la calzada y su propósito es reducir el potencial de agrietamiento por fricción en la base de apoyo).

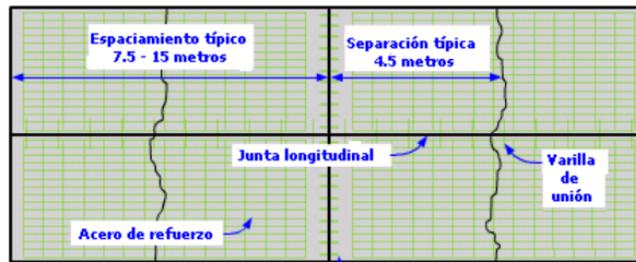
Además, acerca del acero de refuerzo, este se manifiesta comúnmente en forma de dovelas (barras de acero lisas colocadas en forma paralela al flujo vehicular) que permiten la unión y transferencia de carga, previniendo deflexiones y escalonamientos, en losas continuas. También es posible encontrar acero en forma de barras de amarre, las cuales son colocadas dentro de las juntas longitudinales y permiten la unión de una losa con otra ó con su respectivo espaldón.

A continuación se explica con más detalle:

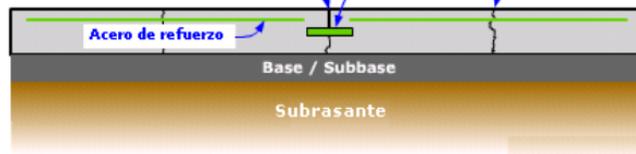
## Pavimento de Concreto Reforzado Articulado (JRCP)

Este tipo de pavimento según Castro (2019b) es característico por su arreglo de acero en forma de malla, que permite mayores espaciamientos entre juntas, lo que crea losas de mayor longitud, siendo necesaria la utilización de dovelas transversales en las juntas para la transferencia efectiva de carga. La figura 5 ejemplifica el detalle general de este tipo de estructura:

### Vista superior



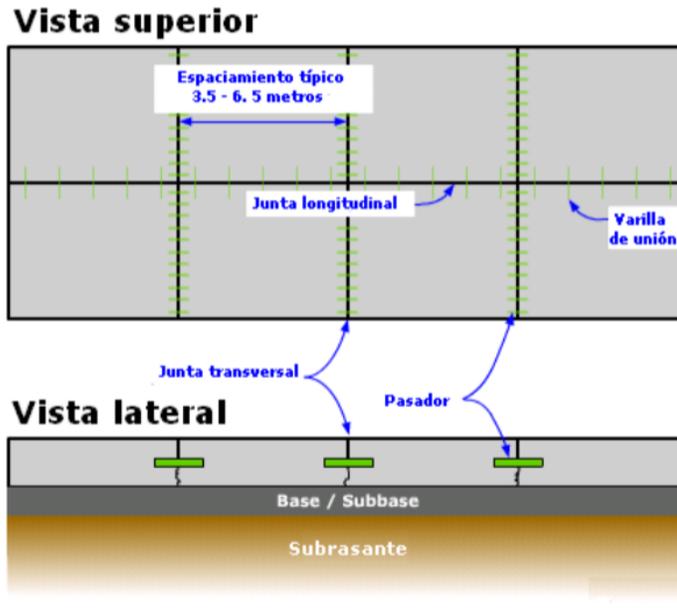
### Vista lateral



**Figura 5.** Sección típica de pavimento rígido JRCP  
Fuente: Sánchez, 2016.

## Pavimento de Concreto Simple Articulado o de Juntas (JPCP)

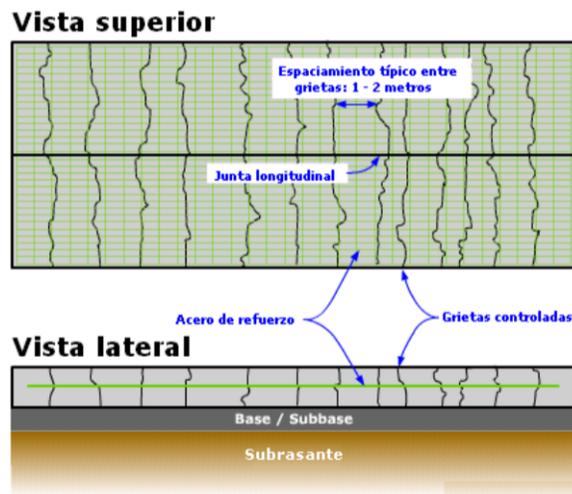
Este tipo de pavimento rígido se caracteriza por contener suficientes juntas entre losas para prevenir cualquier tipo de agrietamiento; y no hay presencia de una malla de refuerzo como en el JRCP. Las losas no deben ser de tan gran dimensión, como en el primer tipo descrito, con la finalidad de no sobrepasar los esfuerzos de flexo-tracción. Cabe resaltar que es el tipo más implementado a nivel nacional y el que será utilizado en el proyecto. Además, acerca de las juntas en este tipo de pavimento y según la teoría, se tiene que: “Las juntas de los pavimentos de concreto JPCP funcionan por trabazón del agregado (angularidad) o a través de dovelas (lo más común en nuestro medio)” (Castro 2019a). De aquí se debe resaltar el adecuado sellado y mantenimiento preventivo, con el fin de no incurrir en un ingreso de humedad que propicie un bombeo de finos o escalonamiento de las losas. La figura 6 muestra un ejemplo de este tipo de estructura:



**Figura 6.** Sección típica de pavimento rígido JPCP  
Fuente: Sánchez, 2016.

### Pavimento de Concreto Continuamente Reforzado (CRCP)

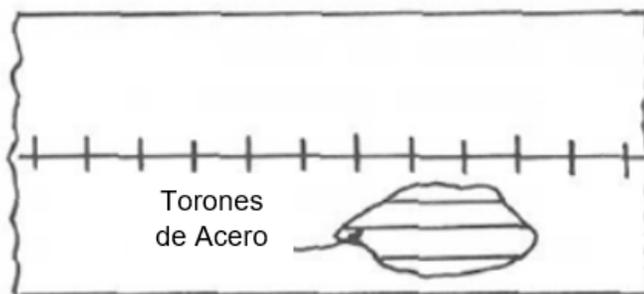
Este tipo de pavimento se diferencia de los demás, ya que posee una malla de refuerzo continuo que permite asumir los esfuerzos de tracción y compresión que llegan a la losa, incurriendo en losas de menos espesores y con ausencia de juntas transversales. Un detalle típico de esta estructura lo muestra la figura 7.



**Figura 7.** Sección típica de pavimento rígido CRCP  
Fuente: Sánchez, 2016.

## Pavimento de Concreto Pretensado (PCP)

Este cuarto subtipo de pavimento rígido según Huang (2004) fundamenta su naturaleza en la previa aplicación de un esfuerzo de compresión a torones de acero contenidos en la losa, con el fin de reducir el esfuerzo por tensión causado por el tránsito, y así poder disminuir el espesor de la losa. Esta tipología permite el desarrollo de losas de gran longitud, entre 90m - 200m, según dicho autor. Ver figura 8.



**Figura 8.** Sección típica de pavimento rígido PCP  
Fuente: Huang, 2004.

## Pavimento Semirígido

Este tipo de pavimento se caracteriza por tener una base de agregado estabilizado con cemento por debajo de una carpeta asfáltica. Por lo que ayuda a mitigar el daño de agrietamiento por fatiga en dicha carpeta. Pero en contraste, según Castro (2019b), producto de la rigidez de la base, ésta es susceptible a sufrir agrietamiento por contracción. Un detalle de la estructura se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** Sección típica de pavimento semirígido

# Capas de Estructura de Pavimento

La estructura de pavimento se compone de una serie de capas que funcionan conjuntamente para resistir los esfuerzos producidos por agentes externos y dar como resultado un paquete estructural. Cada capa posee sus características inherentes en términos de resistencia y propiedades naturales, por lo que la combinación idónea se maneja en función de estos parámetros, con el fin de llevar dichos esfuerzos de una manera efectiva hasta la subrasante. Es por esto que se pueden identificar típicamente las siguientes capas: capa de ruedo o rodadura (revestimiento superficial), capa de base, subbase y subrasante.

## Capa de Ruedo

Esta es la capa más superficial de la estructura de pavimento, la cual se encuentra en contacto directo con el tránsito, por lo que dentro de sus principales funciones y requerimientos deben de estar:

- Proveer una estructura impermeable (si así lo requiere el diseño) con el fin de proteger las capas inferiores de la humedad.
- Tener la suficiente textura, ya sea a nivel macro o micro, para asegurar una adecuada adherencia llanta-carpeta y evitar derrapes. Así como la suficiente regularidad para el eficiente, cómodo, seguro y barato tránsito.
- Resistir a la abrasión, desgastes y agentes climáticos.

Todo lo anterior con el fin de garantizar seguridad, durabilidad, economía y comodidad para el usuario. Por otra parte, es posible rescatar que hay dos tipos principales de superficies de ruedo: la carpeta asfáltica (que como ya se explicó anteriormente es una combinación de agregados pétreos con asfalto utilizado como ligante) y la losa de concreto hidráulico (que como ya se explicó anteriormente es una combinación de agregados pétreos con cemento utilizado como ligante). La rigidez de la segunda opción mencionada es mucho mayor que de la primera (en un orden de magnitud).

## Base

Es la capa que se encuentra bajo la superficie de ruedo, principalmente tiene funciones como: controlar diferenciales volumétricos en la estructura y evitar que el material fino de la subrasante viaje hasta la intemperie. Estos materiales como lo indica Ávila (2017) son generalmente de origen granular por lo que la composición mineralógica, tamaño de partícula y contenido de humedad, son propiedades que se deben tener en cuenta a la hora de ser implementados dentro de una estructura de pavimento. Además, la misma autora indica que si el diseño lo requiere se puede dar un proceso de estabilización con agentes como: cal, cemento, asfalto ó agentes químicos para hacer estable al material. A nivel nacional el Ministerio Obras Públicas y Transportes (MOPT) (2010) en su manual CR-2010 (sección 301), expone como requerimiento del material para ser utilizado como base un CBR superior al 80 %.

## **Subbase**

Es un material que al igual que la base es de origen granular y que cumple las mismas funciones secundarias. Se resalta lo mencionado por Huang (2004), quien explica que la razón por la cual se colocan dos materiales granulares diferentes es por economía, donde en lugar de usar una sola capa de base se genera una subdivisión de materiales para disminuir el costo asociado. También es importante resaltar que es la capa que va a estar en contacto directo con la subrasante, por lo que debe impedir el bombeo de finos y absorber los diferenciales volumétricos, con el fin de no reflejar deformaciones en la estructura. A nivel nacional el Ministerio Obras Públicas y Transportes (MOPT) (2010) en su manual CR-2010 (sección 301), expone como requerimiento del material para ser utilizado como base un CBR superior al 30 %

## **Subrasante**

Es el terreno natural donde se apoya la estructura de pavimento y el cual debe recibir las cargas provenientes de dicho medio de transferencia, así como soportarlo. Muchas veces la subrasante presenta condiciones de capacidad muy bajas o altos índices de plasticidad que incurren en posibles diferenciales volumétricos o deformaciones, por lo que deben de ser tratadas con ayuda de algún agente de estabilización para su adecuado desempeño.

## **Índice de Soporte de California (CBR)**

El índice de Soporte de California, de su nombre en inglés (CBR), es un indicador porcentual que permite la evaluación de la capacidad portante de un material (base, subbase, subrasante), que se obtiene por medio de un ensayo normado (ASTM D1833-16 “Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory compacted” & AASHTO T193-13 (2017) “Standard Method of the test The California Bearing Ratio”) bajo condiciones controladas en laboratorio (humedad y carga).

En este ensayo se acondiciona la muestra y se busca la carga para generar una cierta penetración normada (0.1 in & 0.2 in) a una tasa de aplicación definida en la norma. Dicha carga se compara con una carga patrón (carga unitaria que produce la misma penetración en roca triturada) y se obtiene el índice de forma porcentual.

## **Penetrómetro de cono dinámico (DCP)**

Este ensayo de campo normado por American Society for Testing and Materials (ASTM) (2018), específicamente en la norma: ASTM D6951M-18 (“Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications”), y conocido popularmente por sus siglas en inglés como: “DCP”, es un ensayo utilizado para conocer la tasa de penetración en una capa o material en campo, con el fin de establecer correlaciones para determinar su resistencia mecánica. El ensayo consiste en un martillo de peso normado (8 kg ó 4.6 kg) que se deja caer libremente desde una altura normada (575 mm) y se va registrando la penetración de acuerdo con el número de golpes dados por dicho martillo. Posteriormente, durante el procesamiento de datos es posible construir una gráfica de golpes acumulados en

función de la penetración, lo que permite evidenciar posibles estratos de material de acuerdo con cambios en la pendiente. Para finalmente, con ayuda de dicha correlación, expuesta en la norma y aplicable a todo tipo de suelos, excepto CL y CH, establecer un índice de CBR, de manera:

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$$

Fuente: ASTM, 2018.

Donde:

CBR: Índice de Soporte de California (%)

DCP: Índice de DCP (mm/golpe)

Este ensayo es aplicado comúnmente en las exploraciones de campo para diseño de pavimentos, ya que sus datos son casi inmediatos en comparación con el ensayo propio de CBR, el cual conlleva procesos de muestreo y acondicionamiento en laboratorio.

## Módulo de Rigidez

El módulo de rigidez es una propiedad fundamental en el diseño de los pavimentos, para determinar la capacidad de soporte de un material. Castro (2019c) detalla que típicamente éste se calcula a partir del módulo resiliente, que es un ensayo que permite establecer la razón entre un esfuerzo aplicado y una deformación unitaria recuperable en el material, sometido a cargas repetitivas. El módulo resiliente permite aproximar el módulo de rigidez en rangos de deformación bajos, donde prácticamente la totalidad de la deformación unitaria es recuperable; es decir en el rango elástico, como lo indica el autor mencionado. Las normas que regulan a este ensayo descrito son: módulo resiliente de materiales granulares y suelos (AASHTO T 307) y módulo resiliente de mezclas asfálticas a la tensión indirecta (ASTM D 4123). Algunos ensayos alternativos al módulo resiliente, para suelos y agregados, normalmente utilizados son el CBR, DCP, entre otros; que mediante correlaciones estiman el módulo de rigidez.

## Secciones Homogéneas

Las secciones homogéneas son tramos o unidades de diseño que generalmente comparten diversas características como: tránsito, capacidad portante, tipo de suelo, entre otras. Mediante su definición le permiten al diseñador sectorizar el proyecto e implementar una estructura de pavimento generalizada para las zonas que muestren condiciones similares comprobadas. En proyectos carreteros de gran longitud son utilizadas para homogeneizar constructivamente el diseño de la estructura de pavimento, ya que no es viable generar una multitud de diseños que compliquen la fase de ejecución constructiva.

## Prueba de Hipótesis de Dos Muestras

Para el caso de la definición de las secciones homogéneas se emplean procesos estadísticos, específicamente la prueba de hipótesis. Dice la teoría: "La estructura de la prueba de hipótesis se establece usando el término hipótesis nula, el cual se refiere a cualquier hipótesis que se desea probar y se denota con  $H_0$ . El rechazo de  $H_0$  conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa, que se denota con  $H_1$ " (Moore, 1994).

Generalmente estas pruebas son utilizadas para inferir si dos poblaciones, a partir de sus promedios ( $\mu_1$  &  $\mu_2$ ) y varianzas (cuadrado de desviaciones estándar  $\sigma_1$  &  $\sigma_2$ ), tienen diferencias significativas, ó bien para afirmar que muestras simples pueden corresponder a una misma población. Se requieren para el análisis: las medias ( $\bar{x}_1$  &  $\bar{x}_2$ ), varianzas (siendo el cuadrado de las desviaciones estándar  $s_1$  &  $s_2$ ) y tamaños ( $n_1$  &  $n_2$ ) de las muestras; naturalmente se desconocen los parámetros poblacionales.

En este caso en específico las muestras a ser evaluadas son diversos grupos de módulos de rigidez definidos a simple vista por el diseñador, en los cuales se establece la hipótesis nula de que tanto para sus promedios como para sus varianzas no existen diferencias significativas, Para el caso de las medias se debe cumplir:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

Mientras que la hipótesis alternativa establece que existen diferencias significativas, aplicado para medias se tiene:

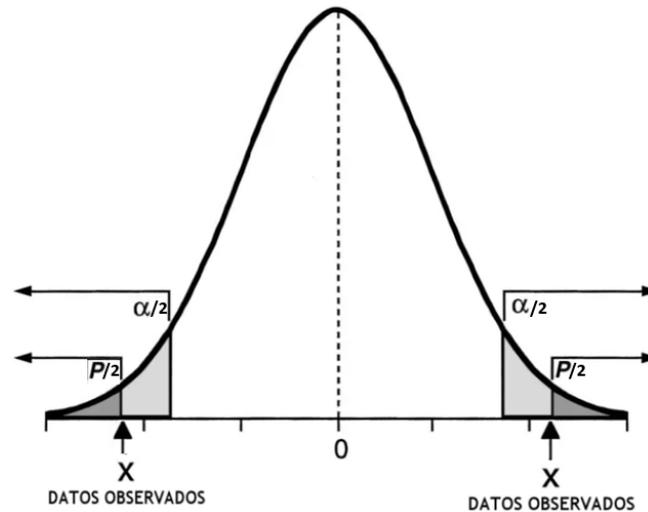
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para el caso de los promedios o medias se utiliza una distribución "T Student", que como lo indica un autor: "esta distribución típicamente surge al trabajar con las medias de muestras de un tamaño pequeño provenientes de poblaciones normalmente distribuidas" (Moore, 1994). Esto con el fin de calcular un error estándar (a partir de las desviaciones y varianzas), para luego establecer un valor "t" que representa el número de unidades estándares que están separadas las medias de los dos grupos. Cuanto mayor sea la diferencia entre las medias, mayor es la probabilidad que exista una diferencia estadística significativa entre ambas. Finalmente se cuantifica con el estadístico "P" (conocido comúnmente como "P- Value"), que permite establecer el nivel de significancia más pequeño posible (en el caso de los promedios se trabaja a dos colas y al 90% de confiabilidad), de manera que:

$$P\text{-Value} \geq (\alpha/2 = 0.05) \Rightarrow \text{no se rechaza } H_0$$

$$P\text{-Value} < (\alpha/2 = 0.05) \Rightarrow \text{se rechaza } H_0, \text{ se recae en } H_1$$

De una forma gráfica, el criterio se representa en la figura 10.



**Figura 10.** Zona de aceptación en distribución T-Student a dos colas  
Fuente: Moreno, 2018.

De forma recíproca se trabaja con las varianzas, pero en este caso se utiliza una distribución típica F, según lo acotado por Moore (1994). Se calcula un estadístico “F” (a partir una relación de las varianzas muestrales  $s_1^2/s_2^2$ ) y con este un estadístico “P” para la distribución mencionada, a un 90 % de confiabilidad ( $\alpha$ ). Específicamente la hipótesis nula a evaluar (no existen diferencias significativas en las varianzas) es:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

Mientras que la hipótesis alternativa establece que existen diferencias significativas, que aplicado para las varianzas es:

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

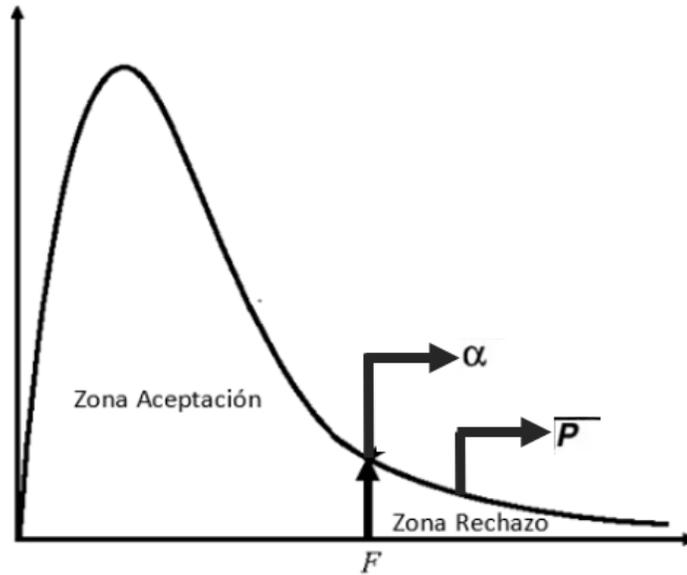
En este caso siempre la población 1 es la que presenta mayor dispersión, cuantificada por medio de la desviación estándar muestral.

De manera que:

$$\text{P-Value} \geq 0.10 \Rightarrow \text{no se rechaza } H_0$$

$$\text{P-Value} < 0.10 \Rightarrow \text{se rechaza } H_0, \text{ se recae en } H_1$$

De forma gráfica se representa en la figura 11.



**Figura 11.** Zona de aceptación en distribución F

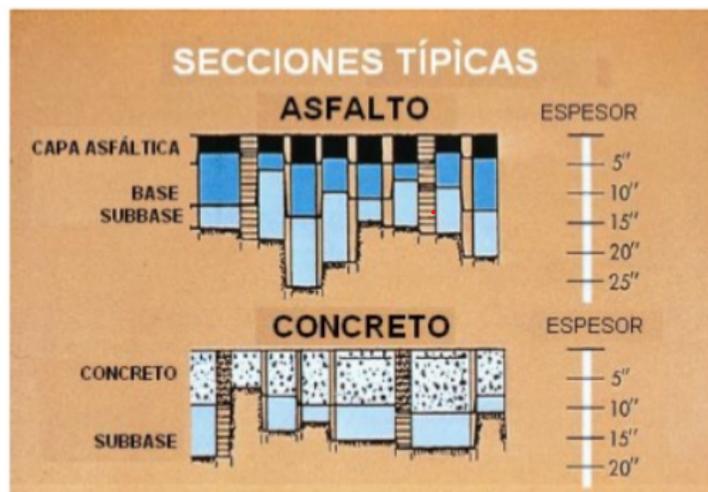
Así que a modo de resumen se tiene:

- Si la hipótesis nula se acepta tanto para varianzas como para promedios, se puede establecer que no hay evidencia de que las muestras correspondan a una población diferente. Por lo que se está en presencia de una sección homogénea, que perfectamente integra las poblaciones de origen de cada muestra.
- Si alguna de las hipótesis nulas es rechazada, sea para varianzas o promedios, se puede acotar que existe evidencia de que las muestras correspondan a poblaciones diferentes. En tal caso, las poblaciones de origen se transforman en dos secciones homogéneas.

De forma consecutiva en la sección de metodología se detallan los procesos para la obtención de los errores estándar, los estadísticos (t y F) y los valores de P.

## Metodología de diseño de pavimentos AASHTO- 93

La metodología de diseño de pavimentos de AASHTO (1993) basa sus orígenes, según Huang 2004, en los resultados obtenidos de los tramos de prueba de la AASHTO (de su nombre en inglés: American Association of State Highway Officials) en Ottawa (Illinois) entre los años 1958-1961; donde se establecieron 200 secciones de pavimento rígido (únicamente de los tipos JPCP y JRCP) y 234 secciones de pavimento flexible, que permitieron el ajuste y estudio de diferentes parámetros, como lo fue el caso del índice de habilidad de servicio (PSI). A partir de dicho tramo de prueba, se fueron instaurando diferentes guías de diseño de pavimentos hasta llegar a la actual. La guía muestra una serie de procesos y variables necesarias para la obtención de los espesores de cada capa de la estructura de pavimento; involucrando propiedades de los materiales, caracterización de las cargas, agentes externos y términos probabilísticos; con el fin de dar con un espesor teórico por capa, el cual debe ser ajustado a términos constructivos por el diseñador. En la figura 12 se pueden notar ejemplos de diferentes espesores y tipologías contempladas en dichos tramos de prueba:



**Figura 12.** Secciones típicas utilizadas en tramos de prueba AASHTO de 1961  
Fuente: Sánchez, 2016.

### Periodo de diseño estructural

El periodo de diseño de una estructura de pavimento, según Leiva (2006), es el horizonte temporal en el cual la estructura construida debe proveer un adecuado nivel de servicio que asegure: movilidad, accesibilidad y seguridad, considerando sólo la conservación rutinaria.

### Ejes Equivalentes de carga (EEQ)

El paso de los diferentes vehículos por la estructura de pavimento genera una carga en función del ordenamiento de sus ejes a través del tiempo. Es por esto que se busca unificar este

parámetro por medio de una conversión a ejes equivalentes de 8200 kg, típicamente conocidos como EEQ o ESALs (de sus siglas en inglés), para obtener una cantidad unificada en un determinado periodo. Lo anterior se realiza contemplando diferentes variables como: cantidad y tipo de vehículos, el crecimiento vehicular, el periodo de diseño, distribución por carril, entre otros que se detallan a continuación:

- **Tránsito Promedio Diario (TPD):** Este parámetro hace referencia a un valor calculado de cuántos vehículos pasan diariamente por un determinado punto. Esto se logra a través de conteos manuales o con ayuda de equipos que permiten el registro de los vehículos o ejes en sí. Además estos primeros son clasificados en función de su tipo, por ejemplo: liviano, carga liviana, C2, entre otros.
- **Factores Camión:** Cuando se conoce bien la tipología vehicular es posible determinar los factores camión, que en sí son equivalencias de un determinado tipo de vehículo, que representan la cantidad de pasadas de un eje equivalente simple, que genera dicho tipo de vehículo sobre el pavimento. En simples palabras y como lo explica un autor: “Este factor permite estimar el daño que produce un vehículo cualquiera (peso y tipo de eje) en comparación a un vehículo estándar para el diseño de pavimentos.” (Elizondo, 2013)
- **Factor de Crecimiento:** Este factor permite evidenciar el crecimiento vehicular para cada año, en función, de una tasa de crecimiento anual; definida por datos históricos y un determinado periodo. Esto con el fin de obtener los EEQ para el periodo de diseño. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASTHO) (1993) expone la siguiente fórmula para su respectivo cálculo:

$$\text{Factor de Crecimiento} = \frac{(1 + g)^n - 1}{g}$$

Donde:

n: período de cálculo (años)

g: tasa de crecimiento anual (%)

- **Factor Carril:** En carreteras de dos o más carriles se debe diseñar el carril que recibe más carga (carril de diseño), que por lo general es el carril de tránsito lento. Cuando se tienen carreteras de un solo carril este término se vuelve irrelevante ya que dicho carril recibe toda la carga.
- **Factor Direccional:** Este factor contempla el porcentaje de vehículos que viaja por cada sentido, Castro (2019b) dice que en caso de que no haya información de TPD y distribución vehicular por sentido, se debe considerar una distribución 50 % / 50 %, es decir la mitad para cada carril.

## Índice de Serviciabilidad (PSI)

Este índice permite cuantificar la percepción de un usuario, respecto a la calidad percibida de servicio o de tránsito sobre una estructura de pavimento. A partir de esto se define una escala de 0 a 5, donde 5 es un pavimento en condiciones perfectas para el tránsito y 0 intransitable. Todo este proceso se basó en el tramo experimental de prueba de AASHO. Según Castro (2019b) es posible adjudicar índices iniciales de 4.2 a pavimentos flexibles nuevos, 4.5 para pavimentos rígidos y entre 4.3 y 4.4 para pavimentos semirígidos. Por otra parte el índice terminal, al final del periodo de diseño, depende del grado de importancia de la estructura, esto debido a que estructuras de mayor importancia se deben rehabilitar más pronto. Así que los valores oscilan entre 2.0 y 3.0.

## Nivel de Confianza (R) y Estadístico ( $Z_R$ )

Este valor, de acuerdo con Castro (2019b), toma en cuenta que la metodología de diseño es de carácter probabilística, por lo tanto, las variables de diseño tienen un nivel de dispersión que repercute en la cantidad de cargas para llegar al nivel de servicio terminal. Según el mismo autor, los elementos que pueden presentar mayor dispersión son los módulos de rigidez de las capas de la estructura, junto a espesores y cargas vehiculares. Así que este factor generalmente depende de la validez y calidad de la información. Por otra parte, el mismo autor explica que el estadístico " $Z_R$ " contempla la posibilidad de que posterior a las cargas de diseño se supere el PSI terminal, dando implícitamente una mejor condición estructural.

## Desviación de Desempeño ( $S_o$ )

Esta desviación contempla la posibilidad de que existan diferencias en el índice de servicio terminal de diversas secciones del pavimento al final del periodo de diseño. Según Castro (2019b) para pavimentos flexibles se recomienda un  $S_o$  de 0.45 y para rígidos de 0.35.

## Coefficiente de drenaje

Este es un coeficiente que permite evaluar los momentos en los que la estructura estará en presencia de humedad, por lo que se encuentra dado en función del tiempo de exposición y la calidad de los drenajes. En el diseño de pavimentos flexibles se conoce como " $m_i$ ", mientras que para pavimentos rígidos " $c_d$ ".

## Coefficiente estructural de capa

Este es un coeficiente que se expresa en la carpeta asfáltica ( $a_1$ ), base ( $a_2$ ) y subbase ( $a_3$ ), que en sí expresa la capacidad de cada capa de mantener su resistencia cuando el pavimento es sometido a cargas; generalmente se encuentra en función del módulo de rigidez ó CBR.

## Número estructural (SN)

Para el caso del número estructural y de acuerdo con Elizondo (2013), se puede decir que este es un número abstracto que expresa la capacidad estructural requerida por un pavimento para las combinaciones dadas de: soporte de suelo, tráfico total y cambio del índice servicio para el periodo de diseño. Depende de la rigidez y espesor de cada una de las capas del pavimento.

## Coefficiente de transferencia

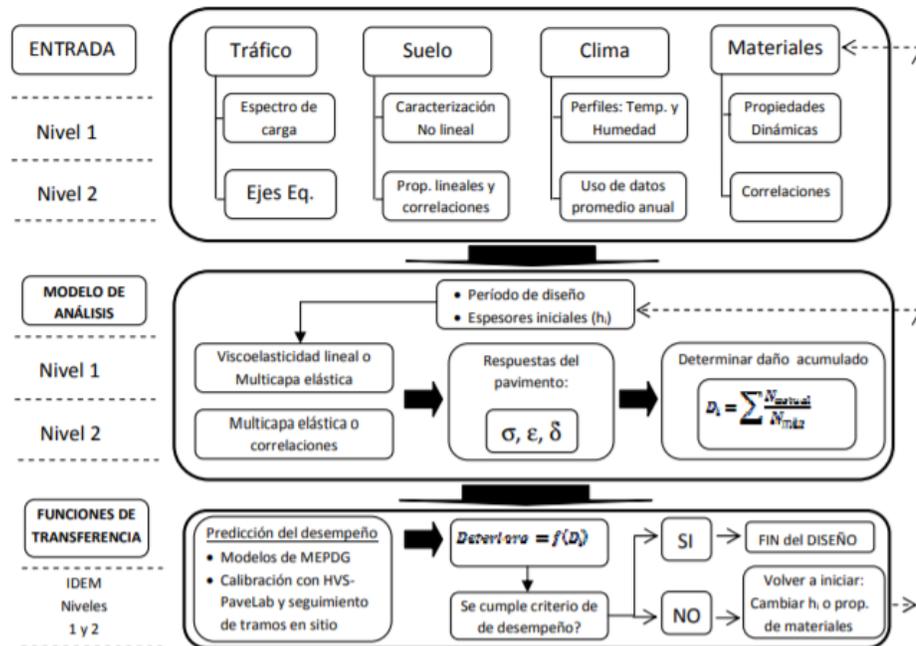
Este coeficiente es inherente al diseño de pavimentos rígidos y expresa la capacidad de una losa a transmitir esfuerzos a losas continuas. Este parámetro se encuentra en función de: la presencia ó no de dovelas, del tipo de espaldón y del tipo de pavimento rígido.

## Método Mecánico - Empírico

La Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993, como ya se indicó anteriormente, se encuentra fundamentada en gran parte por estudios experimentales inherentes al sitio de prueba. Por lo que para su aplicación en diferentes partes del mundo ha sido necesario desarrollar metodologías complementarias, que de forma global permitan contemplar las variables a las que estará sometida la estructura de pavimento, como: condiciones climáticas del sitio que incidan en variaciones de las propiedades del material y el desempeño de la estructura ante diferentes tipos de deterioros. Es por esto anterior y como lo indica AASHTO (2008), que con un proyecto de la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos (FHWA), de sus siglas en inglés, se logró generar una Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica (MEPDG), dada al público para comentarios y revisión en el 2004, la cual fue evolucionando poco a poco, hasta ser implementada en un software para diseño. Dentro de su proceso contempla principalmente modelos de desempeño que permiten evaluar la respuesta de la estructura en términos de: deformaciones, esfuerzos, deflexiones, capacidad de los materiales, entre otras; ante diversos mecanismos de falla. Con la finalidad de tener un diseño fundamentado, apegado a las condiciones de sitio y con espesores realmente adecuados para la estructura, esta metodología es comúnmente utilizada como mecanismo de optimización.

Ante la publicación de esta guía y según Loría (2013), gran cantidad de diseñadores latinoamericanos buscaron implementar este programa y guía de diseño, pero se encontraron con la barrera del alto costo económico y la poca aplicación debido a las diferencias en los materiales, climas y condiciones generales de zona. Es por esto que a nivel nacional Lanamme UCR mediante su Unidad de Materiales y Pavimentos, se ha tomado la tarea de investigar, calibrar variables y tropicalizar muchos de los modelos expuestos en la MEPDG, dando como producto una guía de diseño para Costa Rica, junto a un software (CR-ME), que permite adecuar los diseños a las condiciones de sitio del país (propiedades de materiales, tránsito, clima, entre otros). Este programa cuenta con tres niveles jerárquicos, según Loría (2013), que van en función del nivel de detalle de sus parámetros de entrada; donde el primer nivel necesita información de ensayos dinámicos en materiales, el segundo utiliza regresiones lineales y el tercero utiliza

parámetros básicos para el diseño de pavimentos de bajo tránsito, según Leiva (2006), esta categoría comprende pavimentos con cargas menores a un millón de ejes equivalentes de diseño. La figura 13 detalla el algoritmo del diseño y software CR-ME:



**Figura 13.** Algoritmo de diseño CR-ME  
Fuente: Loría, 2013.

## Módulo Dinámico

En la metodología de diseño mecánico-empírica una de las variables de suma relevancia a considerar es el módulo dinámico de la mezcla asfáltica; según Castro (2019c), éste es un ensayo típico que permite evaluar el módulo de rigidez de un material, por medio de la aplicación de cargas cíclicas con el fin de establecer una relación de esfuerzo y deformación máxima. Es fundamental rescatar que para el concreto asfáltico la rigidez es totalmente dependiente de la frecuencia de carga y la temperatura de ensayo, esto producto de las características termoplásticas y viscoelásticas del ligante, que se reflejan en la mezcla.

Esta propiedad puede ser determinada de múltiples formas como: ensayos directos al material regulados por las normas (AASHTO TP 62 & ASTM D 3497 “Módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente”), aproximaciones por medio fórmulas del Instituto del Asfalto (características por utilizar la viscosidad del asfalto como parámetro), fórmula de Heukelom y Klomp (de forma particular calculan esta propiedad a partir del módulo dinámico del ligante y los volúmenes porcentuales de los componentes de la mezcla), modelo de Witczak (cálculo a partir de los constituyentes propios de la mezcla), entre otros. En el caso del software CR-ME, dentro de su nivel básico, se fundamenta utilizar el modelo de predicción Witczak-Lanname, el cuál según Trejos y col. (2017) considera el tipo de asfalto y materiales generalmente encontrados en Costa Rica. De acuerdo con Loría y col. (2010), se indica que este modelo fue

calibrado con consideraciones de materiales a nivel nacional, obteniendo un  $R^2$  de 93.5 %, ya que los autores comprobaron que el modelo general de Witczak tiende a sobredimensionar los módulos dinámicos para mezclas asfálticas utilizadas en Costa Rica.

## Índice de Thornthwaite

El Índice de Thornthwaite, de sus siglas en inglés (TMI) y de acuerdo con Karunaratne y col. (2016), es un valor numérico que permite clasificar las condiciones climáticas de áreas geográficas determinadas. Según lo indican dichos autores, este índice varía entre +100 (zonas húmedas) y -100 (zonas áridas). En diferentes campos, como es el caso de geotécnica y pavimentos, se ha utilizado para evaluar el efecto de variación que generan las condiciones climáticas en las propiedades portantes de suelos o materiales.

De forma complementaria, según Diez (2008), este índice es calculado a partir de procesos hídricos que toman en cuenta la precipitación mensual, temperatura mensual y balances de humedad (déficit y exceso), para finalmente obtener un valor (TMI) dentro del rango establecido, que permite detallar la zona según sus características climáticas. Este índice es utilizado por el software de diseño CR-ME para evaluar las condiciones de sitio y su efecto en los materiales o subrasante; así que en la metodología se explicará el proceso de cálculo según el último autor mencionado.

## Deterioros típicos en los pavimentos

Las causas más comunes del deterioro de las estructuras de pavimento, según Sánchez (2009) y en relación con Hurtado (2016) , se deben propiamente a diversos factores como:

- Diseño deficiente, producto de falta de conocimiento o nula aplicación de conceptos técnicos.
- Sobrepaso del período útil del pavimento, sin intervención alguna.
- Factores climáticos desfavorables, no modelados ni contemplados en el diseño.
- Deficiencias durante la construcción (calidad inadecuada de materiales y mezclas, espesores insuficientes, drenajes inapropiados, técnicas constructivas deficientes, entre otras).
- Un deficiente planeamiento ó nula implementación de estrategias de mantenimiento.
- Subestación de las cargas a la que estará expuesta la estructura. Ó crecimiento fortuito e inesperado del tránsito sobre la ruta, que supere las cargas de diseño contempladas.

Así que de manera sintetizada, se pueden exponer los siguientes deterioros, en función del tipo de pavimento.

## Deterioros en Pavimentos Semi-rígidos y Flexibles

Tanto los pavimentos flexibles como los semi-rígidos comparten la característica de que la superficie de ruedo es de mezcla asfáltica. Se pueden presentar las siguientes patologías en ambos caso.

### Agrietamiento tipo cuero de lagarto

De acuerdo con Sánchez (2009) y en relación con Hurtado (2016), este fenómeno se caracteriza por la combinación de una serie de fisuras unidas, la cuales forman pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos que poseen, normalmente, un diámetro menor a 30cm.

Estas fisuras comienzan en la sección inferior de la capa asfáltica, donde las tensiones y deformaciones por tracción llegan a su valor máximo. Esto debido al esfuerzo por tensión causado por las cargas vehiculares que va generando deformación plástica hasta la ruptura de fibra. Estas se propagan hasta la superficie poco a poco; donde primeramente se presentan como una serie de fisuras longitudinales paralelas; posteriormente por la constante repetición de carga, evolucionan interconectándose y formando una red cerrada que asemeja al cuero de un lagarto (de aquí surge su típico nombre ). Ver figura 14.



**Figura 14.** Deterioro por agrietamiento cuero de lagarto en pavimentos flexibles y semi-rígidos.  
Fuente: Costa, 2019.

## Agrietamiento longitudinal

De acuerdo con Sánchez (2009), esta patología consiste en una fractura extendida a través de la superficie del pavimento. Esta se desarrolla de forma paralela al sentido del tránsito, y se localiza normalmente sobre las zonas por las que transitan los vehículos, ya sea en el eje ó en los bordes del pavimento. Ver figura 15.

Las posibles causas de esta afección, según la investigación realizada por Hurtado (2016), son las siguientes:

- Contracción de la mezcla asfáltica y pérdida de flexibilidad, producto de diferenciales en la temperatura.
- Diferenciales volumétricos en la subrasante, que fracturen la estructura.
- Falta de confinamiento de la estructura.
- Reflejo de grietas causadas por grietas existentes, que se encuentran por debajo de la superficie de rodamiento, pertenecientes a capas antiguas.



**Figura 15.** Deterioro por agrietamiento longitudinal en pavimentos flexibles y semi-rígidos.  
Fuente: LABTOP CA, 2020.

## Agrietamiento transversal

“El agrietamiento transversal corresponde a un tipo de fractura que posee longitud variable y se extiende a través de la superficie del pavimento, formando, a su vez, un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera” (Sánchez, 2009). Ver figura 16.

Las posibles causas para que ocurra este tipo de agrietamiento, según la investigación realizada por Hurtado (2016), son las siguientes:

- Contracción de la mezcla asfáltica y pérdida de flexibilidad, debido a un exceso de filler, envejecimiento asfáltico, entre otros. Generalmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes. Donde la mezcla tiende a rigidizarse.
- Defectuosa ejecución de las juntas transversales de construcción de las capas asfálticas de superficie.
- Reflexión de grietas de capas subyacentes, por ejemplo en sobrecapas o pavimentos compuestos.



**Figura 16.** Deterioro por agrietamiento transversal en pavimentos flexibles y semi-rígidos.  
Fuente: Dirección de Vialidad y Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2016.

## Baches

Esta patología corresponden a una cavidad generalmente redondeada, y que es formada por el desprendimiento de la mezcla asfáltica. De acuerdo con Hurtado (2016), para que esta cavidad sea considerada como bache, al menos una de sus dimensiones debe tener como mínimo 150 mm. Los baches pueden ser generados por múltiples razones, dentro de sus principales se encuentran: una estructura de pavimento insuficiente, un drenaje inadecuado, defectos constructivos, ó por derrame de solventes desfavorables para la estructura, según dicho autor. Ver figura 17.



**Figura 17.** Deterioro por baches en pavimentos flexibles y semi-rígidos.  
Fuente: RTPÉ Multimedios, 2016.

### Ahuellamiento o roderas

De acuerdo con Hurtado (2016), estos fenómenos se caracterizan por una depresión ubicada en la zona por la que transitan las llantas de los vehículos. Normalmente, se presenta una elevación de las áreas adyacentes respecto a esta zona deprimida. Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento, y posibilitar el hidroplaneo de los vehículos, por el almacenamiento de agua en la estructura.

Este tipo de deterioro puede darse debido a la deformación permanente (plástica) de alguna de las capas del pavimento. Además, se asocia con mezclas de alto contenido de asfalto, climas calientes, inadecuados procesos de compactación ó insuficiente capacidad portante de las capas. Ver figura 18.



**Figura 18.** Deterioro por roderas o ahuellamientos en pavimentos flexibles y semi-rígidos.  
Fuente: «Diccionario de Geotecnia OnLine», 2020.

## Exudación

Exudación se define, según (Miranda, 2010a), como una película o afloramiento del ligante asfáltico, que generalmente es brillante, resbaladiza y pegajosa. La exudación podría afectar la resistencia al deslizamiento y se presenta sobre la superficie del pavimento.

Generalmente su aparición se debe a que la mezcla bituminosa posee grandes cantidades de asfalto (mayores a las requeridas en el diseño), provocando un bajo porcentaje de vacíos de aire en la mezcla y generando que el ligante migre a la superficie.. Usualmente, la exudación sucede en épocas y/o zonas muy calurosas.



**Figura 19.** Deterioro por exudación en pavimentos flexibles y semi-rígidos.  
Fuente: Centro de Investigación en Tecnologías Viales, 2018.

## Deterioros en Pavimentos Rígidos

### Agrietamiento longitudinal

Miranda (2010a) menciona que este agrietamiento corresponde a una fractura de la losa que ocurre aproximadamente de forma paralela al eje de la carretera, dividiéndola en dos planos. Esto es generado típicamente por diferentes factores como: repetición de cargas de gran magnitud, gradientes de tensión originados por cambios de temperatura y humedad, pérdida de soporte de la fundación, ó por deficiencias en la construcción de éstas y/o sus juntas longitudinales. Ver figura 20.



**Figura 20.** Deterioro por agrietamiento longitudinal en pavimentos rígidos.  
Fuente: Universidad Nacional de Colombia y Ministerio de Transporte de Colombia, 2016.

### Agrietamiento transversal

El agrietamiento transversal corresponde al fracturamiento de la losa que se presenta aproximadamente perpendicular al eje del pavimento, dividiéndola en dos planos. Ver figura 21. De acuerdo con Miranda (2010a), estas grietas son causadas por la combinación de factores como:

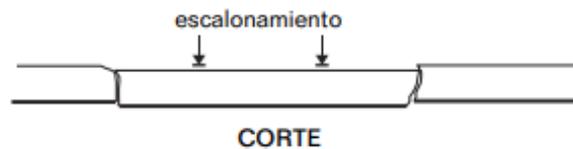
- Repeticiones excesivas de carga pesadas.
- Deficiente apoyo de las losas.
- Asentamientos de la fundación.
- Ausencia de juntas transversales.
- Excesiva relación longitud/ancho de la losa, ó deficiencias en la ejecución de las mismas.
- Variación significativa en el espesor de las losas adyacentes.



**Figura 21.** Deterioro por agrietamiento transversal en pavimentos rígidos.  
Fuente: Dirección Nacional de la República de Chile, 2002.

## Escalonamiento

De acuerdo a lo mencionado por Sánchez (2009), este deterioro corresponde a una falla meramente provocada por el tránsito. Donde una losa de pavimento presenta un desnivel notorio con respecto a su losa adyacente, pudiendo darse la aparición de fisuras. También se puede agravar por bombeo de finos y falla de juntas transversales. Por otra parte, según Miranda (2010b), este deterioro está ligado a la insuficiente capacidad portante de la capa de apoyo, ó al deficiente confinamiento entre losas adyacentes. Ver figura 22.



**Figura 22.** Deterioro por escalonamiento en pavimentos rígidos.

Fuente: Dirección Nacional de la República de Chile, 2002.

## Pérdida de sello de juntas

Sánchez (2009) indica que la pérdida de sello en las juntas, hace referencia a cualquier condición que permita la acumulación de material en la zona de conexión de las losas, así como la posibilidad de infiltración de agua. Este deterioro es causado por múltiples factores como: el endurecimiento por oxidación del material de sello, la pérdida de adherencia en los bordes de las losas, levantamientos del material del sello por efecto del tránsito y de movimientos en las losas, escasez o falta de este material, ó inclusive por la incorrecta aplicación del mismo. Ver figura 23.

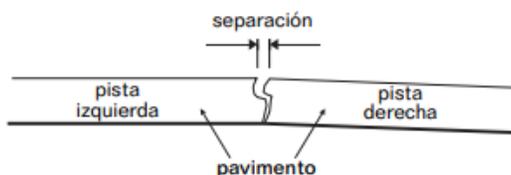


**Figura 23.** Deterioro por pérdida de sello en las juntas de las losas en pavimentos rígidos.

Fuente: Dirección Nacional de la República de Chile, 2002.

## Separación de losas

Corresponde a una abertura de la junta longitudinal del pavimento. De acuerdo con Miranda (2010a), este tipo de daño se presenta en gran proporción de los pavimentos rígidos y ocurre, principalmente, por causa de la expansión o contracción diferencial de las losas, debido a la ausencia de dovelas. También se puede presentar por el desplazamiento lateral de las losas, propiciado por un asentamiento diferencial en la sub-rasante. Ver figuras 24 y 25.



**Figura 24.** Deterioro por separación de losas en pavimentos rígidos.  
Fuente: Dirección Nacional de la República de Chile, 2002.



**Figura 25.** Deterioro por separación de losas en pavimentos rígidos.  
Fuente: Dirección Nacional de la República de Chile, 2002.

## Bombeo de finos

El bombeo de finos, según Sánchez (2009), corresponde a la pérdida de finos por expulsión a través de las juntas o fisuras. Este escape se presenta debido a la deflexión que sufre la losa por el paso de cargas vehiculares. El agua expulsada arrastra consigo partículas de grava, arena, arcillas o limos generando la pérdida de capacidad de soporte de las losas de concreto. “El bombeo se evidencia mediante la observación del material que aparece ya sea, en juntas o en fisuras de la losa, así como en la superficie del pavimento” (Sánchez, 2009). Ver figura 26.



**Figura 26.** Deterioro por bombeo de finos en pavimentos rígidos.  
Fuente: Centro de Investigación en Tecnologías Viales, 2018.

## **Técnicas, mecanismos y medidas de conservación del pavimento**

Dentro de las técnicas de mantenimiento, principalmente se encuentran dos grupos: las actividades correctivas y las actividades preventivas. Las últimas mencionadas corresponden a medidas que son implementadas para evitar o prever la aparición de una falla, con el objetivo de conservar su servicialidad. Las actividades correctivas se realizan para reparar una falla presentada en el pavimento, con el fin de mejorar su utilidad.

Según Hurtado (2016), los principales mecanismos de intervención para la conservación y reparación del deterioro en los pavimentos son las siguientes:

### **Pavimentos Flexibles y Semi-rígidos**

#### **Bacheo superficial**

Consiste en la conformación de la capa existente, mediante remoción de la mezcla hasta la profundidad en que se encuentre sana (sin grietas), para luego cortar, colocar y compactar el material de nuevo, de una calidad igual o superior; ya sea de forma manual o mecanizada. Su objetivo es disminuir o retardar el desarrollo de daños severos en el pavimento. A su vez, sirve para impermeabilizar la superficie de ruedo, de modo que el paso del agua hacia la estructura sea obstruido. También permite evitar accidentes de tránsito.

Esta actividad es muy común para reparación de la superficie compuesta por irregularidades en zonas puntuales, particularmente en áreas agrietadas en forma de arco ó conformadas por bloques pequeños con anchos de grieta mayores a 20 mm, agrietamientos cuero de lagarto de severidad baja y con una profundidad menor de 50 mm.

## Bacheo profundo o mayor

Consiste en excavar hasta una profundidad que excede el espesor de la capa asfáltica, recortando así las paredes de forma vertical. Finaliza con la compactación del fondo hasta alcanzar el 95 % de proctor modificado, de acuerdo con AASHTO T180; eventualmente puede requerir la sustitución del material de base. El bacheo profundo normalmente se realiza en áreas agrietadas por fatiga, con grietas y fisuras interconectadas de severidad media y alta, que poseen una profundidad mayor a los 50 mm.

## Sellado de grietas o fisuras

Corresponde a una actividad de mantenimiento preventivo, la cual debe aplicarse cuando las grietas o fisuras son visibles en el pavimento. Tiene como objetivo impedir la entrada de agua y de materiales presentes en la superficie de ruedo, para retardar la aparición de agrietamientos más severos, como los de cuero de lagarto o huecos de gran magnitud.

El proceso consiste en rellenar las fisuras con concreto asfáltico, utilizando agregado de graduación fina. En caso de que el borde del pavimento se encuentre asentado, se nivelan dichos bordes y se compactan, quedando así bordes limpios y rectos.

## Sellos y tratamientos superficiales asfálticos

Estos mecanismos son utilizados para la conservación de pavimentos asfálticos, así como para su impermeabilización y protección de la superficie de rodadura, puesto que evita que las superficies asfálticas deterioradas se desintegren. Además, aporta una superficie antideslizante. Los sellos y tratamientos superficiales asfálticos tiene como principal objetivo proteger la capa de ruedo de la aparición de fisuras o grietas, que con el paso del tiempo podrán ocasionar graves daños en la estructura del pavimento. Estos sellos pueden aplicarse de dos maneras.

- Tratamiento superficial: consiste en la colocación de una capa delgada con agregado fino de tamaño uniforme, distribuido uniformemente sobre un ligante bituminoso y aplicado sobre una superficie. Este revestimiento puede componerse por una o varias capas, tanto de ligante como de dicho agregado fino.
- Sello con lechada asfáltica: corresponde a una mezcla compuesta normalmente de emulsión asfáltica, agregados, aditivos, filler mineral y agua; aplicada sobre la superficie del pavimento.

## Sustitución de capa asfáltica o colocación de sobre capa asfáltica

Este tipo de intervención se basa en la colocación de una capa de mezcla asfáltica en caliente como sustitución de la capa existente ó para ser colocada sobre ella. De acuerdo con Hurtado (2016), esta actividad se realiza cuando se presentan los siguientes tipos de deterioro:

- Áreas agrietadas en forma de arco o conformadas por bloques muy pequeños con anchos de grieta mayores a 20 mm.
- Áreas con agrietamientos de piel de cocodrilo, caracterizado por grietas interconectadas entre sí, con una severidad medio y alto (trozos de menores de 20cm x 20cm); mientras que no provengan de capas subyacentes.
- Pulimientos o desprendimientos de agregado, que cubran áreas significativas de la capa de mezcla asfáltica.
- Deformaciones de la superficie como lo son las roderas o ahuellamientos, que cuenten con más de 2.0 cm de desnivel, mientras que no provengan de las capas subyacentes.

## **Pavimentos Rígidos**

De la misma manera que en la sección anterior, y de acuerdo con Hurtado (2016), se describen las principales acciones de conservación.

### **Sellado de Juntas y Grietas**

Al igual que el sellado de fisuras, juntas y grietas para el pavimento flexible, su fin es el impedimento de la entrada de agua y de materiales no deseados en la superficie del pavimento de concreto hidráulico, impidiendo así que el agua logre adentrarse a las capas inferiores de la capa de ruedo, causando un bombeo de finos e incidiendo en la capacidad de soporte.

### **Reparación de Losas en Espesores Parciales**

Consiste en el arreglo tanto de las fracturas presentes en los bordes y esquinas de las losas, así como de los baches, erosión, desniveles, rugosidad muy notable y otros defectos por deterioro en la superficie del pavimento de concreto.

### **Reparación de Losas en todo el Espesor**

La reparación de las losas en todo su espesor debe realizarse como parte de la conservación periódica del pavimento rígido. Esta actividad se realiza cuando el espesor deteriorado es más que un tercio del espesor de la losa, ó mayor a 100 mm. El proceso consiste en la sustitución de las losas de concreto deterioradas, donde el área de reparación debe abarcar como mínimo el ancho de un carril en dirección transversal y no debe ser menor de 1,8 m en el sentido longitudinal. Esto con el objetivo de subsanar los daños y recobrar las condiciones tanto estructurales como funcionales del pavimento.

## Recalce localizado de losas

Esta intervención consiste recobrar los niveles y pendientes originales de las losas de concreto hidráulico con el fin de recuperar el adecuado funcionamiento estructural y funcional del pavimento. Esta actividad debe realizarse cuando se presente un escalonamiento.

## Costos de la estructura y de su mantenimiento

Los factores monetarios son determinantes para la elección de una estrategia de pavimentación en específico. Se contemplan las diversas variables como: cantidad de tráfico, exposición ante agentes externos, disponibilidad de recursos para el mantenimiento e inversión inicial, entre otras. De manera conjunta se deben poner en una balanza, con el fin de determinar la mayor relación costo-beneficio posible, tanto para el usuario como para la Administración.

De acuerdo con Castro (2019b), entre las diversas tipologías de pavimento, es el rígido el que tiende a presentar un mayor costo de inversión inicial, tomando como partida las mismas condiciones para los demás pavimentos. Mientras que el flexible y el semi-rígido tienden a estar un eslabón abajo, en cuanto a dicha inversión inicial, pero generalmente requieren mayor cantidad de intervenciones a lo largo de su vida útil. Es por esto anterior que para ser comparados se deben generar escenarios de costos a lo largo de su período de funcionamiento. Así, es factible definir estrategias de mantención adecuadas y oportunas para cada tipo.

Específicamente para establecer comparaciones, se pueden utilizar indicadores para la evaluación de proyectos, como lo es el CAUE (Costo Anual Uniforme Equivalente). Que como lo indica Riquelme (2013), este indicador corresponde a todos los ingresos y desembolsos convertidos en una cantidad anual uniforme equivalente que es la misma cada período. Permitiendo comparar estrategias con diferentes períodos de diseño.

# Metodología

## Aspectos preeliminares e investigación del proyecto

Para el desarrollo del proyecto, fue necesario inicialmente el contacto directo con el Laboratorio de Materiales del MOPT, específicamente con el Área de Pavimentos a cargo del Ing. Hugo Chaves. En la cual, como proyecto para este 2020, se encontraba el diseño completo de una estructura de pavimento para la Ruta Nacional 911, específicamente para las secciones de control 50443 y 51170. Así que como parte de los estudios de campo necesarios se toma la decisión de desarrollar tres giras, de las cuales la segunda fue supervisada por profesionales del MOPT y la última fue suspendida producto de la emergencia nacional. Cada una se detalla a continuación:

- **Primera Gira:** la primera gira de un día, consistía en recorrer el proyecto para identificar la condición actual de la ruta y posible información que pudiese fortalecer el proyecto; donde principalmente se notó que la sección a intervenir de 9km contaba con un ancho de carril de aproximadamente 3m, medidos con cinta métrica. Algunos segmentos se encontraban sellados con emulsión asfáltica; se decide identificarlos de forma que se establece el inicio del proyecto con el comienzo de la sección de control 51170 en Potrero, como la estación 0+000, esto ayuda de un reloj Garmin 920xt. A partir de esto, se identifica que de la estación 0+000 a la 2+300 se cuenta con una superficie de ruedo sellada con emulsión; de la 2+300 a la 4+000 se encuentra en lastre; de la 4+000 a 8+500 también con emulsión. Es en esta última estación mencionada adonde se nota la necesidad del diseño de una obra hidráulica (alcantarilla ó puente) para sobrepasar una quebrada presente, externa al alcance del proyecto. Para finalmente llegar a la estación 9+000, frente a la Plaza de Deportes de Nuevo Colón. La información gráfica de lo detallado se encuentra en el Apéndice 1.

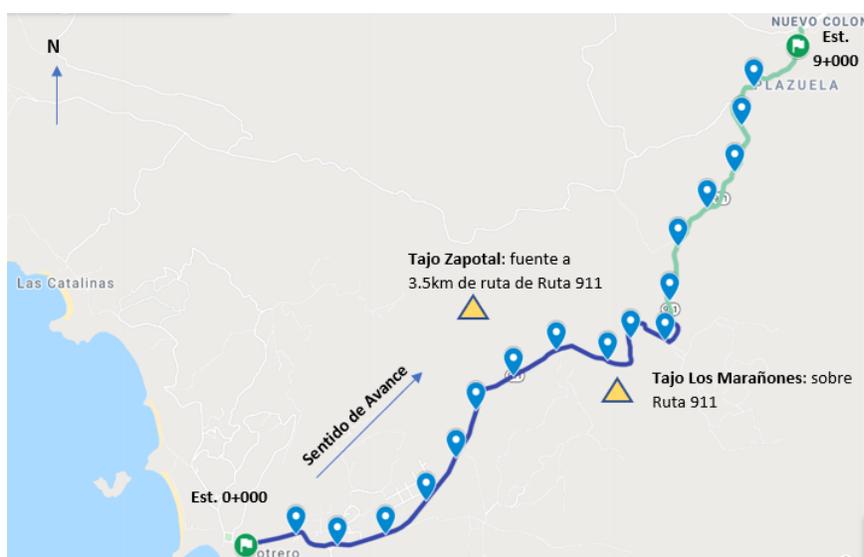
Lo anterior descrito, llevó a generar una investigación sobre los posibles trabajos realizados por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), específicamente por el Departamento de Conservación. Por lo que se indaga en la plataforma del Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP) adonde se encuentra la licitación pública 2018LA-000011-0006000001 titulada: "TRABAJOS PARA LA ATENCIÓN DE LA RUTA NACIONAL No. 911 (EN LASTRE), SECCIONES DE CONTROL Nos.: 51170 Y 50443 (POTRERO (ENTRADA PRINCIPAL)-NUEVO COLÓN (ESCUELA)), ZONA 2-3".

Específicamente en el Documento de Requerimientos de dicha licitación se encuentran los trabajos solicitados, como lo muestra el Anexo 1, donde se debe resaltar la colocación de subbase graduación especial 2 en 15cm y de emulsión asfáltica para 6km de la ruta, a principios del año 2019. Ante esto se busca establecer contacto con el ingeniero de CONAVI encargado de la zona (Zona de Conservación 2-3), con el fin de obtener la caracterización del material colocado (subbase) por parte de verificación, ya que este

puede ser tomado en cuenta dentro del diseño a generar, aportando capacidad estructural y abaratando costos asociados. El ingeniero de CONAVI amablemente accede y comparte la información expuesta en el Anexo 2.

Es importante rescatar que se evidencian dos fuentes de materiales prácticamente en el centroide del proyecto. Una en la estación 4+500 contigua a la carretera (Tajo los Maraños), donde fue comprada la subbase. Otra a una distancia de 3.5km de la estación 3+000, sobre un desvío privado contiguo a la carretera (Tajo Zapotal). Del último mencionado se establece contacto con el Ing. Jose Alajandro Navarro Campos, el cual amablemente comparte la caracterización del material de base (anexo 3). Finalmente, por parte del Laboratorio de Materiales del MOPT, se cuenta con la caracterización de tres muestras de subrasante (Anexo 5). Se decide generar una caracterización de la subrasante a partir de un ensayo de campo con el propósito de complementar la información disponible.

**Segunda Gira:** en esta gira de 4 días se realiza el ensayo de DCP, con ayuda de personal y equipo (DCP de una masa de 4.6kg, pala, pico y pickup) del Laboratorio de Materiales del MOPT. Por cuestiones de disponibilidad y de equipo se realizan puntos a cada 500m de forma contigua a la calzada, y alternadamente, desde la estación 0+000 a la 9+000. Es importante resaltar que en la primera estación que se generó el ensayo fue la 0+110, además, en la estación 1+500 se presentaron criterios de rechazo en dos ocasiones para distintos puntos, por lo que se procedió a continuar; y en la 8+500 producto de la presencia de una quebrada no se hace el ensayo. Todo lo anterior, con el fin de establecer el índice de CBR para la subrasante presente, y posteriormente relacionarlo con valores de módulos de rigidez. En el Apéndice 2 se presentan fotografías durante la realización del ensayo; y en la figura 27 se representan los estacionamientos donde los ensayos fueron realizados, con ayuda del GPS (Garmin 64S).



**Figura 27.** Puntos de DCP y fuentes de materiales, Ruta Nacional 911 (SC. 50443 & 51170)  
Fuente: Google My Maps, 2020.

- **Tercera Gira:** Esta gira de tres días estaba orientada a la realización de un conteo vehicular, con el fin de determinar el tránsito promedio diario (TPD), pero tuvo que ser suspendida producto de la emergencia nacional ante el COVID-19, por lo que el factor tránsito se cuantificará respecto a conteos vehiculares según MOPT (2019), utilizando la sección de control de 51170, que es de un mayor flujo vehicular y que se muestra en el Anexo 3.

## Procesamiento de información de ensayo de DCP

Para el ensayo DCP realizado y explicado en el inciso anterior, se debe generar un procesamiento de los datos con la finalidad de dar con el índice de DCP, para posteriormente ser correlacionado con el índice de CBR y finalmente con el módulo de rigidez de la subrasante. El procedimiento seguido, de acuerdo con ASTM (2018), se detalla en seguida:

1. Primeramente durante el ensayo se toman los datos de sitio relevantes (ubicación del punto, sección de control, fecha, tipo de martillo). Los cuales deben ser evidenciados en el informe; así como las lecturas de penetración acumulada y número de golpes.
2. Con los datos citados anteriormente, es posible construir una gráfica de la profundidad acumulada en función del número de golpes acumulados (suma de golpes para llegar a cierta penetración acumulada). Con ayuda de rectas de mejor ajuste, se deben visualizar los cambios de pendiente evidentes (cambios de estrato) que se presentan en el gráfico, con un criterio para cada ecuación de ajuste de un  $R^2$  de 0.98 como mínimo.
3. Con los estratos definidos a partir de la recta de mejor ajuste, se puede determinar su pendiente, la cual expresa un valor de (penetración/golpe), con lo cuál según ASTM (2018) se puede determinar un Índice DCP como:

$$DCP = (\text{penetración/golpe}) \cdot (\text{Factor del Martillo})$$

Donde:

DCP: índice de DCP (unidad de longitud/golpe)

Factor del Martillo: toma un valor de 2 para martillos de 4.6 kg.

4. Con los índices DCP calculados para cada estrato, es posible calcular el índice de CBR, con la relación expuesta en el marco teórico y aplicable para la mayoría de los tipos de suelo, donde:

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$$

Donde:

CBR: Índice de Soporte de California (%)

DCP: Índice de DCP (mm/golpe)

5. Lo anterior aplicado a cada una de las estaciones donde se realizó el ensayo (apéndice 3).

# División de proyecto en secciones homogéneas

## Módulo de rigidez equivalente de la subrasante

La gran variabilidad de estratigrafía entre estacionamientos, llevó a utilizar el criterio de CBR ó módulo de rigidez equivalente. Según lo detallado por Castro (2020c) se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. De todos los CBR obtenidos (para cada uno de los estacionamientos y sus respectivos estratos), se determina el promedio del mismo. Con dicho promedio y con ayuda de la gráfica expuesta por Huang (2004) (Apéndice 4b), se determina un módulo de rigidez en libras por pulgada cuadrada “psi” de la subrasante (que contempla todos los estratos presentes y el cual, según Castro (2020c), debe ser reducido en un tercio del valor obtenido; como factor de variación estacional, pues los muestreos se hicieron en la estación seca).
2. Con este valor de rigidez de la subrasante, y tomando como base los mismos parámetros de entrada para el diseño de una estructura de pavimento, según la metodología AASHTO 93 (que se detallará más adelante), se genera una estructura de pavimento flexible uniforme. La cuál es puesta sobre cada estacionamiento (con sus estratos originales) y se busca la deformación vertical por compresión máxima ( $\epsilon_t$ ) a 60cm (donde hay evidencia de que aún hay estratos inferiores; esto por medio de la ayuda de un software de multicapa elástica, como lo es 3DMOVE de la Universidad de Nevada en Reno). Posteriormente, se quitan todos los estratos (capas de subrasante) y se busca por medio de un proceso iterativo, el módulo de rigidez equivalente (una sola capa de subrasante) que genere la misma deformación vertical por compresión a la misma profundidad de 60cm. Lo anterior con una diferencia inferior a 0.2% del valor obtenido.
3. Esto se hace con la finalidad de establecer un módulo de rigidez equivalente por cada estacionamiento, para posteriormente aplicar el concepto de secciones homogéneas. La información y proceso de lo anterior descrito se puede evidenciar en el Apéndice 4.

## Secciones homogéneas

Para el caso de la división en secciones homogéneas, se utiliza un criterio de validez estadística, como lo es la Prueba de Hipótesis, detallada en el marco teórico. Se detalla paso a paso.

1. Se evalúa visualmente la posibilidad de establecer grupos de estaciones que compartan módulos de rigidez con similitud (de forma preliminar bajo un criterio únicamente visual); esto con la ayuda de la Figura d, perteneciente al Apéndice 4. De estos grupos inicialmente definidos, se debe calcular el promedio ( $\bar{x}$ ), número de datos (n) y varianza ( $s^2$ ).
2. Esta prueba, al evaluar que no existen diferencias significativas entre promedios y varianzas de dos poblaciones, a partir de los parámetros muestrales permite comprobar si hay

evidencia de que las muestras provienen de diferentes poblaciones. Se debe establecer una hipótesis nula y otra alternativa tanto para medias como para varianzas, utilizando parámetros muestrales como lo indica Moore (1994).

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para el caso de las varianzas muestrales se puede establecer:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

3. Con los grupos segmentados (visualmente), con sus parámetros estadísticos simples calculados y con las hipótesis planteadas, es posible el cálculo de los estadísticos de comparación, donde para el caso de las medias se utiliza un estadístico “t” (como se explica en el marco teórico, y que es la relación entre la diferencia de las medias y el error estándar); y para las varianzas un estadístico “F” (relación entre varianzas), que se calculan como se muestra en seguida.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Para el caso de las varianzas muestrales, el estadístico “F” se determina:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

4. Con los estadísticos calculados, es posible incurrir en el cálculo del Valor “P” (P-Value), el cual es típico de cada tipo distribución y de los grados de libertad de cada muestra (n-1). Comúnmente este valor es calculado por medio de tablas expuestas de libros de Estadística (ya que involucra cálculos de áreas bajo la curva de la distribución definida), ó bien utilizando herramientas tecnológicas; en este caso se calcula por medio de la herramienta de Excel. Donde:

- Para el caso de las medias, para el cálculo del Valor “P”, se utiliza la siguiente función con sus respectivos parámetros de entrada: DISTR.T.CD(t; (n<sub>1</sub>-1) grados de libertad muestra 1; (n<sub>2</sub>-1) grados de libertad muestra 2).
- Para el caso de las varianzas, para el cálculo del Valor “P”, se utiliza la siguiente función con sus respectivos parámetros de entrada: DISTR.F.CD(F; (n<sub>1</sub>-1) grados de libertad muestra 1; (n<sub>2</sub>-1) grados de libertad muestra 2).

5. Esto para al final evaluar las hipótesis a un 90 % de confiabilidad, donde, para el caso de las medias, se evalúa a dos colas producto del tipo de distribución. Teniéndose, a modo resumen, para el caso de las medias:

$$\text{P-Value} \geq 0.05 \Rightarrow \text{no se rechaza } H_0$$

$$\text{P-Value} < 0.05 \Rightarrow \text{se rechaza } H_0, \text{ se recae en } H_1$$

Mientras que para las varianzas:

$$\text{P-Value} \geq 0.10 \Rightarrow \text{no se rechaza } H_0$$

$$\text{P-Value} < 0.10 \Rightarrow \text{se rechaza } H_0, \text{ se recae en } H_1$$

6. Importante recalcar que para que no existan diferencias significativas (no haya evidencia que las muestras provengan de diferentes poblaciones), que ameriten la segmentación, se debe cumplir la hipótesis nula tanto para varianzas como para medias. Esta prueba es aplicada entre cada par de grupos segmentados (visualmente), con el fin de establecer de manera fundamentada la menor cantidad de segmentos homogéneos, en pro de una facilidad en el proceso constructivo. El cálculo y escenarios evaluados se evidencian en el Apéndice 5.

## Metodología de diseño de pavimentos AASHTO 93

La adopción de metodologías de diseño estadounidenses por parte de países latinoamericanos, no ha sido una excepción en el tema de pavimentos en Costa Rica, por lo que actualmente la guía que rige los lineamientos de diseño es la Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93. Así que de manera secuencial se detallan las consideraciones y métodos utilizados, dividiéndose en dos secciones preponderantes, la de pavimentos flexibles y semi-rígidos, y la sección de pavimentos rígidos.

### Pavimentos flexibles y semi-rígidos

Para el caso de la implementación de dicha metodología en estos tipos de pavimento y para facilidad en el manejo de datos, se decide generar una hoja de cálculo por medio de la herramienta Excel, que permita sintetizar cada uno de los diseños generados. Así que, en secuencia para el diseño, se sigue:

1. Ejes equivalentes de carga (EEQ):
  - a) Al suspenderse la gira para la realización de un conteo vehicular, con el fin de obtener una cuantificación del tránsito promedio diario, se utilizan valores de anuarios de la Dirección Sectorial de Planificación del MOPT, para la sección de control 51170 de la presente ruta. Esta cuantificación se relaciona con una tasa de crecimiento

obtenida a partir de datos del crecimiento de la flota vehicular en Costa Rica, según INEC (2019), con la cual se determina una cantidad de tránsito para el año de diseño. Dicha tasa es calculada en función del tipo de vehículo, con el fin de desarrollar un crecimiento más representativo, y según lo expone Aguilar (2020):

$$\text{Tasa de Crecimiento} = \left( \frac{\text{Valor presente}}{\text{Valor pasado}} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} - 1$$

Donde:

Valor presente: cantidad de vehículos en periodo más reciente de referencia.

Valor pasado: cantidad de vehículos en periodo pasado al valor presente.

n: diferencia entre períodos.

El cálculo anterior se presenta en el Apéndice 6.

- b) Para la conversión del conteo vehicular en pasadas de ejes equivalentes es posible utilizar lo establecido por Castro (2007), Oficio DVOP-5170-07. Donde se exponen los siguientes factores camión:

**Cuadro 1.** Factores camión según Oficio DVOP-5170-07

Tipo de Vehículo	Factor Camión
Livianos	0.001
Carga Liviana	0.010
Buses	1.710
C2	0.630
C3	1.710

Fuente: Castro, 2007.

- c) Teniendo la cantidad de vehículos, su respectiva distribución y los factores camión asociados, es posible generar el cálculo de los ejes equivalentes diarios (EEQ Diarios) y anuales (EEQ Anuales) para cada tipo de vehículo de la siguiente forma.

$$\text{EEQ Diarios} = \text{TPD} \cdot \text{Factor Camión} \quad (1)$$

$$\text{EEQ Anuales} = \text{EEQ Diarios} \cdot 365 \text{ días} \quad (2)$$

- d) Para obtener los EEQ de diseño para cada tipo de vehículo, se deben contemplar tres factores fundamentales como lo son: factor de crecimiento, factor direccional y factor de distribución por carril. El primero es obtenido a través de la Tabla D.20 de la Guía de Diseño AASHTO (1993), con el período de diseño (15 años) y una tasa de crecimiento anual del tráfico, la cual se utiliza como un 4 %, que corresponde al promedio ponderado de las tasas calculadas para cada tipo de vehículo. Además, el valor concuerda con lo expuesto por Leiva (2006), quien establece que para carreteras de bajo volumen las tasas de crecimiento rondan entre un 4 % y 6 %, por lo que no se desvía de la realidad del proyecto y se tiene un factor de crecimiento de

20.02 para 15 años. El segundo factor involucra la dirección del flujo vehicular, por lo que al tener dos sentidos se supone una distribución del tránsito (50 % / 50 %), siendo el factor 50 %. Por último, el factor carril corresponde a un 100 %, ya que la carretera cuenta con un solo carril por sentido, siendo este el carril de diseño. Teniéndose:

$$\text{EEQ Diseño (por tipo de vehículo)} = \text{EEQ Anuales} \cdot \text{Factor Crecimiento} \cdot 0.50 \cdot 1.00$$

- e) Para de forma final realizar la sumatoria de todos los EEQ de diseño (por tipo de vehículo), con el fin de obtener los EEQ de diseño en el carril.
2. Módulos de rigidez de los materiales que conforman las capas de la estructura de pavimento:
- a) Subrasante: Con todo el procesamiento de los datos provenientes del DCP, cálculo del módulo de rigidez equivalente y seccionamiento homogéneo, se establece un módulo de rigidez de subrasante para cada sección, expuesto en el Apéndice 5.
  - b) Subbase granular: En el caso de este material, al ya haber una capa colocada de 15cm en parte del proyecto (como fue explicado), se consigue la caracterización del mismo, para contemplarlo en el diseño. Además, si se ocupa adquirir más, se asume la misma fuente (al estar sobre la ruta). Sumado a esto se establece la hipótesis de que el material colocado en 2019 no ha tenido pérdidas significativas en su capacidad portante. Así que con ayuda del Anexo 2 y del Apéndice 7 se establece un módulo de rigidez para la subbase (17000 psi).
  - c) Base granular: En este caso se consigue la caracterización de una base perteneciente a una fuente bastante próxima al proyecto, con un valor de CBR igual al mínimo establecido por el CR-2010 (Anexo 3). Así que con ayuda de dicho anexo y del Apéndice 7 se establece un módulo de rigidez para la base (28000 psi).
  - d) Base estabilizada con cemento: En este caso se plantea la premisa de utilizar una base estabilizada con cemento hidráulico BE-25. De acuerdo con Castro (2019c) y CR-2010 (sección 302), este material debe alcanzar una resistencia a la compresión promedio de  $30 \text{ kg/cm}^2$  cuando es fallado a los 7 días. Así que con ayuda del Apéndice 7, se establece un módulo de rigidez para la base estabilizada con cemento (625000 psi).
  - e) Carpeta asfáltica: Se propone utilizar una mezcla convencional (sin ser modificada con polímeros) con un módulo de rigidez asociado de 450000 psi, típico en mezclas convencionales a nivel nacional.
  - f) A partir del mismo Apéndice 7, se pueden establecer los coeficientes estructurales ( $a_i$ ) requeridos por la metodología, a saber: subbase (0.12), base (0.14), base estabilizada (0.16), carpeta asfáltica (0.44).
3. El Nivel de Confianza se define de acuerdo con el Oficio DVOP-5170-07, según Castro (2007), donde se tiene un TPD entre el rango de 500 a 2000 y se trata de una ruta

terciaria, por lo que se asigna un valor de 75 %, que concuerda con lo establecido por AASHTO (1993), en su sección de diseño de pavimentos flexibles (Tabla 2.2 de dicha guía), donde evidencia que para una zona rural una ruta colectora debe ser diseñada bajo niveles de confianza entre 75 % a 95 %. A partir de esto, se puede asignar un estadístico ( $Z_R$ ), de la Tabla 11.15 de dicha guía, de -0.674 para el nivel de confianza establecido.

4. Para el caso de la desviación estándar de desempeño ( $S_o$ ) y de acuerdo con la Guía AASHTO 93, se establece un valor entre 0.45 y 0.50. Así que según Elizondo (2013), es recomendable utilizar 0.45 para el pavimento flexible y 0.40 para el semi-rígido.
5. En cuanto al índice de servicio inicial ( $P_o$ ), la Guía de Diseño AASHTO (1993) en su sección 2.2.1, define que a partir de observaciones se ha definido un valor de 4.2 para pavimentos flexibles, mientras que para semi-rígidos, según Elizondo (2013), es recomendable utilizar 4.3. Para el índice de servicio terminal ( $P_t$ ), dicha guía explícitamente expone que para carreteras de poco tráfico se recomienda un valor 2.0. Este valor se utiliza para ambos.
6. Coeficiente de drenaje ( $m_i$ ); en relación a lo expuesto en la Guía de AASHTO (1993) en su sección 2 (Tabla 2.4), se decide que se cuenta con un buen sistema de drenaje y un porcentaje de exposición de la estructura de pavimento a la humedad superior al 25 %. Siendo así, este coeficiente toma un valor de 1, tanto para la base como para la subbase.
7. Con los valores de entrada definidos es posible calcular el número estructural de cada capa ( $SN_i$ ), esto por medio de la ecuación expuesta por AASHTO (1993). Donde para resolverla se va iterando el número estructural de cada capa ( $SN_i$ ), hasta obtener una diferencia en milésimas, entre ambos lados de la ecuación, ya que los demás parámetros se pueden determinar como se indica en los pasos previos.

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

Donde:

$W_{18}$ : cantidad de pasadas de ejes equivalentes (8.2 toneladas).

$Z_R$ : Estadístico asociado al nivel de confianza.

$S_o$ : Desviación estándar de desempeño.

SN: Número estructural para cada capa.

$\Delta PSI$ : diferencia de índices de servicio (inicial - terminal).

$M_R$ : Módulo de rigidez de la capa inferior (ejemplo: si se calcula el número de carpeta ( $SN_1$ ), se utiliza el módulo de la base)(psi).

8. Espesores requeridos de capas de estructura: con los números estructurales requeridos es posible generar un cálculo de forma secuencial como lo expresa AASHTO (1993):

- a) Espesor de carpeta ( $D_1$ ) (in): se puede determinar con ayuda del número estructural  $SN_1$  requerido (calculado de la iteración en ecuación), y el coeficiente estructural de la carpeta ( $a_1$ ):

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1}$$

A partir de esto se puede proponer un espesor de carpeta ( $D_1^*$ ), igual o mayor al requerido, teniendo un número estructural ligado a dicho espesor propuesto ( $SN_1^*$ ), donde se debe cumplir:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

- b) Espesor de base ( $D_2$ ) (in): se puede determinar con ayuda del número estructural requerido para la base ( $SN_2$ ) (calculado de la iteración en ecuación),  $SN_1^*$ , el coeficiente estructural de la base ( $a_2$ ) y el coeficiente de drenaje de la base ( $m_2$ ). de la manera:

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2}$$

De la misma forma es posible proponer un espesor de base ( $D_2^*$ ), igual o mayor al requerido, con un número estructural ligado ( $SN_2^*$ ). Se debe comprobar:

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2}$$

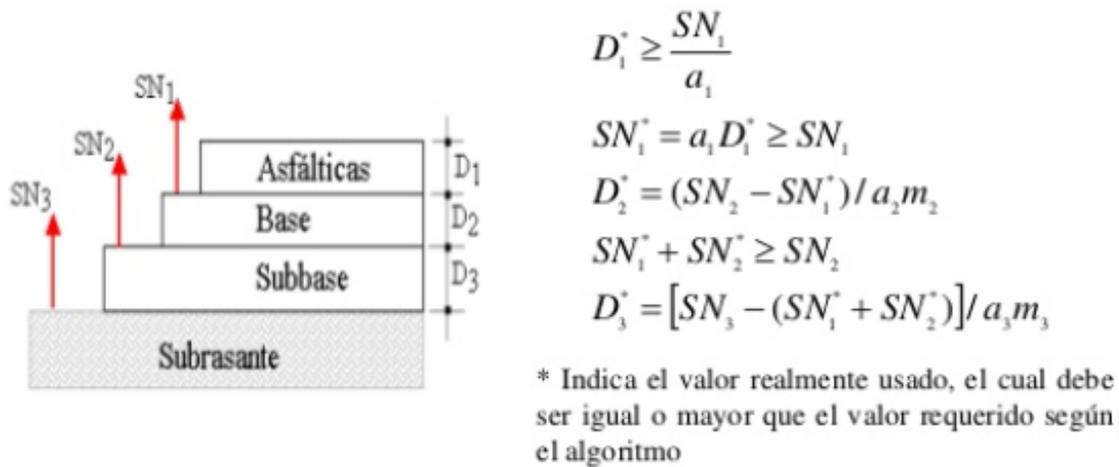
$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

- c) Espesor de sub-base ( $D_3$ ) (in): se puede determinar con ayuda del número estructural requerido para la sub-base ( $SN_3$ ) (calculado de la iteración en ecuación),  $SN_1^*$ ,  $SN_2^*$ , el coeficiente estructural de la sub-base ( $a_3$ ) y el coeficiente de drenaje de la sub-base ( $m_3$ ); de la siguiente manera:

$$D_3 = \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 \cdot m_3}$$

Donde el espesor aplicado ( $D_3^*$ ) debe ser mayor ó igual al requerido ( $D_3$ ).

9. Para de esta forma asegurarse que el número global asignado de toda la estructura es mayor al requerido. Este proceso puede ser sintetizado en la Figura 28.



**Figura 28.** Determinación de espesores de acuerdo a AASHTO (1993)

Fuente: Sánchez, 2016.

## Pavimentos Rígidos

De la misma manera que el apartado anterior, para el caso de la implementación de la metodología AASHTO 93 en estos tipos de pavimento, para facilidad en el manejo de datos, se decide generar una hoja de cálculo por medio de la herramienta Excel, que permita sintetizar cada uno de los diseños generados.

1. Ejes equivalentes de carga (EEQ), para este tipo de pavimentos, típicamente se tiene el concepto de que existe una variación respecto a los ejes equivalentes de diseño calculados para el pavimento flexible. Esto basado en el simple hecho de que los factores de equivalencia de carga (que permiten cuantificar el daño ó pérdida de serviciabilidad) para los pavimentos flexibles son distintos a los del rígido.

Respecto a este tema, la Guía de AASHTO (1993), únicamente hace hincapié en su capítulo de diseño de sobrecapas (5.2.3), donde expresa una función de regresión explícita que dicta que los EEQ de diseño de los pavimentos rígidos se pueden obtener a partir de los del flexible, dividiendo por 0.67 estos últimos. Además, dentro de lo investigado se puede hacer referencia a los factores camión expuestos por parte del CONAVI (2017), en los carteles para la rehabilitación de la Ruta Nacional 1 (Barranca- Limonal), donde para el caso de los pavimentos rígidos se exponen los siguientes factores: (Liviano: 0.005, Carga Liviana:0.01, Autobús: 3.05, C2: 0.63, C3: 1.71), que difieren de los del flexible.

Sin embargo ante lo discutido con Castro (2020b), se decide utilizar los mismos factores de los pavimentos flexibles para el diseño definitivo, pero generar un dimensionamiento utilizando la acotación de la AASHTO, para evidenciar los posibles cambios. Además por recomendaciones de AASHTO (1993), para los pavimentos rígidos, no es recomendable utilizar periodos de diseño inferiores a 20 años. Lo que genera que para este tipo se establezca un periodo de 20 años, con un factor de crecimiento de 29.78 (manteniendo las demás condiciones del flexible).

2. Dentro de las consideraciones para el caso del concreto hidráulico, se decide establecer una resistencia a la compresión a los 28 días ( $f'c$ ) de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , que cumple con la mínima resistencia establecida por el CR-2010 (sección 501). Además, se debe cumplir un módulo de ruptura ( $S_c$ ) mínimo de  $45 \text{ kg/cm}^2$ , establecido por el mismo manual. Para el cálculo del módulo de rigidez ( $M_R$ ) y de ruptura del material se exponen las siguientes correlaciones, según Castro (2019a):

$$E_c = 57000 \cdot (f'c)^{0.5}$$

Donde:

$E_c$ : módulo de rigidez del concreto hidráulico (psi).

$f'c$ : resistencia a la compresión del concreto hidráulico a los 28 días (psi).

$$S_c = \frac{43.5 \cdot E_c}{10^6} + 488.5$$

Donde:

$S_c$ : módulo de ruptura del concreto hidráulico (psi).

$E_c$ : módulo de rigidez del concreto hidráulico (psi).

3. Bajo las mismas condiciones que en la sección de pavimento flexible y semi-rígido, se establece un nivel de confianza del 75 %, con un estadístico ( $Z_R$ ) asociado de -0.674.
4. Para el caso de la desviación estándar de desempeño ( $S_o$ ), y de acuerdo con la Guía AASHTO 93, se establece un valor entre 0.30 y 0.40. Así que según Castro (2019a), es recomendable utilizar 0.35 para el pavimento rígido.
5. En cuanto al índice de servicio inicial ( $P_o$ ), la Guía de Diseño AASHTO (1993) en su sección 2.2.1, ha definido un valor de 4.5 para pavimentos rígidos. Para el Índice de servicio terminal ( $P_t$ ) se mantienen las condiciones del pavimento flexible.
6. Coeficiente de drenaje ( $C_d$ ); en relación a lo expuesto en la Guía de AASHTO (1993) en su sección 2 (Tabla 2.5), se cuenta con un buen sistema de drenaje y un porcentaje de exposición de la estructura de pavimento a la humedad superior al 25 %. Siendo así este coeficiente toma un valor de 1.
7. Coeficiente de transferencia de carga (J), en este caso se hace referencia a la Tabla 2.6 de la Guía de AASTHO (1993), donde se considera un pavimento JPCP con dovelas y espaldón asfáltico; para un valor de 3.2.
8. Módulo de reacción compuesto de la subrasante (k) (pci), este parámetro se puede determinar con la Figura 3.3 expuesta en la Guía de AASHTO (1993). Con el módulo de rigidez (psi) de la subrasante, subbase y un espesor de losa (supuesto) (in).

9. De ser necesario se debe hacer una corrección por presencia de estrato rocoso cerca de la superficie (a 10 pies de profundidad como máximo), con ayuda de la figura 3.4 expuesta en la Guía de AASHTO (1993). Pero en este caso se trabaja bajo la premisa, de que no hay evidencia de un estrato rocoso a menos de 10 pies de profundidad medidos desde la superficie.
10. Posteriormente se debe calcular un daño relativo, que contempla la variación estacional de la subrasante, esto con ayuda de la Figura 3.5, expuesta en la Guía de AASHTO (1993). En este caso se trabaja bajo la premisa de que la condición saturada del ensayo de CBR ya, deporsi, representa la condición de menor capacidad de soporte, por lo que se aplica el factor de variación estacional en el DCP.
11. Para de forma consecutiva corregir el módulo de reacción (k), por el factor de pérdida de soporte (LS), según la Figura 3.6 expuesta en la Guía de AASHTO (1993). Para así obtener un módulo de reacción (k) efectivo y corregido por pérdida de soporte. Importante acotar que se establece un valor de LS de 1, de acuerdo con la tabla 12.18 expuesta por Huang (2004) para materiales granulares sin consolidar.

El procedimiento de los cuatro pasos anteriores, es resumido en el Apéndice 8.

12. Finalmente, se procede a la resolución de la ecuación de diseño de pavimentos rígidos, expuesta por AASHTO (1993):

$$\log_{10}W_{18} = Z_R \cdot S_o + 7.35 \cdot \log_{10}(D + 1) - 0.006 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \cdot Pt) \cdot \log_{10} \left[ \frac{S_c \cdot C_d \cdot (D^{0.75} - 1,232)}{215,63 \cdot J \cdot (D^{0.75} - \frac{18,42}{(\frac{E_c}{k})^{0.25}})} \right]$$

Donde:

$W_{18}$ : cantidad de pasadas de ejes equivalentes (8.2 toneladas).

$Z_R$ : estadístico asociado al nivel de confianza.

$S_o$ : desviación estándar de desempeño.

D: espesor de losa de concreto hidráulico (in).

SN: número estructural para cada capa.

$\Delta PSI$ : diferencia de índices de servicio (inicial - terminal).

$P_t$ : índice terminal de servicio.

k: módulo efectivo de reacción de subrasante y corregido por LS (pci).

$S_c$ : módulo de sección del concreto hidráulico (psi).

$E_c$ : módulo de rigidez del concreto hidráulico (psi).

13. Dicha ecuación es posible resolverla a partir de un cálculo iterativo que permita igualar

ambos lados de la ecuación, con ayuda de un espesor de losa supuesto. Esta diferencia con tolerancias de milésimas (0.009 como máximo).

## Diseño de Acero en Pavimentos Rígidos

Para el caso del diseño del acero se sigue lo estipulado por Castro (2019a), quien expone una secuencia de pasos para comprobar el diámetro y separación (supuestos), necesaria para las dovelas y acero longitudinal. Para facilidad del manejo de datos se construye una hoja de Excel.

## Diseño de Dovelas

Primeramente se debe rescatar que al ser un pavimento nuevo se trabajará con la premisa de que la transferencia de carga es cercana al 100 % y se reparte equitativamente en cada losa, por medio de las dovelas. Así que secuencialmente se sigue el siguiente procedimiento.

1. Según Huang (2004), se expone que las dovelas que se encuentran bajo la carga reciben el 100 % de la misma, mientras que las dovelas a una distancia de  $1.8l$  (donde “ $l$ ” es la rigidez relativa) tienen una contribución de carga de cero. Dicha razón de rigidez se calcula como:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot D^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}}$$

Donde:

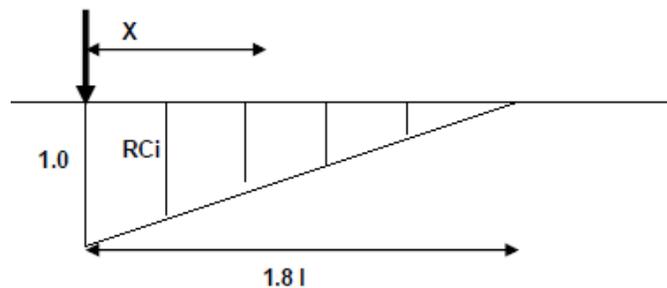
$E_c$ : módulo rigidez concreto hidráulico (psi).

$k$ : módulo de reacción efectivo de subrasante (psi).

$D$ : espesor de losa de concreto hidráulico (in).

$\mu$ : coeficiente de Poisson (0.25).

2. Por relación de triángulos con la distribución de carga explicada y la razón de rigidez (como lo expone la figura), es posible determinar la contribución en cada dovela ( $R_{Ci}$ ) de forma:



**Figura 29.** Contribución de carga en cada dovela  
Fuente: Castro, 2019a.

$$\frac{Rci}{1.8 \cdot l - x} = \frac{1.0}{1.8 \cdot l}$$

Donde:

Rci: contribución en cada dovela.

x: distancia a dovela de interés (in).

1,80 · l: longitud de desarrollo de carga (in).

3. Seguidamente es posible determinar la carga que recibe cada dovela de interés, donde también se deben aplicar principios de superposición, cuando existe más de una carga. Así que se tiene:

$$Pd_i = \frac{P}{ND} \cdot Rci$$

Donde:

Rci: contribución de dovela de interés.

P: carga aplicada (lb).

ND: suma de coeficientes de contribución.

$Pd_i$ : carga en dovela analizada (lb).

Importante destacar que para la definición de la carga “P”, se comparan los diferentes pesos máximos por eje, expuestos en el Reglamento de circulación por carretera con base en el peso y las dimensiones de vehículos de carga, MOPT (2009). Donde la mayor carga, con base en los tipos de vehículos contemplados en el diseño, la daría un eje simple trasero, con un peso máximo permitido de 10 ton. Basado en esto se generaría una carga (P=5000 lb). Contemplando los dos extremos del eje.

4. Se calcula la carga para todas las dovelas activas (dentro de la longitud de desarrollo) y se determina la dovela crítica (la de mayor carga). Con esto definido, se calcula el esfuerzo en ésta, como:

$$\sigma_b = \frac{K_d \cdot Pd_i}{4 \cdot \beta^3 \cdot E \cdot I} \cdot (2 + \beta \cdot z)$$

Donde, el factor  $\beta$  corresponde a:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_d \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}}$$

Donde:

$\sigma_b$ : esfuerzo en dovela (psi).

$Pd_i$ : carga en dovela crítica (lb).

$K_d$ : módulo interacción dovela / concreto (pci).  
I: momento de inercia de dovela ( $in^4$ ).  
z: ancho de junta (in).  
d: diámetro de dovela (in).

5. Para finalmente determinar una resistencia de las dovelas como:

$$f_b = \left[ \frac{4-d}{3} \right] \cdot f'_c$$

Donde:

$f_b$ : resistencia de la dovela (psi).  
d: diámetro de dovela (in).  
 $f'_c$ : resistencia a la compresión del concreto hidráulico a los días (psi).

Y comprobar que la resistencia es inferior o igual al esfuerzo aplicado:

$$f_b \geq \sigma_b$$

## Diseño de Barras de acero longitudinal

En cuanto al acero presente en las juntas longitudinales, según la teoría, se expresa una expresión para el área de acero necesaria por pie (0.30m) lineal, de la forma:

$$A_s = \frac{\gamma_s \cdot D \cdot L' \cdot f_a}{f_s}$$

Donde:

$A_s$ : área de acero por pie lineal ( $in^2/pie$ ).  
 $\gamma_s$ : peso unitario del concreto hidráulico ( $lb/in^3$ ).  
 $f_a$ : coeficiente de fricción losa/ capa soporte (pci).  
 $f_s$ : resistencia al trabajo del acero (psi).  
D: espesor de losa (in).  
L': distancia mínima al borde libre (in).

Dicha área se compara con un área dosificada (área por pie lineal), para verificar si lo requerido es menor o igual a lo impuesto.

# Metodología de Diseño Mecánica-Empírica de Pavimentos

Por medio de diversos modelos de desempeño, que permiten determinar el comportamiento o respuesta de la estructura ante parámetros del entorno, se comprueban los espesores dosificados según la Guía de AASHTO (1993). Estos modelos generalmente van en función de su mecanismo de afección o falla y de las propiedades de los materiales. Para facilidad de interpretación se subdivide esta sección en pavimentos flexibles/semi-rígidos y pavimentos rígidos.

## Pavimentos Flexibles y Semi-rígidos

Para el caso de este tipo de pavimentos los modelos utilizados para evaluarlos son los inmersos en la herramienta de diseño CR-ME, detallada por Trejos y col. (2017); que en sí contiene los modelos de desempeño inmersos en la MEPDG, con algunos conceptos tropicalizados a nivel nacional. Así que a modo secuencial los modelos y parámetros de entrada utilizados, en función de cada capa, son los siguientes:

### Carpeta Asfáltica

Para la evaluación de la carpeta asfáltica, específicamente el proceso de agrietamiento en la misma, se utiliza el modelo dictado por AASHTO (2008), donde:

$$N_f = k_f(C)(C_H)(B_{f1})(\epsilon_t)^{K_{f2} \cdot \beta_{f2}}(E_{HMA})^{K_{f3} \cdot \beta_{f3}}$$

Donde según AASHTO (2008), el factor  $C_H$  (corrección por espesor) depende del tipo de agrietamiento a evaluar, si es de abajo hacia arriba o cuero de lagarto, ó si es de arriba hacia abajo o longitudinal. Donde se calculan respectivamente como:

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot H_{HMA})}}}$$

$$C_H = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 \cdot H_{HMA})}}}$$

Y el factor C se determina como:

$$C = 10^{4.84 \cdot \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69\right)}$$

Donde:

$N_f$ : número de pasadas de ejes equivalentes permitidas antes de la falla.

$\epsilon_t$ : deformación unitaria por tensión (in/in).

$E_{HMA}$ : módulo dinámico de mezcla asfáltica (psi).

$k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}$ : constantes de calibración de campo, respectivamente de: 0.007566, -3.9492, -1.281.

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ : constantes de calibración, todas toman el valor de: 1.0  
 $H_{HMA}$ : espesor de carpeta (in).

A parte de este modelo, AASHTO (2008), presenta una serie de funciones de transferencia que permiten cuantificar el área agrietada en función del tiempo ( $FC_{Abajo-Arriba}$ ) para el caso del agrietamiento tipo cuero de lagarto; así como la longitud de las grietas para el agrietamiento de arriba hacia abajo ( $FC_{Arriba-Abajo}$ ). Esto con base en la hipótesis de Miner, según el autor mencionado, donde se cuantifican índices de daño a través del tiempo (daño acumulado), por medio de:

$$D = \sum_i^k \left( \frac{n_i}{N_{fi}} \right)$$

Donde:

D: índice de daño.

k: periodo de análisis.

$n_i$ : número de pasadas de ejes de magnitud de carga "i", en el periodo analizado.

$N_{fi}$ : número de pasadas de ejes de magnitud de carga "i" permitidas en el periodo.

Con esto definido se pueden cuantificar dichos daños:

$$FC_{Abajo-Arriba} = \left( \frac{1}{60} \right) \cdot \left( \frac{C_3}{1 + e^{(C_1 \cdot C_1^* + C_2 \cdot C_2^* \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right)$$

Donde:

$FC_{Abajo-Arriba}$ : área agrietada tipo cuero de lagarto (% área de carril).

$C_1, C_2, C_3$ : constantes de regresión del modelo, respectivamente de: 1.00, 1.00, 6000.

$C_1^*$ :  $-2 \cdot C_2^*$ .

$C_2^*$ :  $-2.40874 - 39.748 \cdot (1 + H_{HMA})^{-2.856}$

$H_{HMA}$ : espesor de carpeta (in).

D: índice de daño.

$$FC_{Arriba-Abajo} = 10.56 \cdot \left( \frac{C_3}{1 + e^{(C_1 - C_2 \cdot \log_{10}(D))}} \right)$$

Donde:

$FC_{Arriba-Abajo}$ : longitud de grietas (pie/milla).

$C_1, C_2, C_3$ : constantes de regresión del modelo, respectivamente: 7.00, 3.5, 1000.

D: índice de daño.

Ya con el agrietamiento contemplando es posible evaluar el ahuellamiento en la carpeta, donde el modelo expone:

$$\Delta_{p(HMA)} = \varepsilon_{r(HMA)} \cdot h_{HMA} \cdot \beta_{1r} \cdot k_z \cdot 10^{k_{1r}} \cdot n^{k_{2r} \cdot \beta_{2r}} \cdot T^{k_{3r} \cdot \beta_{3r}}$$

Donde específicamente el factor de confinamiento en profundidad ( $k_z$ ) se calcula como:

$$k_z = (C_1 + C_2 \cdot D) \cdot 0.328196^D$$

$$C_1 = -0.1039 \cdot (h_{HMA})^2 + 2.4868 \cdot (h_{HMA}) - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 \cdot (h_{HMA})^2 - 1.7331 \cdot (h_{HMA}) + 27.428$$

Donde:

$\Delta_{p(HMA)}$ : deformación plástica en carpeta (in).

$\varepsilon_{r(HMA)}$ : esfuerzo elástico, calculado por el programa (in/in).

$k_{1r}, k_{2r}, k_{3r}$ : parámetros de calibración, respectivamente: -3.35412, 0.4791, 1.5606.

$\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$ : parámetros de calibración de mezcla en campo, todos toman el valor de: 1.0.

n: número de repeticiones de ejes equivalentes.

$h_{HMA}$ : espesor de carpeta (in).

D: profundidad bajo la superficie (in).

Por otra parte, en caso de los parámetros de entrada, la herramienta (CR-ME) solicita algunas características granulométricas y volumétricas de la mezcla. Para este caso se decide la implementación de una mezcla DG-12, con un tamaño máximo nominal de 12.5mm, según la sección 703-09 de CR-2010. Esto de acuerdo al rango de los espesores de colocación, de acuerdo a los determinados según AASHTO (1993). Además, la Tabla 401-02 del mismo manual, expone los valores mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA), donde para mezclas de tamaño máximo nominal de 12.5mm y un 4% de vacíos, se tiene un VMA mínimo de 14%. Basado en lo anterior se puede construir el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Parámetros de mezcla asfáltica DG-12

Parámetro (unidad)	Valor
Retenido Acumulado en malla No. 3/4 (%)	0.00
Retenido Acumulado en malla No. 3/8 (%)	20.00
Retenido Acumulado en malla No. 4 (%)	52.00
Pasando la malla No.200 (%)	5.00
Contenido de vacíos ( $V_a$ ) (%)	4.00
Contenido efectivo de asfalto ( $V_{bef}$ ) (%)	10.00
Densidad de mezcla ( $kg/m^3$ )	2300
Tipo de asfalto (clasificación por viscosidad)	AC-30

Fuente: CR-2010

Además, Castro (2019c) establece que para mezclas asfálticas, el coeficiente de Poisson tiene un valor característico de: 0.35.

## Base y Subbase Granular

Para el caso de la subbase y base, el programa toma como referencia un modelo que permite cuantificar el ahuellamiento de estas capas, mediante una relación expuesta por MEPDG:

$$\Delta_{p(Suelo)} = \frac{\beta_{s1} \cdot \varepsilon_v \cdot k_{s1} \cdot h_{Suelo} \cdot \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right)}{e^{\left(\frac{\rho}{n}\right)\beta}}$$

Donde:

$\Delta_{p(Suelo)}$ : deformación plástica en subbase ó base (in).

$\beta_{s1}$ : factor de calibración para materiales granulares, valor: 1.0.

$k_{s1}$ : constante para suelos granulares, valor: 1.673.

$h_{Suelo}$ : espesor de capa de base ó subbase (in).

$\varepsilon_o$ : deformación resiliente en laboratorio para obtener  $(\varepsilon_o, \beta, \rho)$ .

$\varepsilon_r$ : deformación promedio en capa de base ó subbase (in/in).

$\varepsilon_o, \beta, \rho$ : propiedades de materiales.

n: número de pasadas de ejes equivalentes.

Por consiguiente, de acuerdo con la caracterización de los materiales y para implementarlos en la herramienta CR-ME se puede hacer referencia a los Anexos 2 y 3, y el Apéndice 7. Además con un valor típico de gravedad específica en función de la naturaleza del material (agregado granular) dado por Das (2012), ya que no se cuenta con dicho ensayo. Teniéndose:

**Cuadro 3.** Parámetros de Subbase Granular

Parámetro (unidad)	Valor
Módulo Resiliente (psi)	17000.00
Densidad seca máxima ( $kg/m^3$ )	2036.00
Humedad Óptima (%)	11.30
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2.65
Pasando la malla No.200 (%)	8.70

Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 4.** Parámetros de Base Granular

Parámetro (unidad)	Valor
Módulo Resiliente (psi)	28000.00
Densidad seca máxima ( $kg/m^3$ )	2122
Humedad Óptima (%)	6.6
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2.64
Pasando la malla No.200 (%)	5.50

Fuente: Autoría propia, 2020.

Además, Castro (2019c) establece que para materiales granulares utilizados como bases ó subbases , el coeficiente de Poisson tiene un valor característico de: 0.40.

## Subrasante

Para el caso de la subrasante, el programa toma como base un modelo que permite cuantificar el ahuellamiento de esta capa de suelo, mediante una relación expuesta por MEPDG:

$$\delta = \left( \frac{1 - e^{(-k \cdot h_{roca})}}{k} \right) \cdot \varepsilon_{p,z=0}$$

Donde la constante de regresión se determina como:

$$k = \frac{1}{6} \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}} \right)$$

Donde:

$\delta_{p(Suelo)}$ : deformación plástica en subrasante (in).

$\varepsilon_{p,z=0}$ : deformación unitaria permanente sobre la superficie (in/in).

$\varepsilon_{p,z=6}$ : deformación unitaria permanente a una profundidad de 6 in (in/in).

$h$ : profundidad a roca firme (in).

Para la elección de parámetros, se evidencian las dos secciones definidas en el apéndice 5. Además de estudios realizados por el Laboratorio de Materiales MOPT (anexo 5), donde:

**Cuadro 5.** Parámetros de Subrasante Sección Homogénea 1

Parámetro (unidad)	Valor
Módulo rigidez equivalente (psi)	2978.71
CBR (%)	2.00
Pasando la malla N 200 (%)	62.00
Índice Plasticidad (IP) (%)	14
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2.70
Densidad Máxima ( $\gamma_s$ ) ( $kg/m_3$ )	1686.00
Humedad Óptima (%)	17.00

Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 6.** Parámetros de Subrasante Sección Homogénea 2

Parámetro (unidad)	Valor
Módulo rigidez equivalente (psi)	4656.58
CBR (%)	3.60
Pasando la malla N 200 (%)	71.00
Índice Plasticidad (IP) (%)	15
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2.69
Densidad Máxima ( $\gamma_s$ ) ( $kg/m_3$ )	1453.00
Humedad Óptima (%)	19.00

Fuente: Autoría propia, 2020.

Castro (2019c) recomienda un valor de coeficiente de Poisson para subrasantes de: 0.45.

## Base estabilizada con cemento

Para el caso de la base estabilizada con cemento se decide evaluarla por aparte, ya que como lo evidencia Trejos y col. (2017) la MEPDG no ha calibrado ningún modelo para evaluar este tipo de materiales estabilizados. Así que se dispone a probar al menos dos modelos para evaluar la fatiga en la fibra inferior, uno calibrado y expuesto por la PCA, según Zhou, Emmanuel y Scullion (2008); y otro por la Guía de Diseño de Pavimentos Australiana, detallado por Leiva (2005). De manera respectiva se presentan los modelos a continuación:

$$N_f = 10^{\left(\frac{k_1 \cdot \beta_{C1} - (\sigma_t / M_{rup})}{k_2 \cdot \beta_{C2}}\right)}$$

Donde:

$N_f$ : número de repeticiones de ejes equivalentes para la falla de la base.

$\sigma_t$ : esfuerzo tensional máximo en fibra inferior de la base (psi).

$M_{rup}$ : módulo de flexotracción del material cementado a los 28 días (psi).

$k_1, k_2$ : constantes de regresión, toman el valor respectivamente de: 0.972 y 0.0825.

$\beta_{C1}, \beta_{C2}$ : constantes de calibración, toman el valor respectivamente de: 1.0645 y 0.9003.

$$N = \frac{\left(\frac{112.664}{E^{0.0804}} + 190.7\right) \cdot 12}{\varepsilon \cdot \mu}$$

Donde:

$N$ : número de repeticiones de ejes equivalentes para la falla de la base.

$\varepsilon$ : deformación tensional máxima en fibra inferior de la base.

$E$ : módulo de flexotracción del material cementado a los 28 días (MPa).

$\mu$ : coeficiente poisson de material (típicamente: 0.25, según Castro (2019c)).

Cabe resaltar, como lo mencionan Li y col. (2019), que la MEPDG ha dejado de lado la evaluación de la fatiga por esfuerzos de carácter compresivo en la sección superior de la base estabilizada, no habiendo un modelo definido para este fenómeno. Por lo que dichos autores exponen un modelo calibrado en Sudáfrica para cuantificar este fenómeno:

$$N_f = k_1 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_t}{k_2 \cdot UCS}\right)$$

Donde:

$N_f$ : número de repeticiones de ejes equivalentes para la falla de la base.

$\sigma_t$ : esfuerzo tensional máximo en fibra superior de la base (psi).

$k_1, k_2$ : constantes de regresión y calibración, toman el valor respectivamente de: 8.21 y 1.

$UCS$ : resistencia a la compresión inconfiada (psi).

Además para el módulo de ruptura o flexotracción del material ( $S_c$ ), que exponen los modelos, se puede hacer referencia a Leiva (2005), quien muestra la siguiente relación:

$$S_c = 0.51 \cdot (UC)^{0.88}$$

Donde:

$S_c$ : módulo de ruptura (psi).

UC: resistencia a la compresión inconfiada (psi).

De la expresión anterior cabe mencionar, como se detalla en el marco teórico que se buscará implementar una base estabilizada BE-25, según CR-2010 con una resistencia a la compresión a los 7 días de  $30 \text{ kg/cm}^2$  (427 psi), un módulo de rigidez de 625000psi y un módulo de ruptura de 105.28 psi.

Para conseguir las deformaciones tensionales se hace uso de la herramienta de multicapa elástica 3D MOVE, donde se generan los pasos:

1. Para este caso, y por ajuste a los modelos, se toma como premisa de análisis un eje equivalente dual de 8.2ton (18000lb), con separación de 0.3m entre cada llanta y una presión de inflado de 120 psi (827.37 kPa), típica en camiones. Que se ingresa de la manera mostrada en la Figura 30.

**Figura 30.** Ingreso de eje de carga y presión en 3DMOVE  
Fuente: 3DMOVE, 2020.

2. Se ingresan las capas y sus respectivos espesores (m) determinados según AASHTO

(1993), en la pestaña de estructura de pavimento semi-rígido. Ver Figura 31.

Pavement Structure

Unit Converter: Length

Layer No	Layer Type	Material Characterization	Thickness (m)
1	Asphalt	Linear Elastic	0.075
2	Base	Linear Elastic	0.2
3	Subbase	Linear Elastic	0.35
4	Subgrade	Linear Elastic	0

**Figura 31.** Ingreso de capas y respectivos espesores en 3DMOVE  
Fuente: 3DMOVE, 2020.

3. Se ingresan las propiedades de los materiales, en la pestaña de propiedades de capas. Donde se solicita el módulo de elasticidad del material (kPa) y el coeficiente de poisson. De forma ilustrativa se presenta en la Figura 32.

Pavement Layer Properties - Layer 2

Layer 2 Thickness  m

Material

Standard Material Type

Range of E value is between 265448 - 289580.  
Typical Value of E is 275790

Elastic Modulus, E  kPa

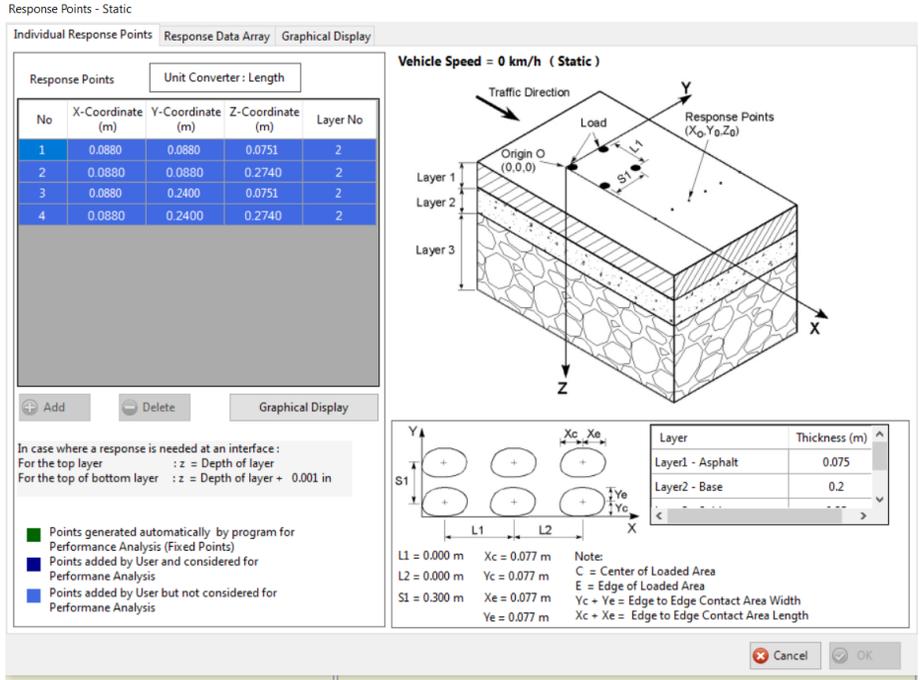
CBR

R Value

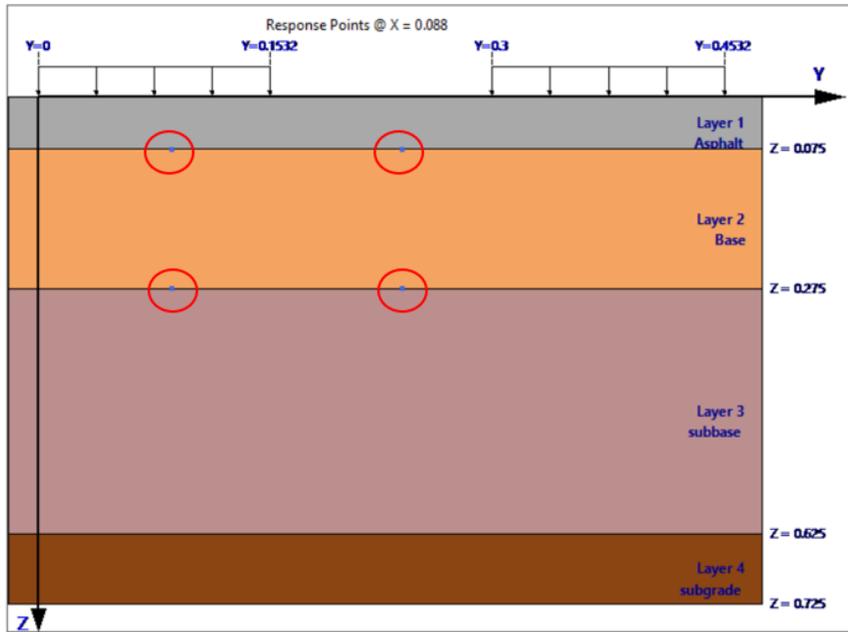
Poisson's Ratio

**Figura 32.** Ingreso de parámetros capas en 3DMOVE  
Fuente: 3DMOVE, 2020.

4. Se deciden los puntos de análisis o de respuesta, que principalmente, al evaluar la base estabilizada, se refieren a las fibras inferiores y superiores de la segunda capa (base estabilizada), de la manera indicada en las Figuras 33 y 34



**Figura 33.** Puntos de análisis de base estabilizada en 3DMOVE  
 Fuente: 3DMOVE, 2020.



**Figura 34.** Representación de puntos de análisis de base estabilizada en 3DMOVE  
 Fuente: 3DMOVE, 2020.

5. Finalmente se analizan los esfuerzos máximos tensionales (kPa) (de carácter negativo

según la convención de signos utilizada por el programa) y representados como:  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  o  $S_{zz}$ . Así como las deformaciones máximas (ms) representadas por:  $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$  o  $E_{zz}$ ; que son los dos parámetros exigidos por los dos modelos de desempeño a evaluar. De la misma forma las respuestas de carácter compresivo (positivos según convención) son requeridas.

## Herramienta de Diseño CR-ME Flexibles

Como se detalló en el marco teórico se utilizará el nivel básico del programa, en relación al ingreso de parámetros de entrada (tránsito, clima, características de los materiales y modelos de desempeño). Los pasos seguidos se detallan a continuación.

1. **Parámetros Iniciales:** De manera inicial la herramienta solicita algunas variables generales del proyecto, como: ubicación, fecha, sección. Además de parámetros como la velocidad en la carretera (donde se trabaja con la premisa que la misma es de 30km/h); el ancho de carril (3m en promedio indicado en la sección de la primera gira); periodo de diseño (15 años); zigzaguo lateral, en este caso, de acuerdo con Trejos y col. (2017), se evalúa la condición más crítica donde no hay zigzaguo. De forma representativa se ilustra en la Figura 35.

The screenshot shows the 'Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos Flexibles' interface. It is divided into three main sections: 'Proyecto', 'Características del proyecto', and 'Datos de entrada'. The 'Proyecto' section includes fields for 'Ubicación' (Guanacaste), 'Identificación del proyecto' (Ruta 911), 'Identificación de la sección' (Sección 1 Flexible), 'Fecha de la construcción' (16/06/2020), and 'Descripción' (Sección de diseño de pavimento). The 'Características del proyecto' section includes 'Velocidad operacional (km/h)' (30), 'Ancho de carril (m)' (3), 'Período de diseño (años)' (15), and a radio button for 'Considerar el efecto del Zigzaguo Lateral' (set to 'No'). The 'Datos de entrada' section has checkboxes for 'Tránsito', 'Clima', 'Materiales', and 'Modelos de desempeño', with a 'DISEÑAR' button below. A checkbox on the right allows users to 'Activar la opción de consulta para guardar los archivos en cada módulo'.

**Figura 35.** Interfaz de inicio de herramienta CR-ME

Fuente: CR-ME, 2020.

2. **Tránsito:** La herramienta da la posibilidad de ingresar los parámetros, según AASHTO (1993) para calcular los ejes equivalentes de diseño. En este caso se calculan de forma externa y se ingresa el valor de la forma mostrada en la Figura 36.

Tránsito

Archivo Salir

Nivel 3 (Básico)

### Ejes Equivalentes de Carga (ESAL)

Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T con series históricas

N (8.2 T)

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

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

Factor de distribución por carril (%)

Típos de	Porcentaje del TPD	Factor daño
Automóviles	0	0
Buses	0	0
C2P	0	0
C2G	0	0
C3	0	0
C3S2	0	0
C3S3	0	0

ESAL durante la construcción (Nc)

Porcentaje atraído

Porcentaje generado

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

ESAL calculado

**Figura 36.** Ingreso de parámetros de tránsito en herramienta CR-ME  
Fuente: CR-ME, 2020.

3. **Clima:** Dentro de los parámetros solicitados se encuentran la temperatura promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el Índice de Thornthwaite (TMI). Por lo que para la recolección de estas variables se hace uso de la estación automática del Instituto Meteorológico Nacional (Aer. Liberia Oeste 07), que provee datos históricos de las condiciones climáticas del sector (anexo 6). El cálculo del (TMI) se genera según la metodología impuesta por Diez (2008), detallada a continuación.

a) Primeramente se calcula el índice de calor mensual ( $i$ ), que se obtiene a partir de la temperatura promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ), con la siguiente relación:

$$i = \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

Donde:

$i$ : índice de calor mensual.

$T_i$ : temperatura promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ).

b) Posteriormente se determina el índice de calor anual ( $I$ ), como la sumatoria de los índices de calor mensuales:

$$I = \sum_1^{12} (i)$$

- c) Con lo anterior calculado es posible determinar la evapotranspiración mensual (ET), de la forma:

$$ET = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I}\right)^a$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,49239$$

Donde:

$I$ : índice de calor anual.

$T_i$ : temperatura promedio mensual (°C).

$ET$ : evapotranspiración mensual (mm).

- d) Según Diez (2008), el valor de evapotranspiración sin ajustar se debe corregir con un factor de ajuste que toma en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol según la latitud del lugar, para esto se usan los factores expuestos por Perera (2015), teniendo:

$$ET_i = ET \cdot FC$$

Donde:

$FC$ : factor de corrección.

$ET$ : evapotranspiración mensual (mm).

$ET_i$ : evapotranspiración mensual corregida (mm).

- e) Posteriormente se puede determinar el almacenamiento mensual ( $A_i$ ), en función del almacenamiento del mes anterior ( $A_{i-1}$ ). Esto tomando en cuenta una capacidad de almacenamiento máxima de 100mm ( $A_{max}$ ) y la precipitación mensual ( $P_i$ ), como lo explica Diez (2008), donde:

$$A_i = \begin{cases} A_{i-1} + (P_i - ET_i), & \text{cuando : } 0 < A_{i-1} + (P_i - ET_i) < A_{max} \\ A_{max}, & \text{cuando : } 0 < A_{i-1} + (P_i - ET_i) > A_{max} \\ 0, & \text{cuando : } A_{i-1} + (P_i - ET_i) < 0 \end{cases}$$

Importante recalcar que si la diferencia ( $P_i - ET_i$ ) < 0, se trata de un mes seco, de lo contrario se trata de un mes húmedo.

f) Posteriormente se puede calcular el deficit ( $D_i$ ), como:

$$D_i = \begin{cases} \text{mes seco} & \Rightarrow D_i = ET_i - (P_i - (A_i - A_{i-1})) \\ \text{mes humedo} & \Rightarrow D_i = ET_i - ET_i \end{cases}$$

g) Seguidamente se genera el cálculo del exceso de agua ( $E_x$ ) como:

$$E_x = \begin{cases} P_i - ET_i - (A_i - A_{i-1}), & P_i - ET_i > 0 \\ 0, & P_i - ET_i \leq 0 \end{cases}$$

h) Para finalmente dar con el cálculo de un TMI mensual, según Karunaratne y col. (2016), de la forma:

$$TMI = \frac{100 \cdot E_x - 60 \cdot D_i}{ET_i}$$

Importante recordar que este valor teóricamente se encuentra en el rango de -100 a 100, así que los datos que se encuentran fuera del rango, deben sustituirse por el mínimo o máximo correspondiente. Por otra parte, todo el cálculo se encuentra en el Apéndice 9. Así que se ingresa al interfaz como se muestra en la Figura 37.

Mes	Índice de Thornwaite (TMI)	Temperatura promedio mensual (oC)
Enero	-4.54	27.2
Febrero	-4.49	27.8
Marzo	-5.56	28.4
Abril	-5.08	29.2
Mayo	0	28.6
Junio	0	27.5
Julio	-0.34	27.6
Agosto	0	27.6
Setiembre	6.76	26.9
Octubre	12.16	26.5
Noviembre	0	26.5

**Figura 37.** Ingreso de parámetros de clima en herramienta CR-ME  
Fuente: CR-ME, 2020.

4. **Propiedades de Materiales:** posteriormente se da el ingreso de las capas y sus respectivas propiedades de los materiales que las componen.

- a) Carpeta asfáltica: Se ingresan los datos pertenecientes al Cuadro 2, donde por medio de la elección del ligante (por viscosidad) se asignan, por defecto, valores propios del ensayo de envejecimiento a corto plazo con el RTFO, como el índice de susceptibilidad térmica (VTS). Además, internamente, ante la elección del modelo de Witzzak-Lanamme (explicado en el marco teórico), el programa genera la construcción de la curva maestra asociada a la mezcla. Ver figuras 38, 39 y 40.

Nivel 3 (Básico) | Espesor de la capa (cm) 11 | Razón de Poisson 0.35 | Densidad (kg/m3) 2300  
 Modelo de Witzzak  Modelo de Witzzak-Lanamme  Modelo ANN-Lanamme

**Módulo Dinámico**

<b>Gradación del agregado</b> p <sub>3/4</sub> % acumulado retenido en la 0 p <sub>3/8</sub> % acumulado retenido en la 20 p <sub>4</sub> % acumulado retenido en la 52 p <sub>200</sub> % pasando la malla 5	<b>Propiedades Volumétricas</b> V <sub>α</sub> contenido de vacíos de aire, % 4 V <sub>beff</sub> contenido efectivo de asfalto, % 10	<b>Variables de la Curva Maestra Witzzak-Lanamme</b> $\alpha = 2.399557 + 0.000820p_4 - 0.013420p_{30} + 0.000261(p_{30})^2 + 0.005470p_{34}$ $\delta = 5.535833 + 0.002087p_{200} - 0.000566(p_{200})^2 - 0.002590p_4 - 0.078763V_a - 1.865947 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right)$ $\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{0.052941 - 0.498163 \log(f) - 0.691856 \log(\eta)}}$
---	---	--

Guardar

**Figura 38.** Ingreso de parámetros de mezcla en herramienta CR-ME  
Fuente: CR-ME, 2020.

Propiedades de la mezcla asfáltica

Nivel 3 (Básico)

Valores predeterminado

Grado Superpave del ligante  
 Grado Convencional AC  
 Grado de Penetración Convencional

Grado Convencional AC

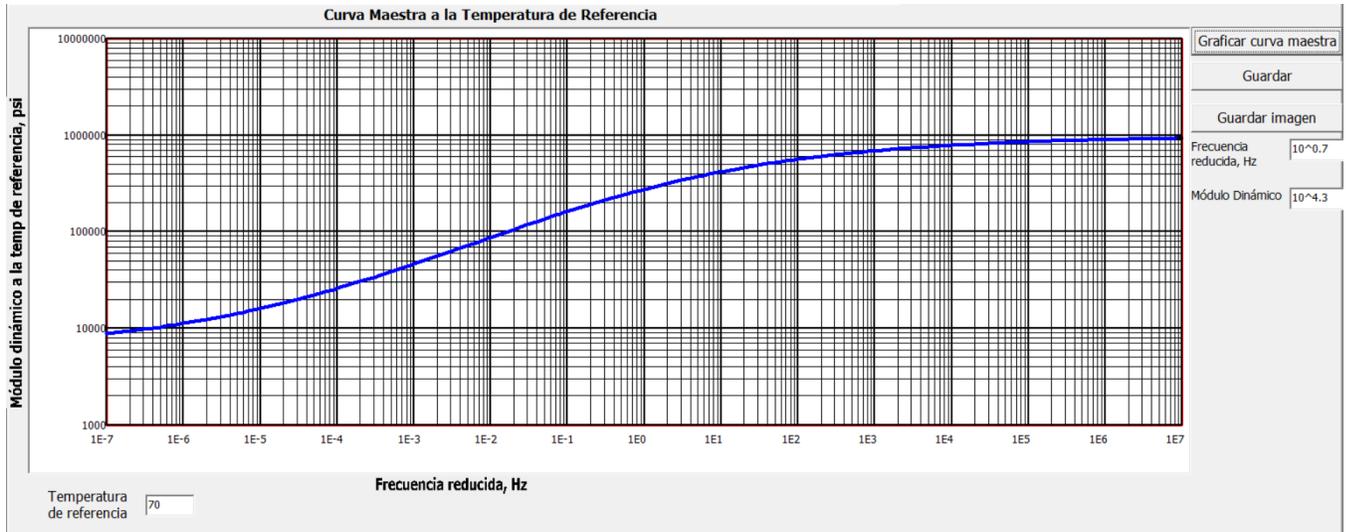
AC 30

A-VTS para el ligante asfáltico envejecido RTFO

A 11.6316 VTS -3.548

Guardar

**Figura 39.** Selección de ligante de mezcla en herramienta CR-ME  
Fuente: CR-ME, 2020.



**Figura 40.** Curva maestra de mezcla en herramienta CR-ME  
Fuente: CR-ME, 2020.

- b) Base, subbase y subrasante: Se ingresan los datos pertenecientes a los Cuadros 3 y 4, así como los espesores asociados. Un ejemplo ilustrativo se muestra en la figura 41.

**Figura 41.** Ingreso de parámetros de capas inferiores en herramienta CR-ME.  
Fuente: CR-ME, 2020.

Para el caso de la base estabilizada se ingresa: su espesor, coeficiente de Poisson, módulo de ruptura, módulo resiliente inicial y su módulo resiliente final (tomado como un 10% del inicial, según lo recomendado por la herramienta).

5. Finalmente se corren los modelos de desempeño, descritos anteriormente. Se pueden indicar los valores permisibles, según el tipo de falla evaluada. Esto de acuerdo con AASHTO (2008) en su Manual de Práctica de la MEPDG (tabla 10.8), donde para vías secundarias a un nivel adecuado de servicio, se exponen los siguientes valores, obtenidos de los rangos expuestos en dicha tabla:

**Cuadro 7.** Valores límites permisibles

Tipo de falla	Valor Límite
Agrietamiento Longitudinal (pie/millas)	1590.0
Área agrietada (%)	25.0
Ahuellamiento total (mm)	25.0

Fuente: AASTHO, 2008.

Si alguno de los valores obtenidos de los modelos incumple con los límites permisibles establecidos, se debe generar un nuevo dimensionamiento de la estructura, hasta cumplir con lo solicitado.

## Pavimentos Rígidos

Para el caso de este tipo de pavimentos se contemplan diversos modelos, en los cuales se evalúan fenómenos como: escalonamiento, bombeo de finos y fatiga; que pueden llegar a comprometer la estructura de pavimento. Para el análisis se hace uso de la herramienta o software AP-Rigid, perteneciente a Lanamme UCR, y que permite cuantificar deflexiones y esfuerzos en zonas críticas de la losa.

## Modelo de Escalonamiento

Este fenómeno es uno de los posibles causantes de las diferencias de elevación en losas. En diversas ocasiones, por una inadecuada transferencia de carga en las juntas, diferenciales volumétricos ó movimientos en la capa de apoyo, las losas tienden a levantarse respecto a sus adyacentes. Huang (2004) expone un modelo que describe a este fenómeno, de forma:

$$F = (N_{18})^{0.5377} [2.2073 + 0.002171 \cdot (S)^{0.04918} + 0.0003292 \cdot (JS)^{1.0793} - 2.1397 \cdot (k)^{0.01305}]$$

Donde:

$F$ : escalonamiento de pavimento (in).

$N_{18}$ : número de pasadas de ejes equivalentes antes de la falla.

$S$ : esfuerzo máximo en losa (psi).

$JS$ : espaciamiento de juntas (ft).

$k$ : coeficiente efectivo de subrasante (pci).

## Modelo de Bombeo y erosión

Otro fenómeno importante a evaluar es el bombeo y erosión, que lo que genera en sí es la migración de materiales finos de las capas inferiores de apoyo o subrasante; debilitando poco a poco la estructura de pavimento. De esta manera Huang (2004) expone un modelo específico para el pavimento rígido JPCP, donde se tiene:

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

Donde:

$PI$ : escalonamiento de pavimento (in).

$N_{18}$ : número de pasadas de ejes equivalentes antes de la falla.

$S$ : tipo de suelo según AASHTO (0 para suelos granulares, 1 para suelos finos).

$P$ : precipitación anual (cm).

$H$ : espesor de losa (in).

$FI$ : índice de congelamiento ( $^{\circ}F/días$ ). Toma valor de cero cuando no hay temperaturas extremas.

## Modelos de fatiga

La presencia de cargas cíclicas en la losa, genera esfuerzos que deben ser contemplados para no sobrepasar la capacidad de la misma. Ante esto se decide utilizar dos modelos de desempeño para evaluar este fenómeno. Uno desarrollado a nivel nacional y expuesto por Monge (2013); y otro por parte de la PCA, expuesto por Anguas, Gómez y Sesma (2002). De esta forma respectivamente se detallan:

$$\log_{10}(N) = \log_{10}(5.451) - 24.6 \cdot (SR)$$

$$SR = \left( \frac{\sigma}{S_c} \right)$$

Fuente: Monge, 2013.

Donde:

$SR$ : relación de esfuerzos.

$N$ : número de pasadas de ejes equivalentes antes de la falla.

$S_c$ : módulo ruptura concreto (psi).

$\sigma$ : esfuerzo máximo en losa (psi).

Para el caso del modelo de la PCA, se tiene:

$$N = \begin{cases} \log_{10}(N) = 11.737 - 12.077 \cdot SR, & (\text{Para } SR \geq 0.55) \\ N = \left(\frac{4.2477}{SR-0.4325}\right)^{3.268}, & (\text{Para } 0.45 < SR < 0.55) \\ N = \text{no limitado}, & (\text{Para } SR \leq 0.45) \end{cases}$$

Donde:

$SR$ : relación de esfuerzos.

$N$ : número de pasadas de ejes equivalentes antes de la falla.

## Herramienta de Diseño AP-Rigid

Para la determinación de los esfuerzos producidos en la losa, a ser utilizados en los modelos de fatiga y para facilidad del cálculo, se decide implementar la herramienta de diseño AP-RIGID, desarrollada por Lanamme. La cual solicita ciertos parámetros de entrada que se detallan en seguida.

1. Separación entre juntas: En este caso se debe expresar la longitud de las losas (que evidencia la separación entre las juntas). Por lo que siguiendo las recomendaciones de AASHTO (1993), Sección 3.3.2, la relación largo-ancho no debe exceder en un 25 %, por lo que se decide una longitud de 3.5m (11.48 pies), basado en un ancho de carril de 3m.
2. Módulo elástico del concreto: como se detalla en secciones anteriores este toma un valor de: 3597.08 (ksi).
3. Coeficiente efectivo de reacción: como se detalla en secciones anteriores este toma un valor de: 70.00 (pci) para la Sección 1 y 90.00 (pci) para la Sección 2.
4. Módulo elástico de la subbase: como se detalla en secciones anteriores éste toma un valor de: 17.0 (ksi).
5. Diámetro de dovelas: del diseño del acero se dosifican dovelas número 6, con un diámetro asociado de 0.75 (in).
6. Transferencia de carga en dovelas (LTE): al igual que en el diseño del acero y como lo indica Castro (2019a), al ser un pavimento nuevo se supone una transferencia del 100 % de carga.
7. Espesor de losa: se toma inicialmente el espesor obtenido por medio de la metodología AASHTO. Si fuese necesario, en función de los modelos, se aumenta.
8. Se utiliza un diferencial térmico de 3.8 °C (6.8 °F), típico según el manual de usuario de la herramienta.

La Figura 42 muestra los parámetros de ingreso al programa AP-Rigid.

The screenshot shows the 'ApRIGID 1.0' software window. The title bar includes 'Archivo' and 'Ayuda'. The main header identifies the 'Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR' and 'Software de análisis de pavimentos rígidos'. The interface is divided into two main sections: 'Análisis individual' (selected) and 'Análisis Grupal'. Under 'Análisis individual', there are two sub-sections: 'Unidades de parámetros de entrada' and 'Metodo de análisis'. The 'Unidades de parámetros de entrada' section has two radio buttons: 'Sistema Internacional de Unidades' (unselected) and 'Sistema Ingles de unidades' (selected). Below this, there are input fields for: Separacion entre juntas [ft][m] (11.48), Modulo elástico concreto [ksi][GPa] (3,597.08), Espesor losa [in][cm] (6.6), Diferencial térmico [F][C] (6.8), Coeficiente subrasante [pci][MPa/m] (90), Modulo elástico base [ksi][GPa] (17), Diámetro dovelas [in][cm] (0.75), and LTE [%] (100). A 'Calcular' button is located below these fields. The 'Metodo de análisis' section has two radio buttons: 'Regresión lineal múltiple' (selected) and 'Red neural artificial' (unselected). The 'Análisis Grupal' section is currently inactive, showing 'Unidades de variables de entrada' with 'Sistema Internacional de Unidades' selected and a 'Cargar y Analizar estructuras' button. Its 'Metodo de análisis' section has 'Regresión lineal múltiple' selected and an 'Ayuda del Proceso de Carga' button.

**Figura 42.** Ingreso de parámetros a herramienta de diseño AP-Rigid  
Fuente: AP-Rigid, 2020.

Finalmente se deben establecer los criterios de aceptación o valores límites, para cada modelo. Para los modelos de fatiga se comparan las pasadas de ejes equivalentes de diseño, con las pasadas para las fallas dadas por dichos modelos. En el caso del modelo de escalonamiento, se establece un valor máximo de 0.2 in (rutas secundarias), según AASHTO (2008). Finalmente, para el índice de bombeo se establece un valor máximo de 1.0, con el fin de que no se presente este fenómeno, según Huang (2004).

## Costos de Inversión y mantenimiento

Una de las secciones de suma relevancia, en todo proyecto, es el apartado de costos. El factor económico muchas veces es el indicador primordial de una inversión. Para este caso, la determinación de los costos se hará respecto a una revisión en el Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP), de licitaciones recientes (menos de dos años de haber sido adjudicadas), cercanas a la zona y de una índole similar. Esto apegado a los reglones de pago (inherentes a cada estructura de pavimento) y expuestos en el CR-2010; con el fin de tener un valor apegado a la realidad y, además, no incurrir en subestimaciones por precios desactualizados, ó sobreestimaciones por índices variables al llevar los costos a un valor futuro.

Para el caso de los costos de conservación, basado en la misma premisa del costo actual y apegado a la realidad, se decide indagar en la plataforma de CONAVI. Específicamente en los contratos: 2014LN-000018-0CV00 (Mantenimiento y Rehabilitación del Pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada) y 2014LN-000017-0CV00 (Mantenimiento Rutinario Con Maquinaria Especializada, Contingencias y Rehabilitación del Sistema de Evacuación Pluvial de la Red Vial Nacional Pavimentada). Esto para las zonas de conservación 2-3 (en la que se encuentra la

ruta) y 2-1 (zona vecina, que contiene algunos reglones no presentes en la zona anterior), y así establecer precios reajustados. Se supone un mantenimiento periódico igual para cada estrategia de pavimentación; las intervenciones a contemplar se deciden con ayuda de profesionales. Todo lo anterior se expone los Anexos 7, 8 y 9.

## Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

Con las inversiones definidas a lo largo del período, es posible generar un costo anual uniforme equivalente, que según Riquelme (2013) este puede ser calculado como:

$$CAUE = VPN \cdot \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde:

*CAUE*: costo anual uniforme equivalente (€).

*VPN*: valor presente neto (€), suma de la inversión inicial más los flujos a valor presente.

*i*: tasa de descuento (%), típicamente para proyectos de esta índole ronda el 12%.

*n*: periodo (años).

De forma explícita, en términos económicos, se elige la alternativa con menor CAUE, o sea la de menor costo global de intervención.

# Resultados

De forma inicial a partir del manejo de los datos provenientes del DCP, aplicación de conceptos estadísticos y del concepto del módulo de rigidez equivalente de la subrasante, para la definición de secciones homogéneas, es posible establecer las siguientes secciones con su módulo de rigidez de subrasante respectivo:

**Cuadro 8.** Módulo de Rigidez equivalente y secciones homogéneas

Sección Homogénea	Estacionamientos	MR equivalente (psi)
1	0+000 a 2+500	2978.71
2	2+500 a 9+000	4656.58

Fuente: Autoría propia, 2020.

De manera detallada los Apéndices 3, 4 y 5 muestran los cálculos respectivos.

Por otra parte, en cuanto al cálculo de los ejes equivalentes de diseño a partir de valores de conteos vehiculares, plasmados en anuarios (Apéndice 6 y Anexo 4), se determinan dichos ejes equivalentes de diseño presentados en el Cuadro 9, para un período de diseño de 15 años.

**Cuadro 9.** Ejes equivalentes de diseño pavimentos flexibles y semi-rígidos

Tipo de Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Días	EEQ Anuales	Factor de Crecimiento	Factor de Carril	Factor de dirección	EEQ de diseño
Livianos	851	0.001	0.85	310.68	20.02	100 %	50 %	3110
CL	454	0.010	4.54	1658.10	20.02	100 %	50 %	16598
Buses	37	1.710	62.61	22853.44	20.02	100 %	50 %	228763
C2	61	0.630	38.47	14041.09	20.02	100 %	50 %	140551
C3	84	1.710	144.29	52666.45	20.02	100 %	50 %	527191
Total EEQ de diseño								916213

Fuente: Autoría propia, 2020.

Importante recalcar, como se mencionó en la metodología, que estos fueron calculados a partir de factores camión asociados a pavimentos flexibles y semi-rígidos. Sin embargo, por recomendaciones de Castro (2020b) se utilizarán los mismos factores para el diseño de rígidos (claramente variando el factor de crecimiento, producto del distinto periodo de diseño), siendo para este caso: 1362878 EEQ de diseño para un período de 20 años. A modo de ejercicio se genera un dimensionamiento según la recomendación dada por AASHTO (1993), teniéndose 2034146 EEQ de diseño.

Para dichas cargas vehiculares se evaluaron los diseños por medio de la metodología mecánica-empírica, en función de cada sección homogénea y del tipo de pavimento.

## Estructuras de pavimento flexible

Se genera el dimensionamiento de los espesores por medio de la metodología de AASHTO (1993); para luego generar una comprobación de los mismos por criterios mecanísticos-empíricos.

### Pavimento flexible para sección homogénea 1

Tomando como base los parámetros expuestos en la metodología y siguiendo lo detallado por AASHTO (1993), es posible evidenciar los números estructurales y espesores requeridos, así como los finalmente provistos como se presentan en el Apéndice 10 y expuestos en el resumen del Cuadro 10

**Cuadro 10.** Espesores según metodología AASHTO (1993) de pavimento flexible, sección 1

Capa	SN acumulado	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)	SN empleado
Carpeta Asfáltica	1.830	10.564	11.0	1.940
Base	2.212	5.473	15.0	2.780
Subbase	4.080	28.348	30.0	4.156

Fuente: Autoría propia, 2020.

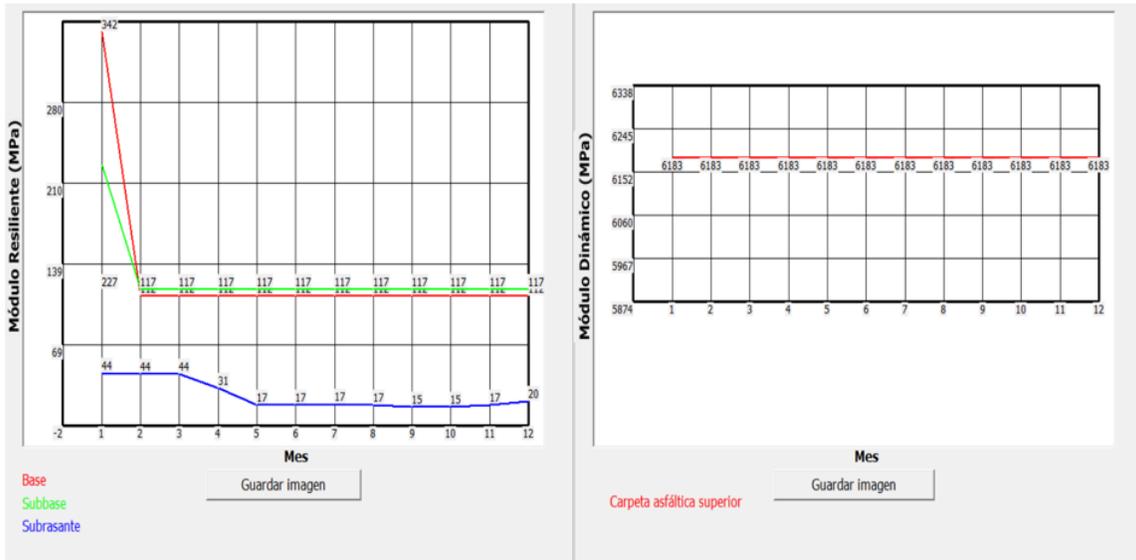
Con los espesores encontrados por medio de la metodología AASHTO (1993), es posible generar una revisión con base en conceptos mecanísticos-empíricos, detallados en la metodología. Lo anterior de acuerdo con el Cuadro 7 y con los resultados del Cuadro 11.

**Cuadro 11.** Revisión de espesores elegidos por conceptos mecanísticos-empíricos

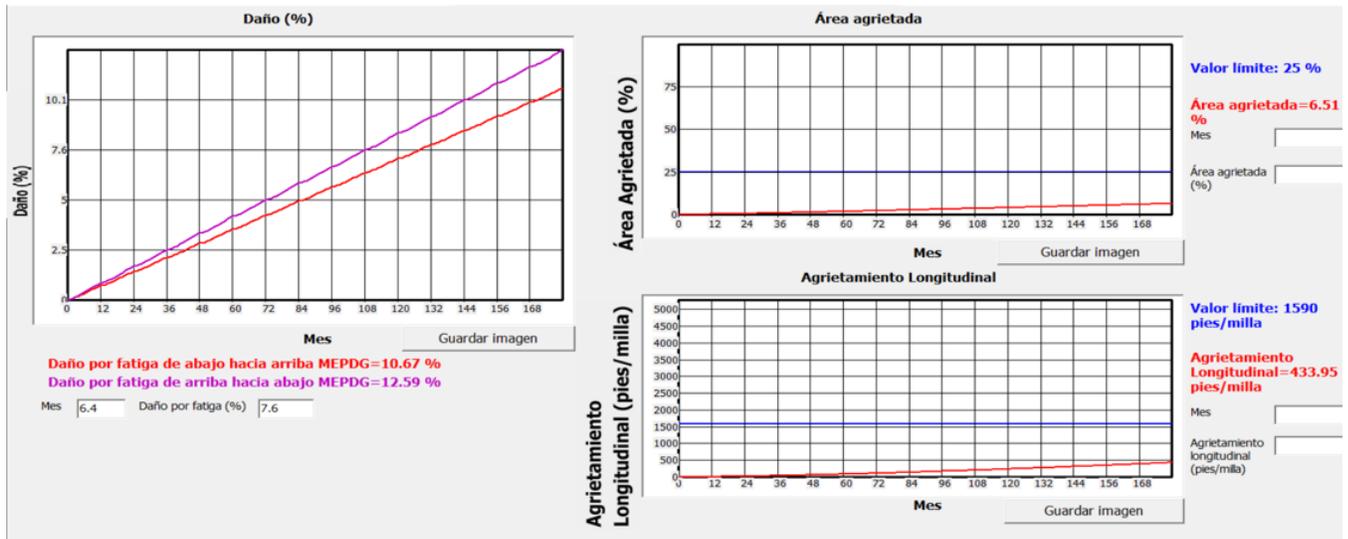
Tipo de falla	Valor obtenido	Valor límite	Condición
Agrietamiento Longitudinal (pie/milla)	433.95	1590.00	Cumple
Área agrietada (%)	6.51	25.00	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	23.68	25.00	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

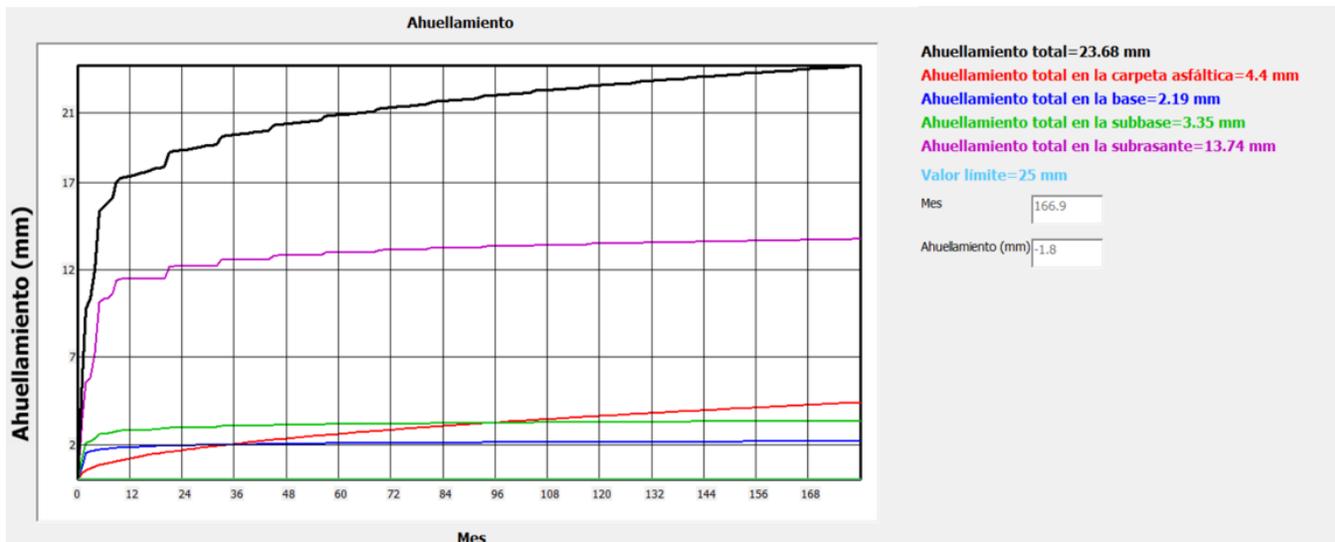
El software presenta estos resultados de forma gráfica y en función de los meses, que se muestran en las figuras 43, 44 y 45. En la primera se nota una nula variación para el módulo dinámica de la mezcla asfáltica. Mientras que en las dos posteriores se evidencia el aumento del agrietamiento y ahuellamiento al paso de los meses.



**Figura 43.** Variación de módulos resilientes por capa, pavimento flexible (sección 1)  
Fuente: CR-ME, 2020.



**Figura 44.** Evaluación de porcentaje de daño y agrietamiento, pavimento flexible (sección 1)  
Fuente: CR-ME, 2020.



**Figura 45.** Evaluación de ahuellamiento, pavimento flexible (sección 1)  
 Fuente: CR-ME, 2020.

Únicamente como ejercicio académico, ya que según Castro (2020a) se deben respetar los espesores mínimos dados por AASHTO (1993), se busca reducir los espesores de la estructura de pavimento hasta cumplir todos los valores límites definidos. Se presentan los resultados en los Cuadros 12 y 13.

**Cuadro 12.** Espesores reducidos según modelos de desempeño (ejercicio académico)

Capa	Espesor (cm)
Carpeta Asfáltica	10.0
Base Granular	15.0
Subbase Granular	30.0

Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 13.** Revisión de espesores reducidos (ejercicio académico)

Tipo de falla	Valor Límite	Valor límite	Condición
Agrietamiento Longitudinal (pie/milla)	794.04	1590.00	Cumple
Área agrietada (%)	8.59	25.00	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	24.55	25.00	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

Del ejercicio anterior, se puede notar una diferencia de 1cm en la carpeta asfáltica, al contemplar únicamente los modelos de desempeño.

## Pavimento flexible para sección homogénea 2

Basado en los parámetros propios de la sección y siguiendo lo detallado por AASHTO (1993), es posible de la misma manera, evidenciar los números estructurales y espesores requeridos, así como los propuestos para esta sección homogénea. Los resultados completos se encuentran en el Apéndice 11, y son expuestos en resumen en el Cuadro 14.

**Cuadro 14.** Espesores según metodología AASHTO (1993) de pavimento flexible, sección 2

Capa	SN acumulado	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)	SN empleado
Carpeta	1.830	10.564	11.0	1.906
Base	2.211	5.542	15.0	2.732
Subbase	3.510	17.177	20.0	3.638

Fuente: Autoría propia, 2020.

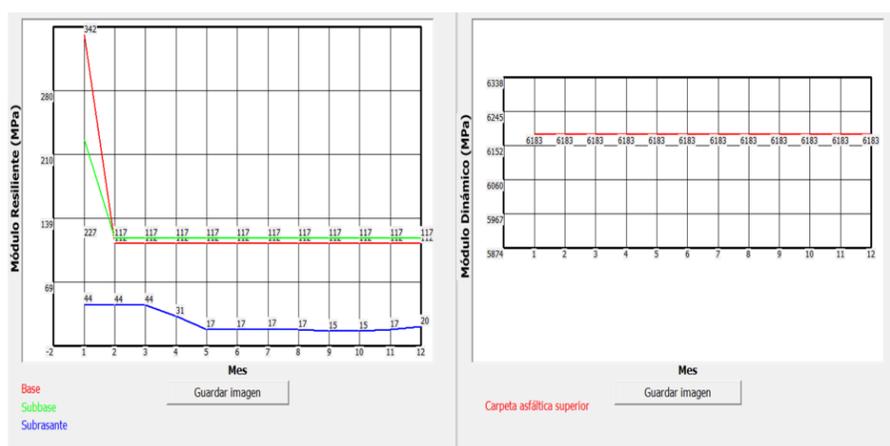
De la misma forma, con los espesores encontrados por medio de la metodología AASHTO (1993), es posible generar una revisión con base en conceptos mecanísticos-empíricos, detallados en la metodología. Se debe respetar lo impuesto en el Cuadro 7. Se presentan los resultados en el Cuadro 15.

**Cuadro 15.** Revisión de espesores elegidos por conceptos mecanísticos-empíricos

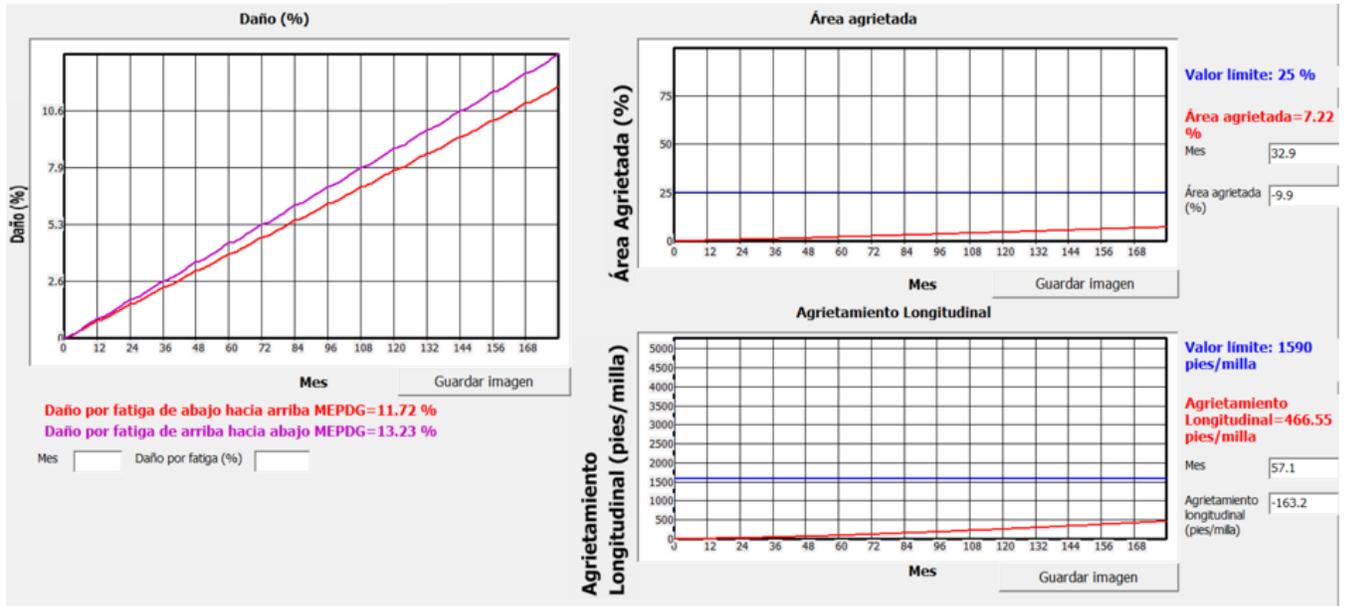
Tipo de falla	Valor obtenido	Valor límite	Condición
Agrietamiento Longitudinal (pie/milla)	466.55	1590.00	Cumple
Área agrietada (%)	7.22	25.00	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	22.35	25.00	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

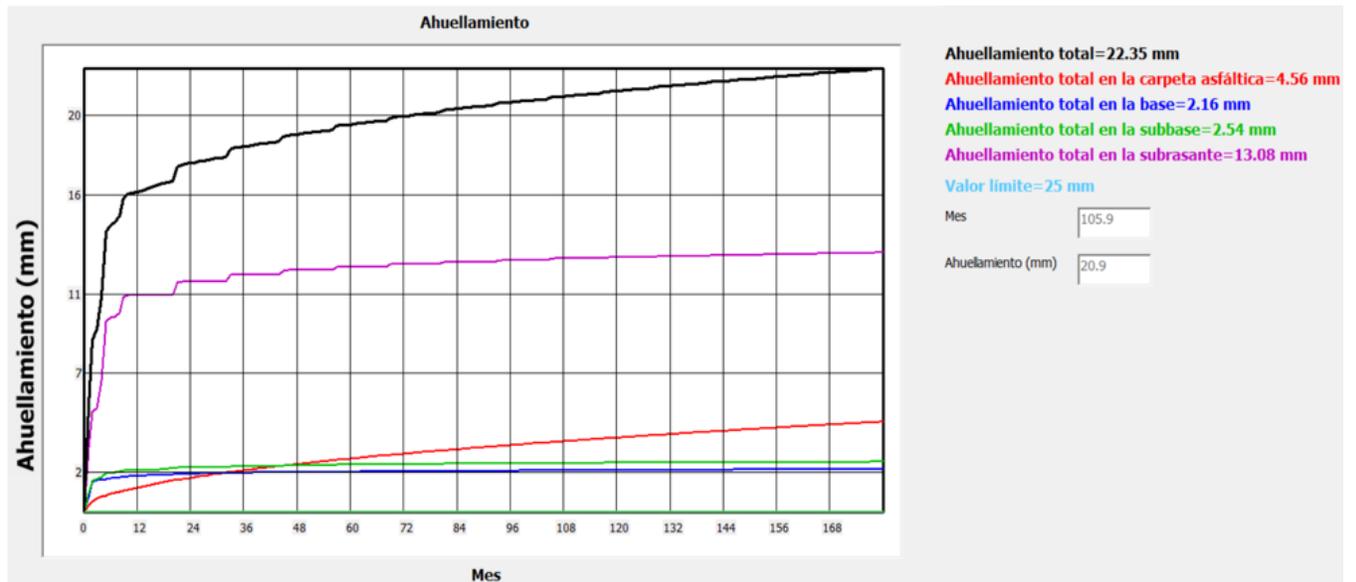
El software presenta estos resultados de forma gráfica y en función de los meses, que se muestran en las figuras 46, 47 y 48.



**Figura 46.** Variación de módulos resilientes por capa, pavimento flexible (sección 2)  
Fuente: CR-ME, 2020.



**Figura 47.** Evaluación de porcentaje de daño y agrietamiento, pavimento flexible (sección 2)  
 Fuente: CR-ME, 2020.



**Figura 48.** Evaluación de ahuellamiento, pavimento flexible (sección 2)  
 Fuente: CR-ME, 2020.

De la misma forma se genera el ejercicio académico de buscar la reducción de la estructura, basados únicamente en modelos de desempeño, teniéndose los resultados del Cuadro 16

**Cuadro 16.** Espesores reducidos según modelos de desempeño sección 2 (ejercicio académico)

Capa	Espesor (cm)
Carpeta Asfáltica	10.0
Base Granular	15.0
Subbase Granular	20.0

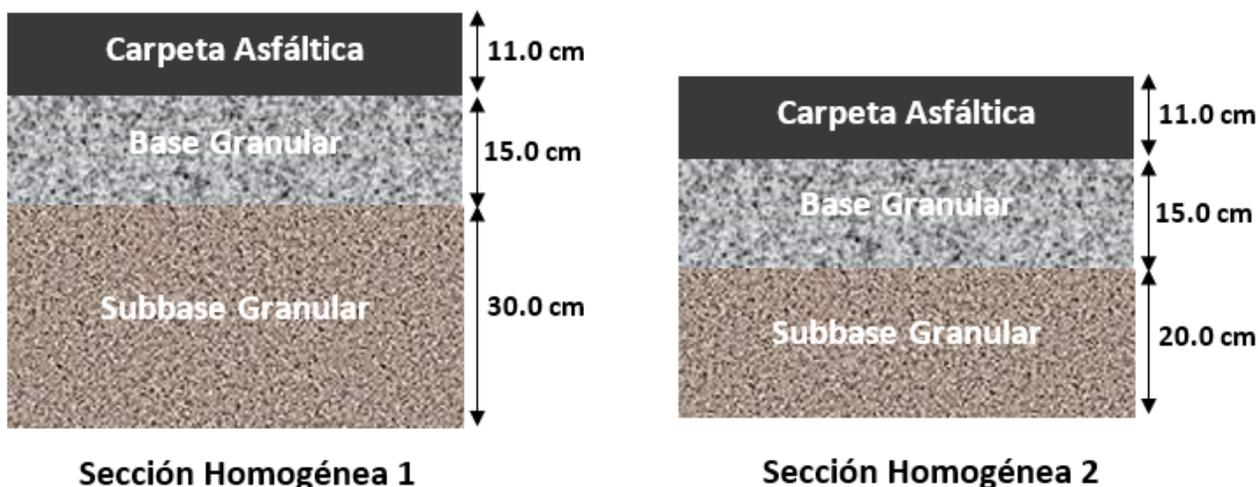
Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 17.** Revisión de espesores reducidos sección 2 (ejercicio académico)

Tipo de falla	Valor Límite	Valor límite	Condición
Agrietamiento Longitudinal (pie/milla)	1100.33	1590.00	Cumple
Área agrietada (%)	11.54	25.00	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	24.31	25.00	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

Se nota el mismo ahorro de 1cm de la carpeta, con un ahuellamiento ajustado al límite. Al igual que sucede con el diseño para la primera sección. En resumen se tienen los diseños expuestos en la Figura 49.



**Figura 49.** Estructura de pavimento flexible propuesta para cada sección

Fuente: Autoría propia, 2020.

## Estructuras de pavimento semi-rígido

Para este diseño, al igual que el flexible, se genera un predimensionamiento de la estructura por medio de la metodología de AASHTO (1993); para luego generar una comprobación de los mismos por criterios mecánicos-empíricos.

## Pavimento semi-rígido para sección homogénea 1

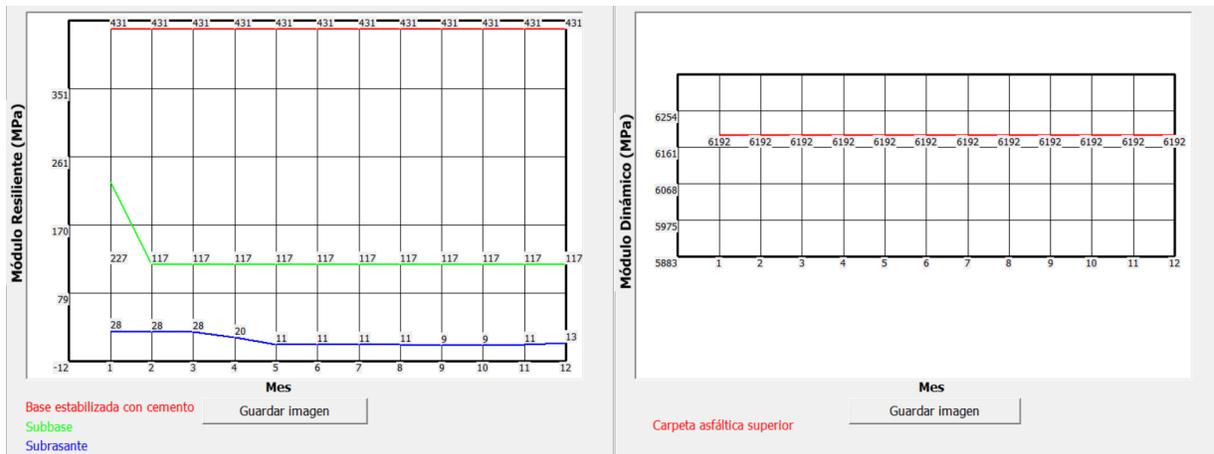
De la misma manera que se detalló en el pavimento flexible, es posible determinar los números estructurales y espesores requeridos, así como los provistos. Ver Apéndice 12 para información detallada; el Cuadro 18 muestra un resumen.

**Cuadro 18.** Espesores según metodología AASHTO (1993), pavimento semi-rígido sección 1

Capa	SN acumulado	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)	SN empleado
Carpeta	0.294	1.695	7.5	1.299
Base BE-25	2.180	13.983	15.0	2.244
Subbase	3.995	38.672	40.0	4.055

Fuente: Autoría propia, 2020.

En este caso se colocan 7.5 cm de carpeta, respetando los valores mínimos recomendados por AASHTO (1993). Como fue descrito en la metodología, se debe revisar el agrietamiento de la base estabilizada de forma externa. Pero antes se muestran los valores de ahuellamiento y variación estacional dados por el programa CR-ME. Expuestos en las Figuras 50, 51 y el Cuadro 19.



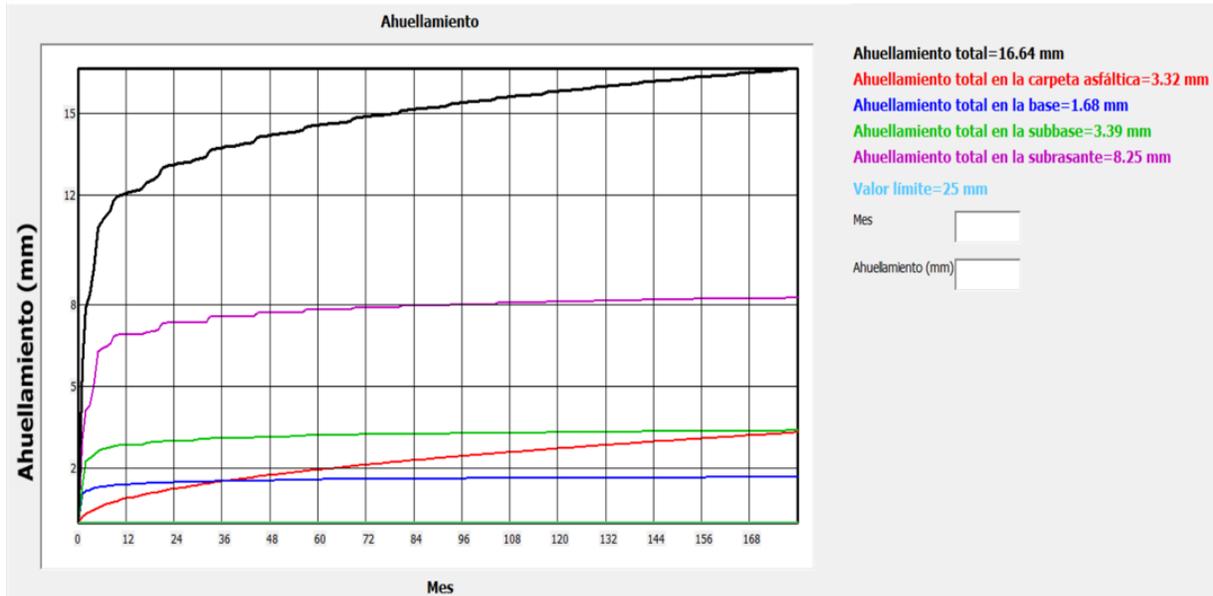
**Figura 50.** Variación de módulos resilientes por capa, pavimento semi-rígido (sección 1)

Fuente: CR-ME, 2020.

**Cuadro 19.** Ahuellamiento total de pavimento semi-rígido, sección 1

Tipo de falla	Valor obtenido	Valor límite	Condición
Ahuellamiento total (mm)	16.64	25.00	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.



**Figura 51.** Evaluación de ahuellamiento, pavimento semi-rígido (sección 1)  
 Fuente: CR-ME, 2020.

Con el cumplimiento del ahuellamiento, se procede a revisar la base estabilizada, con ayuda de los tres modelos explicados en la metodología. Inicialmente se deben cuantificar los esfuerzos y deformaciones máximas de tensión en la fibra inferior (azules); así como el máximo esfuerzo por compresión en la fibra superior (verde). Ante la primera iteración se debe aumentar en 5cm dicha base por el incumplimiento del modelo de fatiga, teniéndose 20cm. Ver figura 52

NOTE :

DISPLACEMENTS : X-DISP, Y-DISP, Z-DISP  
 NORMAL STRAINS : EXX, EYY, EZZ  
 NORMAL STRESSES : SXX, SYY, SZZ  
 ms : micro-strain

SHEAR STRAINS : GXY, GXZ, GYZ  
 SHEAR STRESSES : TXY, TXZ, TYZ

POINT	X-DISP(m) Exx(ms) Sxx(kPa)	Y-DISP(m) Eyy(ms) Syy(kPa)	Z-DISP(m) Ezz(ms) Szz(kPa)	Gxy(ms) Txy(kPa)	Gxz(ms) Txz(kPa)	Gyz(ms) Tyz(kPa)
1	.53702E-09 .18322E+00 .17899E+03	.38198E-05 -.35150E+01 .16625E+03	.56168E-03 .10681E+03 .54657E+03	.72214E+00 .12448E+01	.18462E+02 .31822E+02	.12242E+01 .21102E+01
2	.73551E-06 -.76958E+02 -.41413E+03	-.78678E-05 -.57525E+02 -.34714E+03	.55433E-03 .48139E+02 .17122E+02	-.11243E+01 -.19380E+01	.35129E+00 .60551E+00	-.21490E+01 -.37041E+01
3	-.18480E-06 .19499E+02 .16917E+03	-.68142E-06 .50784E+02 .27702E+03	.56001E-03 -.11137E+02 .63557E+02	-.12410E+01 -.21391E+01	.66114E+01 .11396E+02	-.18217E+02 -.31400E+02
4	.76531E-06 -.80058E+02 -.42541E+03	.73323E-06 -.55004E+02 -.33904E+03	.55982E-03 .48376E+02 .17352E+02	.45890E-01 .79100E-01	.34163E+00 .58887E+00	.98956E-01 .17057E+00

**Figura 52.** Esfuerzos en fibra superior e inferior de base estabilizada  
 Fuente: 3DMOVE, 2020.

A partir de los cálculos realizados se pueden evaluar dichos modelos:

El fenómeno de fatiga fue evaluado por medio de los dos modelos explicados en la metodología, los resultados se resumen en los Cuadros 20 y 21.

**Cuadro 20.** Modelo de fatiga PCA, expuesto por: Zhou, Emmanuel y Scullion (2008)

Parámetro	Valor
Módulo de flexotracción a los 28 días E (psi)	105.21
Máximo esfuerzo en parte inferior (kPa)	425.41
Máximo esfuerzo en parte inferior (psi)	61.68
Número Pasadas Eje Equivalente (N)	1089815.87
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 21.** Modelo de fatiga Guía de Diseño de Pavimentos Australiana, expuesto por: Leiva (2005), sección 1

Parámetro	Valor
Módulo de flexotracción a los 28 días E (psi)	105.21
Módulo de flexotracción a los 28 días E (Mpa)	0.73
Coefficiente Poisson ( $\mu$ )	0.25
Deformación tensional en fibra inferior ( $\epsilon$ ) (ms)	80.06
Número Pasadas Eje Equivalente (N)	201770463.41
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

El fenómeno de fatiga en la fibra superior fue evaluado por medio de un modelo explicado, los resultados se resumen en el Cuadro 22.

**Cuadro 22.** Modelo de fatiga en fibra superior, expuesto por: Li y col. (2019), sección 1

Parámetro	Valor
Resistencia a Compresión $f'c$ (psi)	426.70
Máximo esfuerzo en parte superior (kPa)	546.57
Máximo esfuerzo en parte superior (psi)	79.25
Número Pasadas Eje Equivalente (N)	4843075.13
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

## Pavimento semi-rígido para sección homogénea 2

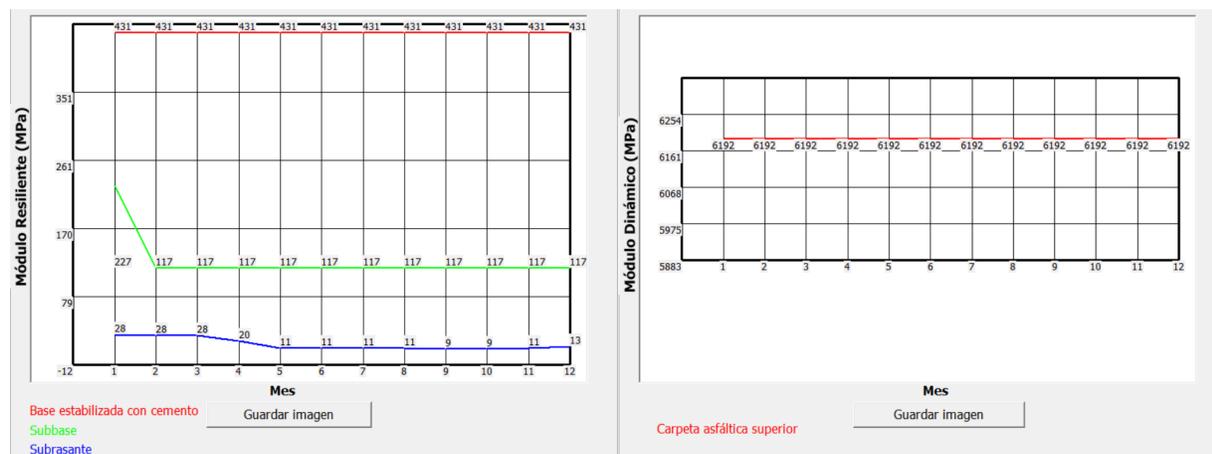
De la misma manera, es posible determinar los números estructurales y espesores requeridos, así como los propuestos. Descritos en el apéndice 13 y expuestos en resumen de la siguiente manera:

**Cuadro 23.** Espesores según metodología AASHTO (1993), pavimento semi-rígido sección 2.

Capa	SN acumulado	Esp. teórico (cm)	Esp. propuesto (cm)	SN empleado
Carpeta	0.294	1.695	7.5	1.299
Base BE-25	2.178	13.951	15.0	2.244
Subbase	3.443	26.376	30.0	3.602

Fuente: Autoría propia, 2020.

En este caso se colocan 7.5 cm de carpeta, respetando los valores mínimos recomendados por AASHTO (1993). Como ya se ha indicado, se debe revisar el agrietamiento de la base estabilizada de forma externa. La primera revisión se encuentra un esfuerzo asociado de: -556 kPa (Ver Figura 55), que genera un incumplimiento del modelo de fatiga de PCA, como en la primera sección; por lo que se itera la dimensión de la base estabilizada hasta encontrar la que genere el cumplimiento, que es a un espesor de 20cm. Con esta nueva dimensión se verifica el ahuellamiento y los modelos. Las Figuras 53, 54 y el Cuadro 24 muestran parte de estos resultados.

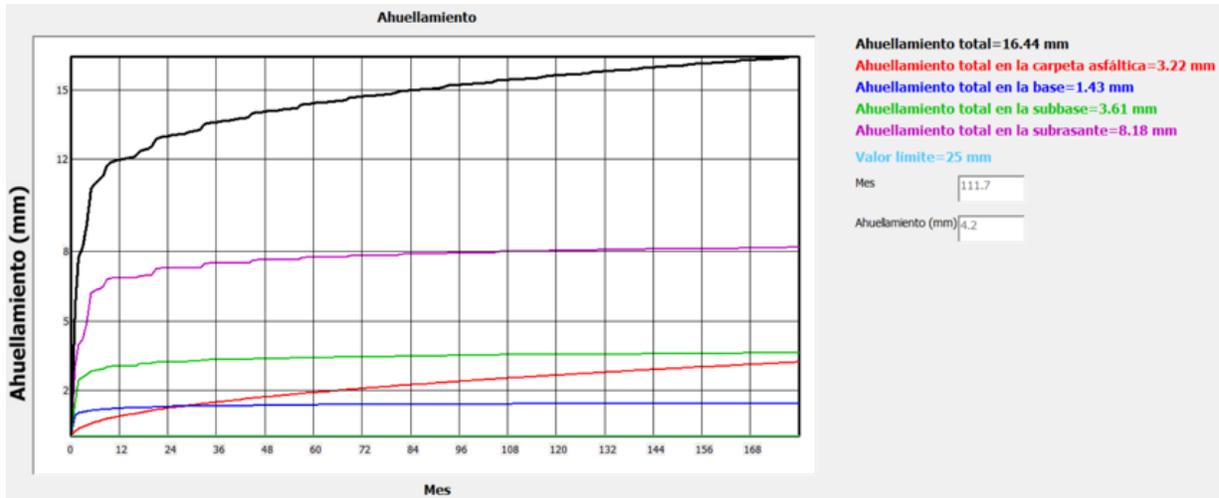


**Figura 53.** Variación de módulos resilientes por capa, pavimento semi-rígido (sección 2)  
Fuente: CR-ME, 2020.

**Cuadro 24.** Ahuellamiento total de pavimento semi-rígido, sección 2

Tipo de falla	Valor obtenido	Valor límite	Condición
Ahuellamiento total (mm)	16.44	25.00	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.



**Figura 54.** Evaluación de ahuellamiento, pavimento semi-rígido (sección 2)  
 Fuente: CR-ME, 2020.

Con el cumplimiento del ahuellamiento, se procede a revisar la base estabilizada, con ayuda de los tres modelos impuestos en la metodología. Inicialmente se deben cuantificar los esfuerzos y deformaciones máximas de tensión en la fibra inferior (azules); así como el máximo esfuerzo por compresión en la fibra superior (verde), con el nuevo espesor. Además, se muestran los esfuerzos que llevaron a generar dicho aumento de espesor en las Figuras 55 y 56, para espesores de 15cm y 20cm respectivamente.

NOTE :  
 DISPLACEMENTS : X-DISP, Y-DISP, Z-DISP  
 NORMAL STRAINS : EXX, EYY, EZZ  
 NORMAL STRESSES : SXX, SYY, SZZ  
 ms : micro-strain

SHEAR STRAINS : GXY, GXZ, GYZ  
 SHEAR STRESSES : TXY, TXZ, TYZ

POINT	X-DISP(m) Exx(ms) Sxx(kPa)	Y-DISP(m) Eyy(ms) Syy(kPa)	Z-DISP(m) Ezz(ms) Szz(kPa)	Gxy(ms) Txy(kPa)	Gxz(ms) Txz(kPa)	Gyz(ms) Tyz(kPa)
1	-.18482E-07 .21637E+01 .18363E+03	.37914E-05 -.31899E+01 .16517E+03	.47741E-03 .10323E+03 .53205E+03	.81493E+00 .14047E+01	.19583E+02 .33755E+02	-.36569E+01 -.63033E+01
2	.99585E-06 -.10415E+03 -.55708E+03	-.96760E-05 -.75766E+02 -.45923E+03	.47265E-03 .65027E+02 .26137E+02	-.15617E+01 -.26918E+01	.59534E+00 .10262E+01	-.27856E+01 -.48015E+01
3	-.20570E-06 .21677E+02 .17483E+03	-.67240E-06 .50120E+02 .27289E+03	.47801E-03 -.13719E+02 .52811E+02	-.12414E+01 -.21398E+01	.77537E+01 .13365E+02	-.18088E+02 -.31178E+02
4	.10228E-05 -.10697E+03 -.55615E+03	.84486E-06 -.63507E+02 -.40632E+03	.48066E-03 .61763E+02 .25532E+02	-.29678E-01 -.51155E-01	.52815E+00 .91037E+00	-.11053E-01 -.19051E-01

END DATE : 7- 3-2020  
 END TIME : 13:10:56  
 END OF TEXT OUTPUT FILE

**Figura 55.** Esfuerzos en fibra superior e inferior de base estabilizada (15cm)  
 . Fuente: 3DMOVE, 2020.

NOTE :  
DISPLACEMENTS : X-DISP, Y-DISP, Z-DISP  
NORMAL STRAINS : EXX, EYY, EZZ  
NORMAL STRESSES : SXX, SYY, SZZ  
ms : micro-strain  
SHEAR STRAINS : GXY, GXZ, GYZ  
SHEAR STRESSES : TXY, TXZ, TYZ

POINT	X-DISP(m)	Y-DISP(m)	Z-DISP(m)	Gxy(ms)	Gxz(ms)	Gyz(ms)
	Exx(ms)	Eyy(ms)	Ezz(ms)	Txy(kPa)	Txz(kPa)	Tyz(kPa)
	Sxx(kPa)	Syy(kPa)	Szz(kPa)			
1	.11081E-07	.36692E-05	.41553E-03			
	-.92283E+00	-.45884E+01	.10755E+03	.72149E+00	.18457E+02	.12977E+01
	.17270E+03	.16006E+03	.54665E+03	.12436E+01	.31814E+02	.22368E+01
2	.72261E-06	-.76799E-05	.40785E-03			
	-.75608E+02	-.56191E+02	.47351E+02	-.11248E+01	.33601E+00	-.20466E+01
	-.40621E+03	-.33927E+03	.17672E+02	-.19388E+01	.57917E+00	-.35277E+01
3	-.17424E-06	-.66688E-06	.41374E-03			
	.18390E+02	.49692E+02	-.10389E+02	-.12408E+01	.66067E+01	-.18224E+02
	.16284E+03	.27075E+03	.63628E+02	-.21388E+01	.11388E+02	-.31412E+02
4	.75220E-06	.71494E-06	.41322E-03			
	-.78709E+02	-.53636E+02	.47575E+02	.46188E-01	.32763E+00	.95081E-01
	-.41746E+03	-.33102E+03	.17893E+02	.79613E-01	.56472E+00	.16389E+00

**Figura 56.** Esfuerzos en fibra superior e inferior de base estabilizada (20cm)  
Fuente: 3DMOVE, 2020.

Ante lo anterior especificado, se hace el análisis de los modelos con la base de 20cm. Los Cuadros 25, 26 y 27 resumen lo obtenido.

**Cuadro 25.** Modelo de fatiga PCA, expuesto por: Zhou, Emmanuel y Scullion (2008)

Parámetro	Valor
Módulo de flexotracción a los 28 días E (psi)	105.21
Máximo esfuerzo en parte inferior (kPa)	417.46
Máximo esfuerzo en parte inferior (psi)	60.53
Número Pasadas Eje Equivalente (N)	1530599.33
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 26.** Modelo de fatiga Guía de Diseño de Pavimentos Australiana, expuesto por: Leiva (2005), sección 2

Parámetro	Valor
Módulo de flexotracción a los 28 días E (psi)	105.21
Módulo de flexotracción a los 28 días E (Mpa)	0.73
Coefficiente Poisson ( $\mu$ )	0.25
Deformación tensional en fibra inferior ( $\epsilon$ ) (ms)	78.71
Número Pasadas Eje Equivalente (N)	205231143.44
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

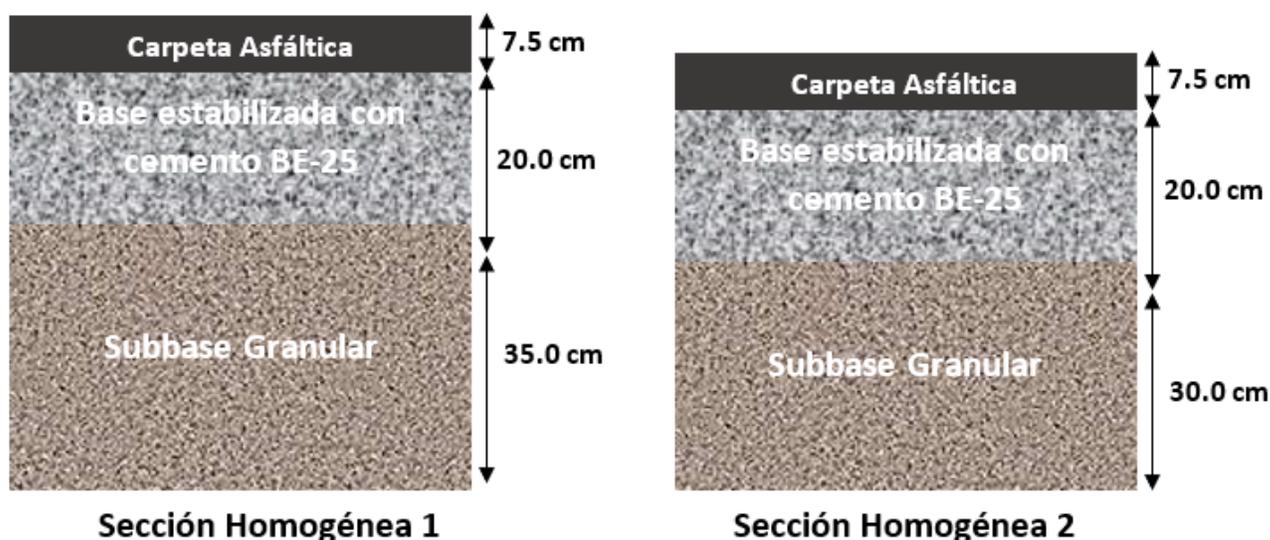
Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 27.** Modelo de fatiga en fibra superior, expuesto por: Li y col. (2019), sección 2

Parámetro	Valor
Resistencia a Compresión $f'_c$ (psi)	426.70
Máximo esfuerzo en parte superior (kPa)	546.65
Máximo esfuerzo en parte superior (psi)	79.26
Número Pasadas Eje Equivalente (N)	4840586.82
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría propia, 2020.

Con relación a lo anteriormente calculado y de forma representativa, se puede generar la Figura 57 que resume los diseños de pavimentos semi-rígidos para cada sección:



**Figura 57.** Estructura de pavimento semi-rígido propuesta para cada sección  
Fuente: Autoría propia, 2020.

## Estructuras de pavimento rígido

Al igual que las dos tipologías anteriores, se genera el dimensionamiento de los espesores por medio de la metodología de AASHTO (1993); para luego generar una comprobación de los mismos por criterios mecanísticos-empíricos. De forma paralela se da un diseño del acero requerido, tanto para juntas transversales como longitudinales.

### Pavimento rígido para sección homogénea 1

En cuanto al dimensionamiento inicial por la metodología AASHTO (1993), se pueden exponer los siguientes parámetros obtenidos en función de los Apéndices 14 y 15. Donde se

genera el ejercicio de variar los ejes equivalentes de diseño para pavimentos rígidos, según AASHTO (1993). El Cuadro 28 resume los resultados de la comparativa.

**Cuadro 28.** Espesores de losa y módulos de reacción (K), según AASHTO 1993, para condiciones evaluadas

Parámetro	Diseño Definitivo	Variando EEQ
K compuesto de subrasante (Kx) (pci)	200.00	190.00
K corregido por estrato rígido (pci)	200.00	190.00
Daño relativo ( $\mu f$ )	30.00	32.00
K efectivo corregido por (LS) (Kefectivo) (pci)	70.00	65.00
Espesor de subbase granular (cm)	25.00	25.00
Espesor de losa de concreto (cm)	16.50	18.00

Fuente: Autoría Propia, 2020.

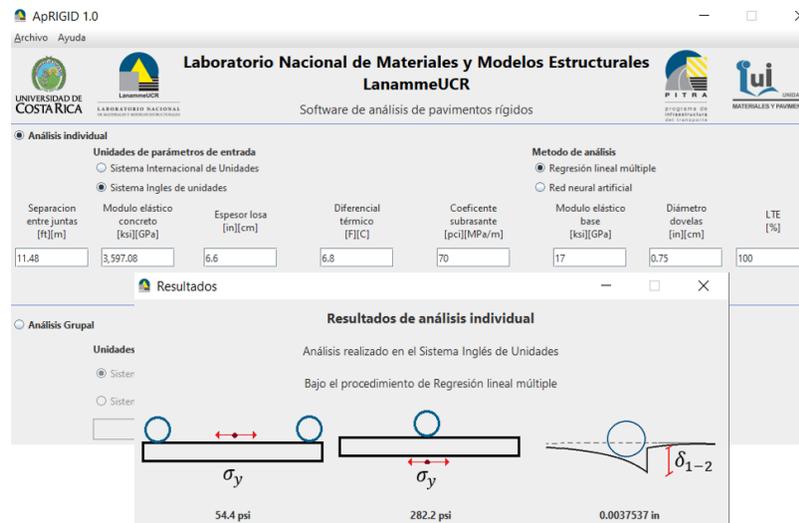
Para el caso del acero, tomando el espesor definitivo, se obtiene lo expuesto en el Apéndice 16 y resumido en el Cuadro 29.

**Cuadro 29.** Distribución de acero en losas de sección 1

Acero	No. Varilla (1/8in)	Separación (cm)
Dovelas en juntas transversales	6	30.00
Barras de Amarre longitudinal	3	60.00

Fuente: Autoría Propia, 2020.

Finalmente, se evalúan los modelos de desempeño por escalonamiento, fatiga y bombeo, con las dimensiones determinadas y con los esfuerzos calculados con la ayuda de AP-Rigid, que se muestran en los Cuadros 30, 31, 32 y la Figura 58, respectivamente.



**Figura 58.** Esfuerzos en losa de sección 1

. Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 30.** Modelo de bombeo, expuesto por Huang (2004), sección 1

<b>Parámetro (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Ejes equivalentes ( $\times 10^6$ )	1.36
Tipo de Suelo según AASHTO (S)	1.00
Precipitación anual (cm)	156.14
Espesor de losa "H" (in)	6.60
Índice de congelamiento	0.00
Índice de bombeo	1.00
Condición (Índice obtenido menor o igual a 1.0)	Cumple

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 31.** Modelo de escalonamiento, expuesto por Huang (2004), sección 1

<b>Parámetro (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Ejes equivalentes ( $\times 10^6$ )	1.36
Esfuerzo máximo en losa (psi)	282.20
Espaciamiento de juntas transversales (JS) (ft)	11.48
Coefficiente de Subrasante (Kefectivo) (pci)	70.00
Escalonamiento del pavimento (in)	0.00
Condición (escalonamiento menor o igual a 0.2 in)	Cumple

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 32.** Modelos de fatiga, expuestos por Monge (2013) y Anguas, Gómez y Sesma (2002), sección 1

<b>Parámetro (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Esfuerzo máximo en losa (psi)	282.20
Módulo de Ruptura concreto ( $S_c$ ) (psi)	644.97
Número de repeticiones a falla por fatiga (N) Modelo para concreto MR-4.5 MPa Costa Rica ( $\times 10^6$ )	3690.00
Relación SR (PCA)	0.47
Número de repeticiones a la falla (N) PCA ( $\times 10^6$ )	3670.00
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría Propia, 2020.

## **Pavimento rígido para sección homogénea 2**

De la misma forma, en cuanto al dimensionamiento inicial por la metodología AASHTO (1993), se pueden exponer los siguientes parámetros obtenidos en función de los Apéndices 17 y 18. Se hace el ejercicio de variar los ejes equivalentes de diseño para pavimentos rígidos, según AASHTO (1993). Se resume lo obtenido de la comparativa en el Cuadro 33.

**Cuadro 33.** Espesores de losa y módulos de reacción (K), según AASHTO 1993, para condiciones evaluadas

Parámetro	Diseño Definitivo	Variando EEQ
K compuesto de subrasante ( $K_x$ ) (pci)	280.00	265.00
K corregido por estrato rígido (pci)	280.00	265.00
Daño relativo ( $\mu f$ )	22.00	25.00
K efectivo corregido por (LS) ( $K_{efectivo}$ ) (pci)	90.00	80.00
Espesor de subbase granular (cm)	25.00	25.00
Espesor de losa de concreto (cm)	16.50	18.00

Fuente: Autoría Propia, 2020.

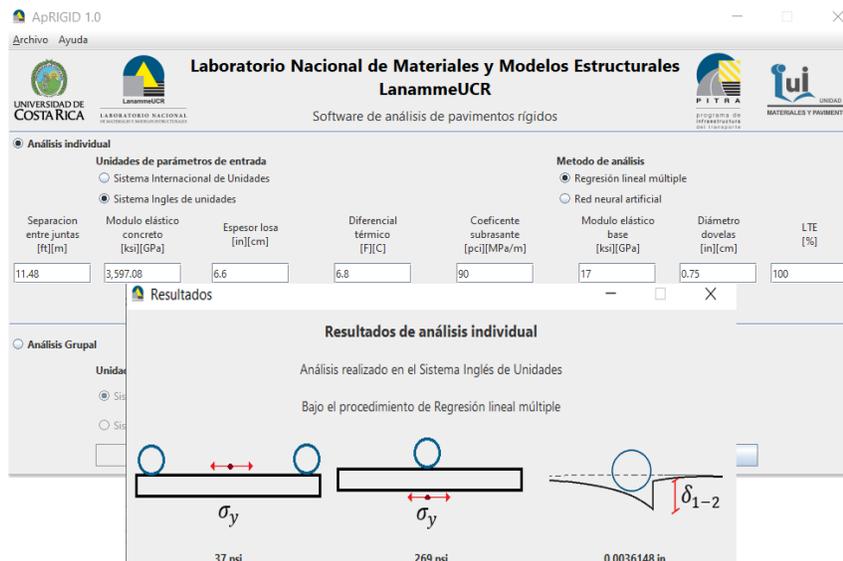
Para el caso del acero, tomando el espesor definitivo, se obtiene lo expuesto en el Apéndice 19 y resumido en el Cuadro 34.

**Cuadro 34.** Distribución de acero en losas de sección 2

Acero	No. Varilla (1/8in)	Separación (cm)
Dovelas en juntas transversales	6	30.00
Barras de Amarre longitudinal	3	60.00

Fuente: Autoría Propia, 2020.

Finalmente, se evalúan los modelos de desempeño por escalonamiento, fatiga y bombeo, con las dimensiones determinadas y con los esfuerzos calculados con la ayuda de AP-Rigid, que se muestran en los Cuadros 35, 36, 37 y la Figura 59, respectivamente.



**Figura 59.** Esfuerzos en losa de sección 2 . Fuente: Autoría propia, 2020.

**Cuadro 35.** Modelo de bombeo, expuesto por Huang (2004), sección 2

<b>Parámetro (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Ejes equivalentes ( $\times 10^6$ )	1.36
Tipo de Suelo según AASHTO (S)	1.00
Precipitación anual (cm)	156.14
Espesor de losa "H" (in)	6.60
Índice de congelamiento	0.00
Índice de bombeo	1.00
Condición (Índice obtenido menor o igual a 1.0)	Cumple

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 36.** Modelo de escalonamiento, expuesto por Huang (2004), sección 2

<b>Parámetro (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Ejes equivalentes ( $\times 10^6$ )	1.36
Esfuerzo máximo en losa (psi)	269.00
Espaciamiento de juntas transversales (JS) (ft)	11.48
Coefficiente de Subrasante (Kefectivo) (pci)	90.00
Escalonamiento del pavimento (in)	0.00
Condición (escalonamiento menor o igual a 0.2 in)	Cumple

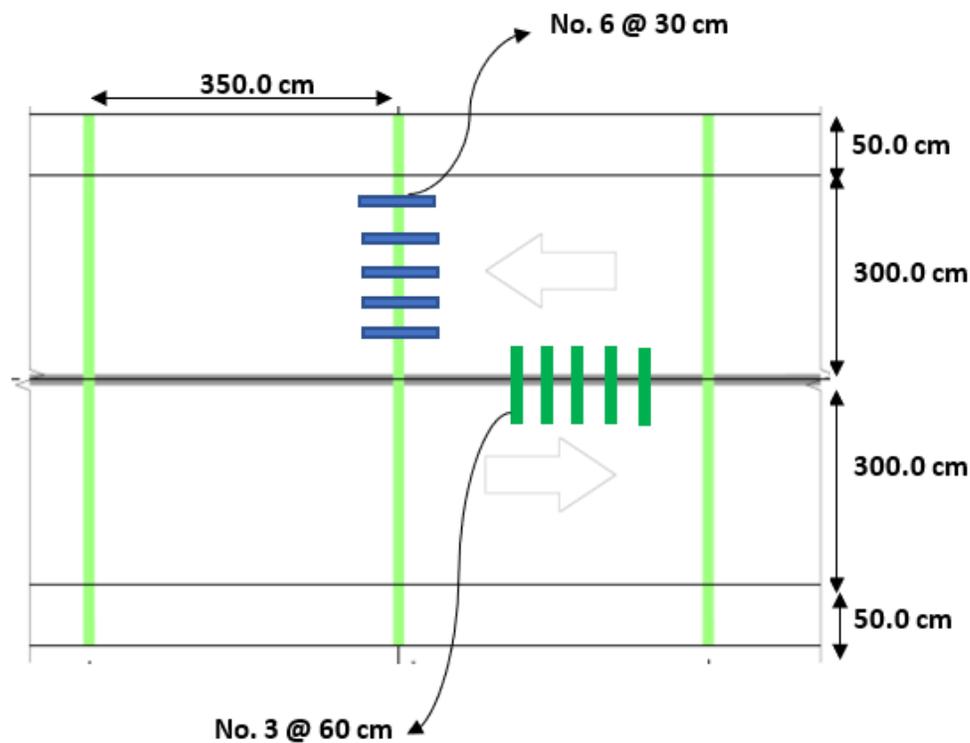
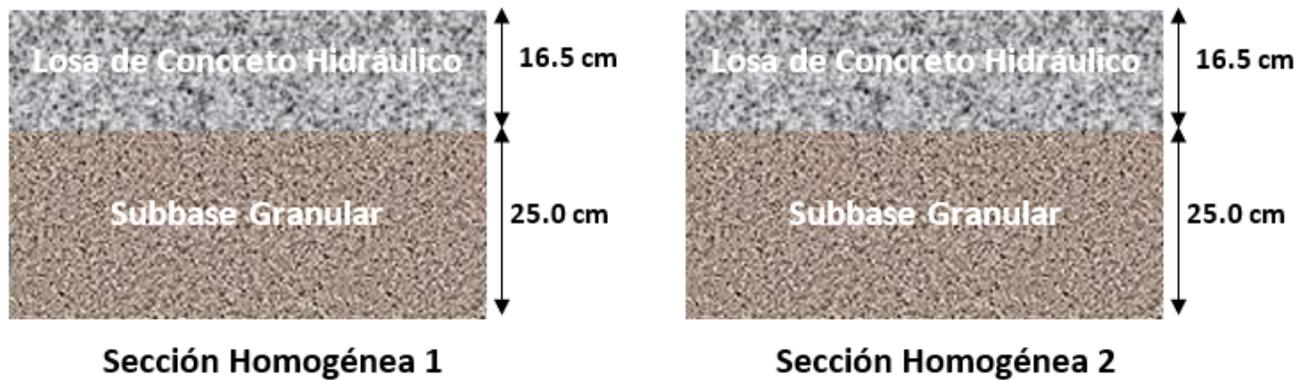
Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 37.** Modelos de fatiga, expuestos por Monge (2013) y Anguas, Gómez y Sesma (2002), sección 2

<b>Parámetro (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Esfuerzo máximo en losa (psi)	269.00
Módulo de Ruptura concreto ( $S_c$ ) (psi)	644.97
Número de repeticiones a falla por fatiga (N) Modelo para concreto MR-4.5 MPa Costa Rica ( $\times 10^6$ )	12000.00
Relación SR (PCA)	0.45
Número de repeticiones a la falla (N) PCA ( $\times 10^6$ )	No limitado
Condición (repeticiones menores a EEQ diseño)	Cumple

Fuente: Autoría Propia, 2020.

En la Figura 60 se presenta la estructura diseñada para ambas secciones, la cual es prácticamente coincidente al compartir dimensiones.



**Figura 60.** Estructura de pavimento rígido propuesta para cada sección (espaldón asfáltico). Fuente: Autoría propia, 2020.

## Costos de inversión inicial

A partir de la revisión de licitaciones, definición de actividades, contemplación de la subbase en sitio y detalle de costos (Apéndices 20, 21, 22 y 23), es posible presentar las siguientes inversiones obtenidas (con un tipo de cambio de ₡581/\$) para las tres estructuras. Ver Cuadros 38, 39 y 40.

**Cuadro 38.** Inversión inicial para estructura de pavimento flexible

Actividades para la Construcción de Estructura de Pavimento Flexible							
REGLÓN	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL (₡)	PRECIO TOTAL (\$)	PORCENTAJE
CR.110.06	global	Trabajo a costo más porcentaje	1	₡ 70,979,745.04	₡ 70,979,745.04	\$ 122,168.24	4.76%
CR.209.01	m³	Excavación para estructuras	16200	₡ 7,465.84	₡ 120,946,553.68	\$ 208,169.63	8.11%
CR.301.01	m³	Sub base granular graduación especial caso 2	6900	₡ 15,287.66	₡ 105,484,854.23	\$ 181,557.41	7.08%
CR.301.02	m³	Base granular graduación tipo C	8100	₡ 17,225.72	₡ 139,528,318.89	\$ 240,152.01	9.36%
CR.413.02	L	Riego de Imprímación	118800	₡ 647.62	₡ 76,937,301.45	\$ 132,422.21	5.16%
CR.405.03	m³	Capa de mezcla asfáltica en caliente tipo B preparada en planta	13662	₡ 71,490.11	₡ 976,697,872.46	\$ 1,681,063.46	65.52%
<b>MONTO TOTAL</b>					<b>₡1,490,574,645.75</b>	<b>\$ 2,565,532.95</b>	<b>100.00%</b>
<b>MONTO POR km</b>					<b>₡165,619,405.08</b>	<b>\$ 285,059.22</b>	<b>-</b>

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 39.** Inversión inicial para estructura de pavimento semi-rígido

Actividades para la Construcción de Estructura de Pavimento Semi-Rígido							
REGLÓN	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL (₡)	PRECIO TOTAL (\$)	PORCENTAJE
CR.110.06	global	Trabajo a costo más porcentaje	1	₡ 63,909,046.68	₡ 63,909,046.68	\$ 109,998.36	4.76%
CR.209.01	m³	Excavación para estructuras	24300	₡ 7,465.84	₡ 181,419,830.52	\$ 312,254.44	13.52%
CR.301.01	m³	Sub base granular graduación especial caso 2	11550	₡ 15,287.66	₡ 176,572,473.39	\$ 303,911.31	13.16%
CR.302.01	m³	Base estabilizada con cemento tipo BE-25	8100	₡ 21,891.48	₡ 177,320,960.70	\$ 305,199.59	13.21%
CR.413.02	L	Riego de Imprímación	118800	₡ 647.62	₡ 76,937,301.45	\$ 132,422.21	5.73%
CR.405.03	m³	Capa de mezcla asfáltica en caliente tipo B preparada en planta	9315	₡ 71,490.11	₡ 665,930,367.58	\$ 1,146,179.63	49.62%
<b>MONTO TOTAL</b>					<b>₡1,342,089,980.33</b>	<b>\$ 2,309,965.54</b>	<b>100.00%</b>
<b>MONTO POR km</b>					<b>₡149,121,108.93</b>	<b>\$ 256,662.84</b>	<b>-</b>

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 40.** Inversión inicial para estructura de pavimento rígido

Actividades para la Construcción de Estructura de Pavimento Rígido							
REGLÓN	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL (₡)	PRECIO TOTAL (\$)	PORCENTAJE
CR.110.06	global	Trabajo a costo más porcentaje	1	₡ 98,283,394.04	₡ 98,283,394.04	\$ 169,162.47	4.76%
CR.209.01	m³	Excavación para estructuras	13500	₡ 7,465.84	₡ 100,788,794.73	\$ 173,474.69	4.88%
CR.301.01	m³	Sub base granular graduación especial caso 2	8100	₡ 15,287.66	₡ 123,830,046.28	\$ 213,132.61	6.00%
CR.501.01	m²	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo	54000	₡ 32,241.65	₡ 1,741,049,039.84	\$ 2,996,642.07	84.36%
<b>MONTO TOTAL</b>					<b>₡2,063,951,274.89</b>	<b>\$ 3,552,411.83</b>	<b>100.00%</b>
<b>MONTO POR km</b>					<b>₡229,327,919.43</b>	<b>\$ 394,712.43</b>	<b>-</b>

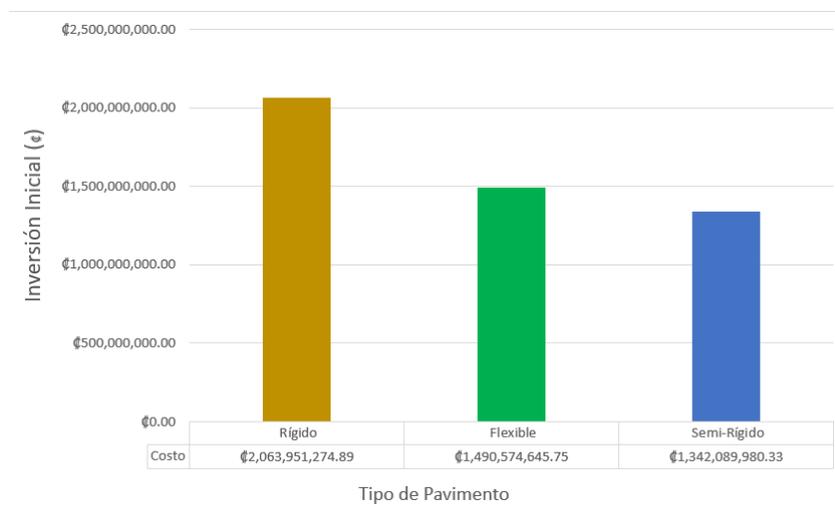
Fuente: Autoría Propia, 2020.

Con las inversiones definidas es posible construir el cuadro de variaciones porcentuales entre las alternativas. Ver Cuadro 41

**Cuadro 41.** Diferencias en inversiones iniciales de las estructuras

Pavimentos comparados	Diferencia (₡)	Diferencia (\$)	Diferencia (%)
Flexible Semi-rígido	148,484,665.42	255,567.41	9.96 %
Rígido Flexible	573,376,629.14	986,878.88	27.78 %
Rígido Semi-rígido	721,861,294.55	1,242,446.29	34.97 %

Fuente: Autoría Propia, 2020.



**Figura 61.** Inversión inicial en función de la estrategia de pavimentación  
Fuente: Autoría propia, 2020.

## Plan de conservación

Un elemento fundamental en la gestión y administración de pavimentos, es el plan de conservación. Que permite mostrar posibles intervenciones a lo largo de la vida útil de la estructura. Para esto se toma ayuda de los Anexos 7, 8 y 9, con el fin de establecer diferentes escenarios de mantenimiento e intervenciones con sus costos asociados. Donde a diferencia, en los segundos escenarios se generan intervenciones a un periodo más temprano.

**Cuadro 42.** Escenario 1 de intervenciones propuestas para pavimento flexible

Periodo (años)	Daño	Intervención	Región	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
4 (2024)	Fisuras menores en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	900	2,667.94	2,401,149.60
5 (2025)	Huecos por deficiencias constructivas	Bacheo a profundidad parcial con MAC	M41 (A2)	ton	1366	71,592.00	97,808,986.30
7 (2027)	Fisuras en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	1350	2,667.94	3,601,724.40
10 (2030)	Condiciones de tránsito han desgastado la estructura	Tratamiento Bituminoso de Preservación TS2	M47 (B)	m <sup>2</sup>	54000	2,123.36	114,661,548.00
13 (2033)	Fisuras menores en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	2200	2,667.94	5,869,476.80
14 (2034)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Levantamiento de tapas de pozos	M 40 (A)	u	5	46,975.40	234,877.01
14 (2034)		Bacheo de urgencia con MAC	M41 (D)	ton	137	78,491.84	10,723,555.18

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 43.** Escenario 2 de intervenciones propuestas para pavimento flexible

Periodo (años)	Daño	Intervención	Región	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
3 (2023)	Fisuras menores en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	660	₡2,667.94	₡1,760,843.04
4 (2024)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Levantamiento de tapas de pozos	M 40 (A)	u	3	₡46,975.40	₡140,926.21
4 (2024)		Bacheo de urgencia con MAC	M41 (D)	ton	96	₡78,491.84	₡7,506,488.63
8 (2028)	Capa de ruedo algo gastada y permeable	Tratamiento Bituminoso de Preservación TS2	M47 (B)	m <sup>2</sup>	54000	₡2,123.36	₡114,661,548.00
11 (2031)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Bacheo a profundidad parcial con MAC	M41 (D)	ton	273	₡78,491.84	₡21,447,110.36
12 (2032)	Fisuras en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	1350	₡2,667.94	₡3,601,724.40
13 (2033)	Presencia de huecos por acumulación de agua	Bacheo a profundidad parcial con MAC	M41 (A2)	ton	2049	₡71,592.00	₡146,713,479.45

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 44.** Escenario 1 de intervenciones propuestas para pavimento semi-rígido

Periodo (años)	Daño	Intervención	Región	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
4 (2024)	Fisuras menores en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	630	₡2,667.94	₡1,680,804.72
5 (2025)	Huecos por deficiencias constructivas	Bacheo a profundidad parcial con MAC	M41 (A2)	ton	932	₡71,592.00	₡66,687,945.21
7 (2027)	Fisuras en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	1000	₡2,667.94	₡2,667,944.00
10 (2030)	Condiciones de tránsito han desgastado la estructura	Tratamiento Bituminoso de Preservación TS2	M47 (B)	m <sup>2</sup>	54000	₡2,123.36	₡114,661,548.00
13 (2033)	Fisuras menores en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	1825	₡2,667.94	₡4,868,997.80
14 (2034)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Levantamiento de tapas de pozos	M 40 (A)	u	5	₡46,975.40	₡234,877.01
14 (2034)		Bacheo de urgencia con MAC	M41 (D)	ton	136.62	₡78,491.84	₡10,723,555.18

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 45.** Escenario 2 de intervenciones propuestas para pavimento semi-rígido

Periodo (años)	Daño	Intervención	Región	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
3 (2023)	Fisuras menores en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	456	¢2,667.94	¢1,217,249.45
4 (2024)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Levantamiento de tapas de pozos	M 40 (A)	u	3	¢46,975.40	¢140,926.21
4 (2024)		Bacheo de urgencia con MAC	M41 (D)	ton	96	¢78,491.84	¢7,506,488.63
8 (2028)	Capa de ruedo algo gastada y permeable	Tratamiento Bituminoso de Preservación TS2	M47 (B)	m <sup>2</sup>	54000	¢2,123.36	¢114,661,548.00
11 (2031)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Bacheo a profundidad parcial con MAC	M41 (D)	ton	273	¢78,491.84	¢21,447,110.36
12 (2032)	Fisuras en superficie de ruedo	Ruteo y sellado de grietas	M43 ( C )	m	945	¢2,667.94	¢2,521,207.08
13 (2033)	Presencia de huecos por acumulación de agua	Bacheo a profundidad parcial con MAC	M41 (A2)	ton	1584	¢71,592.00	¢113,369,506.85

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 46.** Escenario 1 de intervenciones propuestas para pavimento rígido

Periodo (años)	Daño	Intervención	Región	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
4 (2024)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Bacheo del pavimento de concreto	CR.502.02	m	42	¢ 24,818.83	¢ 1,042,391.03
6 (2026)	Algunas juntas han perdido su sello de poliuretano	Sellado de juntas y grietas	CR.502.02	m	4000	¢ 3,553.32	¢ 14,213,264.00
11 (2031)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Bacheo del pavimento de concreto	CR.502.01	m <sup>2</sup>	118	¢ 24,818.83	¢ 2,928,622.41
13 (2033)	Escalonamiento de ciertas losas de la estructura	Quebrado y asiento del pavimento de concreto	CR.502.06	m <sup>2</sup>	1200	¢ 3,031.86	¢ 3,638,227.20
15 (2035)	Nuevo reemplazo de juntas	Sellado de juntas y grietas	CR.502.02	m	29500	¢ 3,553.32	¢104,822,822.00
17 (2037)	Fracturación de losas y presencia de grietas	Fracturación y asiento del pavimento de	CR.502.07	m <sup>2</sup>	6200	¢ 3,031.86	¢ 18,797,507.20

Fuente: Autoría Propia, 2020.

**Cuadro 47.** Escenario 2 de intervenciones propuestas para pavimento rígido

Periodo (años)	Daño	Intervención	Región	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
8 (2028)	Algunas juntas han perdido su sello de poliuretano	Sellado de juntas y grietas	CR.502.02	m	6171	₡3,553.32	₡21,929,035.89
9 (2029)	Cambio en sello de parte de las juntas longitudinales	Bacheo del pavimento de concreto	CR.502.02	m	4500	₡3,553.32	₡15,989,922.00
10 (2030)	Huecos por trabajos de otras instituciones	Bacheo del pavimento de concreto	CR.502.01	m <sup>2</sup>	137	₡24,818.83	₡3,390,749.10
14 (2034)	Fracturación de losas y presencia de grietas	Fracturación y asiento del pavimento de concreto	CR.502.07	m <sup>2</sup>	5400	₡3,031.86	₡16,372,022.40
16 (2036)	Nuevo reemplazo de juntas	Sellado de juntas y grietas	CR.502.02	m	32400	₡3,553.32	₡115,127,438.40
18 (2038)	Escalonamiento de ciertas losas de la estructura	Quebrado y asiento del pavimento de concreto	CR.502.06	m <sup>2</sup>	1875	₡3,031.86	₡5,684,730.00

Fuente: Autoría Propia, 2020.

Es importante recalcar que se sabe que el dinero tiene valor en el tiempo, por lo que para cada intervención, se debería generar un valor futuro. Sin embargo, estos se deben ser retornados a valor presente, con el fin de calcular el valor presente neto, utilizado para el cálculo del costo anual uniforme equivalente. Es por esto que se presentan en valor actual para cada escenario.

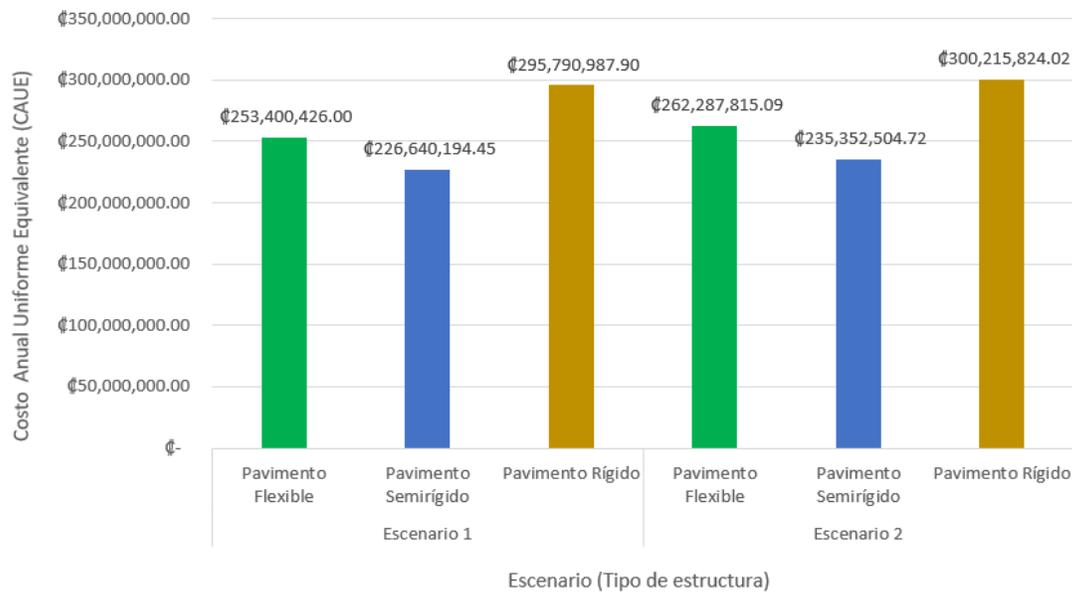
## Costo Anual Uniforme Equivalente

Con las inversiones iniciales, costos e intervenciones definidas; es posible generar la comparación económica por medio de un indicador como el CAUE. A partir del flujo de efectivo para cada estrategia y escenario (Apéndice 24), se puede determinar el valor de este con una tasa de descuento del 12% según la metodología:

**Cuadro 48.** Costo anual unitario equivalente en función de cada estrategia y escenario

Escenario	Tipo de estructura	CAUE	Periodo (año)
Escenario 1	Pavimento Flexible	₡ 253,400,426.00	15 (2035)
	<b>Pavimento Semirígido</b>	<b>₡226,640,194.45</b>	<b>15 (2035)</b>
	Pavimento Rígido	₡ 295,790,987.90	15 (2035)
Escenario 2	Pavimento Flexible	₡ 262,287,815.09	15 (2035)
	<b>Pavimento Semirígido</b>	<b>₡235,352,504.72</b>	<b>15 (2035)</b>
	Pavimento Rígido	₡ 300,215,824.02	15 (2035)

Fuente: Autoría Propia, 2020.



**Figura 62.** Gráfico de CAUE por cada tipo y escenario  
Fuente: Autoría propia, 2020.

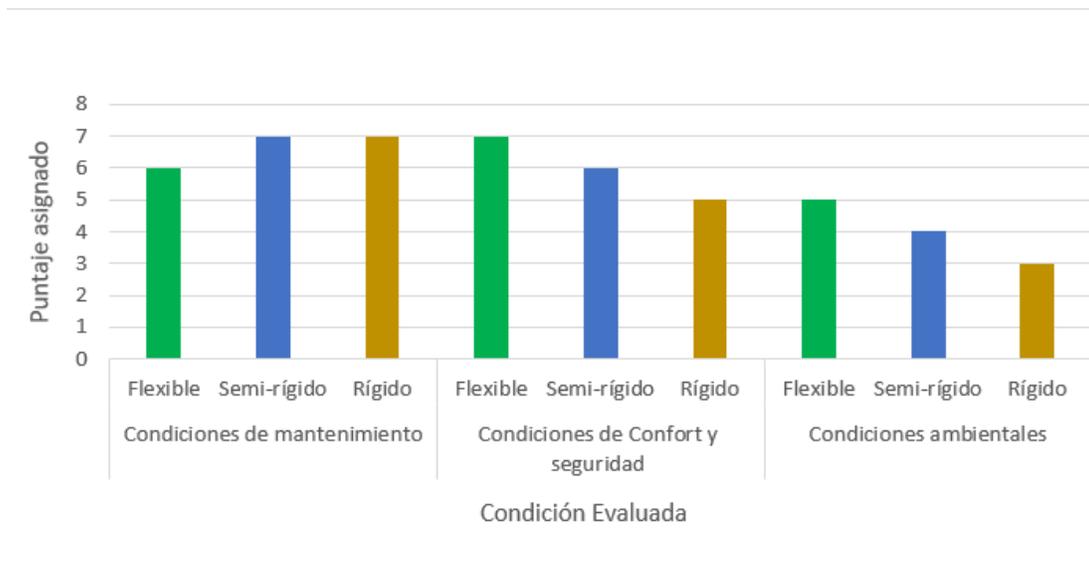
## Evaluación Técnica

De lo expuesto en el Apéndice 25, es posible generar una puntuación de 1 a 3, donde: 1 es la alternativa menos favorable, 2 una alternativa intermedia y 3 la más favorable. Se puede dar una repetición de puntaje entre alternativas; esto en caso que no haya justificación de desempate. Al final la mejor alternativa es la que acumula más puntos. Ver Cuadro 49, Figura 63 y Apéndice 25.

**Cuadro 49.** Evaluación técnica de acuerdo a apéndice 25

Concepto	Parámetro	Flexible	Semi-rígido	Rígido
<b>Condiciones de mantenimiento</b>	Deformabilidad	1	2	3
	Resistencia térmica	2	2	3
	Desvío de tráfico en intervenciones	3	3	1
<b>Condiciones de Confort y seguridad</b>	Confort en conducción	3	2	1
	Iluminación	1	1	3
	Visibilidad	3	3	1
<b>Condiciones ambientales</b>	Huella de carbono	2	2	2
	Reciclaje de materiales	3	2	1
<b>Resultado de Evaluación</b>		<b>18</b>	<b>17</b>	<b>15</b>

Fuente: Autoría Propia, 2020.



**Figura 63.** Gráfico de distribución de puntaje, evaluación técnica  
Fuente: Autoría propia, 2020.

## Herramienta de Georeferencia

Como valor agregado y con ayuda de la herramienta Google My Maps y el GPS Garmin 64s, se referencia cada uno de los puntos de ensayo de DCP. A partir de esto se decide crear una pequeña base de datos que puede ser de utilidad para tener una idea de las condiciones generales de sitio e información útil. **(dar click sobre figura para ingresar)**



Para alimentar dicha pequeña base de datos, con equipo del Laboratorio de Materiales del MOPT, se generan cinco ensayos de caracterización de límites y granulometrías, con muestras obtenidas de la segunda gira efectuada. Lo cual se expone en los apéndices 26, 27 y 28. Los ensayos fueron basados en las normas AASHTO T89 (2017) Límite líquido, AASHTO T90 (2016) Límite plástico, AASHTO T27 (2018b) & T11 (2018a) granulometría vía seca y lavado, que son típicamente las empleadas en dicho laboratorio. Además se agregan las secciones de control, sus características inherentes, algunas fotografías de la ruta y los puntos donde se aplicó el DCP. Esta base pretende ser una herramienta de apoyo y guía para los ingenieros a cargo del proyecto, brindándoles información sintetizada, puntual y accesible desde cualquier dispositivo móvil o lugar, que permita mostrar las condiciones de sitio.

# Análisis de los resultados

De manera inicial respecto a las generalidades del proyecto cabe resaltar la localización estratégica de la ruta, al brindar una opción de trayecto efectiva y directa entre la zona de Sardinal (Carrillo) y un foco turístico, como lo es el caso de: Playa Flamingo, Potrero, Las Catalinas, entre otras. Debidamente mejorada dicha vía, cumpliendo los requerimientos estructurales y de servicio, podría tornarse en la vía de comunicación utilizada por los turistas ó pobladores que viajan hacia la cabecera de provincia (Liberia) o viceversa.

Por otra parte, según Ulloa (2011), preliminarmente en todo diseño de una estructura de pavimento se requiere el conocimiento básico de las características y resistencias del suelo donde se llevará a cabo la construcción, de manera que pueda resistir los esfuerzos y deformaciones para un tránsito previsto. Con base en lo anterior, se puede hacer énfasis en la prueba de campo de DCP, la cuál fue elegida producto de la escasa información de sitio que el Laboratorio de Materiales del MOPT poseía (únicamente dos ensayos de caracterización y CBR sobre la subrasante) para 9 km de ruta. De esta prueba principalmente se puede rescatar que se practica cada 500m, por cuestiones de personal y tiempo de gira; pero claramente entre mayor sea la cantidad de muestras más representativa se torna la información; por ende es recomendable una mayor cantidad de puntos de muestreo. Además, al procesar los datos se nota la presencia de varios estratos por estación, por lo que se decide implementar el concepto de un módulo de rigidez equivalente, ligado a un factor corrección o variación estacional de  $1/3$ , justificado con el hecho del fuerte acondicionamiento que reciben las muestras en el ensayo de CBR de laboratorio (96 horas). Al compararse con los CBR dados por el Laboratorio del MOPT, las magnitudes de módulos de rigidez ajustados rondan en el mismo orden de magnitud. Incluso Castro (2020c) dice que para suelos finos los factores de variación estacional o de corrección pueden llegar hasta  $1/5$ .

Consecuentemente, a partir de los módulos obtenidos se prueban dos escenarios de segmentación homogénea por criterios estadísticos, producto de la longitud del proyecto y de la heterogeneidad de datos. Para el segundo escenario, específicamente la comparación de los grupos 2-3, de forma definitiva y con un 90 % de confiabilidad, se puede enunciar que no hay evidencia significativa de que las muestras provengan de diferentes poblaciones (siendo una sola sección homogénea). Dicha segmentación no solo facilita el proceso de diseño, sino que es fundamental para la fase constructiva, ya que no es viable la construcción de diferentes estructuras en tramos sumamente cortos. Esto es un aspecto fundamental en el análisis, ya que en todo proyecto constructivo la fase de diseño y ejecución deben de ir de la mano, con el fin de contemplar la posibilidad de realizar las actividades en el menor tiempo, con la mayor calidad posible y sin cuidando el aspecto económico.

En cuanto a la filosofía de diseño, se puede exponer el predimensionamiento a partir de consideraciones basadas en la metodología AASHTO 93, para la posterior revisión por funciones de

transferencia, que permiten evaluar la respuesta de la estructura en función de: las propiedades de los materiales que la componen, sus dimensiones y mecanismos de falla específicos; con el fin de verificar numéricamente si dichas dimensiones son adecuadas, ante un punto de vista de desempeño. De aquí es posible rescatar la importancia que tiene la información de entrada; ya que una sub-estimación de alguno de los parámetros podría incurrir en un acortamiento de la vida útil y una pérdida prematura de serviciabilidad. Mientras que una sobre-estimación de los mismos podría verse reflejada en un aumento de los costos, producto de un sobre-diseño.

Continuando con la idea anterior, se puede hacer hincapié en el tránsito promedio diario; que lo más recomendado para determinar este valor es efectuar un conteo vehicular, ante la imposibilidad de esto, se busca la manera más efectiva de compensarlo. Según Aguilar (2020), una alternativa es la utilización de valores de anuarios de forma conjunta con datos de crecimiento de flota vehicular, ó indicadores como el PIB; haciéndose uso de la primera opción al tener un panorama más específico del crecimiento por tipo de vehículo. En cuanto a las propiedades de los materiales, específicamente de la subbase, en términos de resistencia, se tiene acceso a fuentes cercanas con un valor de CBR mayor al mínimo expuesto por los requerimientos nacionales (30 %, según lo indica CR-2010). Esta es seleccionada e implementada en el diseño, con la hipótesis de que se puede aprovechar lo ya colocado por la Dirección de Conservación de CONAVI, redundando en una posible disminución de los costos asociados. En disyuntiva con lo anterior, es recomendable generar un análisis costo-beneficio, que de manera puntual determine si aprovechar dicho material incide en una disminución del presupuesto y si es viable a nivel constructivo. De forma paralela, se debería trabajar con ensayos de deflectometría de impacto y calicatas a cielos abierto, que permitan el retro-cálculo de módulos y establecimiento de espesores colocados; ya que una de las premisas asumidas es que el material mantiene sus propiedades desde la colocación en el año 2019.

Prosiguiendo la línea y en relación con el diseño de la estructura de pavimento flexible, se puede determinar una diferencia de 10cm entre los espesores de subbase, para la estructura de cada sección homogénea. Esto es producto de las distintas capacidades portantes del suelo, expresadas por los módulos resilientes efectivos y equivalentes de cada una de las subrasantes. Consecuentemente, a nivel mecanístico-empírico y producto de las pobres condiciones de dichas subrasantes, se puede identificar que el modelo que delimita el diseño es el ahuellamiento total, sesgado por el ahuellamiento de la subrasante para ambas secciones. Mientras que el agrietamiento ha manifestado su efecto bastante por debajo de los límites establecidos. Además, al contemplar únicamente conceptos mecanísticos-empíricos es posible identificar una reducción en un 1cm del espesor de la carpeta para ambos diseños, que basado en la longitud total del proyecto podría representar un ahorro de 1242 toneladas de mezcla asfáltica; pero, como lo indica Castro (2020a), se deben respetar los espesores dictados por AASTHO 93, por cuanto AASTHO se basa en criterios disímiles, como el concepto de índice de servicio. Finalmente, tomando en cuenta consideraciones constructivas, al tenerse una carpeta de 11cm y un tamaño máximo nominal de 12.5 mm, es preferible la colocación y compactación en dos capas (6cm y 5cm), con el fin de brindarle una energía de compactación óptima con los equipos disponibles en el país, sin la necesidad de utilizar equipo de dimensiones exuberantes.

En cuanto al diseño del pavimento semí-rígido, producto de la rigidez que brinda su base estabilizada, se establece una capa de ruedo propuesta respecto a los valores mínimos recomendados por AASHTO (1993). En cuanto a dicha base estabilizada, se trabaja con suposiciones de dosificación y resistencia, pero se debe resaltar que estas variables dependen de un diseño en específico. Como bien lo indica Ávila (2012), para un correcto desempeño de la base y una disminución del potencial de agrietamiento, se debe garantizar una adecuada combinación de cuatro factores preponderantes: el agregado, el agua, el cemento y la energía de compactación. Esto con el fin de no incurrir en dosificaciones menores o mayores de cemento, que puedan incidir en una disminución ó aumento de rigidez, que determinaría una mayor susceptibilidad al agrietamiento por retracción y fatiga, como lo indica Ávila (2012). Siendo así, con la evaluación de tres modelos de desempeño, se verifica el predimensionamiento generado por AASHTO 93. Para la sección 1 se comprueba un cumplimiento de las dimensiones expuestas; contrario a lo que sucede en la sección 2 en la cual se debe aumentar en 5cm la base estabilizada, producto de un incumplimiento en el modelo de fatiga detallado por Zhou, Emmanuel y Scullion (2008), que en todos los casos es el que rige el diseño. Es importante resaltar la revisión y cumplimiento del modelo de compresión en la fibra superior de la base estabilizada, por medio de lo expuesto por Li y col. (2019), quienes concuerdan que este efecto (denominado en inglés “crushing fatigue”) puede producir ahuellamientos en este tipo de pavimentos.

Quedando los dos diseños sumamente similares, específicamente variando en 5cm de sub-base granular, que podría ser bastante ventajoso en términos constructivos ya que no habrían diferencias exuberantes entre las dos secciones. De otra manera, al comparar los diseños del pavimento flexible con los del semi-rígido se puede evidenciar un ahorro de carpeta de ruedo de 3.5cm para el último mencionado, que se expresaría como una reducción de aproximadamente 4347 toneladas de mezcla asfáltica para todo el proyecto, que sin duda alguna llegarían a disminuir los costos de forma considerable. Respecto a esta temática finalmente se debe resaltar lo expuesto por Ávila (2012) a nivel constructivo, quien indica que para el caso de rutas nacionales no es recomendable la colocación de este tipo de bases con niveladora, ya que el producto final es más variable en cuanto a resistencia y espesor; incurriendo en el posible rechazo, ya que se deben extraer núcleos como criterio de aceptación.

De forma secuencial respecto al pavimento rígido, se puede notar una diferencia explícita en el dimensionamiento AASHTO 93, al tomar como variable de partida, la diferencia de los ejes equivalentes de diseño. Donde numéricamente se tiene un incremento de 1.5 cm en las losas de ambas secciones, dictando la significancia que podría tener esta variación. Al hecho de que los factores de equivalencia de carga, para un mismo tipo de vehículo, son diferentes en función del tipo de estructura (el paso del vehículo genera diferente daño en la estructura), por lo que la cantidad de los ejes equivalentes de diseño debería variar bajo ese principio. Siendo este un punto de partida para el posible estudio o determinación de los factores camión asociados a este tipo de pavimentos a nivel nacional.

Por otra parte, se puede notar el cumplimiento a partir del análisis con los modelos de desempeño para ambas secciones. En este caso para los diseños no se presentaría el efecto de

escalonamiento. De igual manera respecto al efecto de fatiga, que dicta un cumplimiento de los límites establecidos por los ejes equivalentes de diseño, así como el modelo de bombeo, que se encuentra más sesgado al límite definido, pero se genera de la misma forma, un cumplimiento.

En el caso del diseño del acero transversal se puede notar que para el caso de la primera sección, éste se encuentra holgado, específicamente con un 56.34 % de eficiencia del esfuerzo aplicado respecto a la resistencia. Sin embargo, es necesario colocar dovelas No. 6 según recomendaciones de acero en función del espesor de la losa, dictadas por la PCA y expuestas por Castro (2019a). Mientras que para la segunda sección se tiene un porcentaje de eficiencia del 94.35 % que evidencia el aprovechamiento del acero. En el caso del acero longitudinal se puede ver la poca cantidad de acero necesaria. Lo que lleva a pensar y sugerir la posibilidad de implementar alguna metodología de diseño de losas de menor dimensión, en donde el acero se vuelve innecesario y los esfuerzos son recibidos por la interacción entre losas. Un claro ejemplo lo expone Covarrubias (2012), donde se reduce la dimensión de las losas para generar un diseño optimizado. En este caso se podría pensar en losas de 1.5m por 1.5m, reduciendo el costo asociado al acero.

En cuanto a los costos de inversión inicial es posible comparar las estructuras y evidenciar el cumplimiento de lo descrito por Castro (2019b), quien ha indicado que el pavimento rígido tiende a poseer los mayores costos de inversión; mientras que, en el caso del flexible y semi-rígido, en ciertas condiciones son equiparables. En este caso por la posible contemplación de la subbase en el diseño, así como la reducción de 3.5cm de capa de rodadura respecto al flexible, hacen que el pavimento semi-rígido se convierta en la alternativa más viable, en términos de inversión inicial; variando en un 9.96 % respecto al flexible y 34.97 % respecto al rígido. Pero cómo se sabe, éste no debe ser el único criterio de elección, ya que el dinero tiene valor en el tiempo y los procesos de mantenimiento pueden encarecer una estructura. De aquí la relevancia de definir escenarios de conservación, que muestren posibles intervenciones a lo largo de la vida útil, e intrínsecamente representen desembolsos en el flujo de efectivo. En sí es un proceso de bastante incertidumbre, ya que se torna complicado establecer el tiempo exacto en que la estructura sufrirá algún daño o intervención. Y mayoritariamente estos son definidos a través de la experiencia acumulada, acompañada en algunas ocasiones de modelos de desempeño que dan numéricamente un valor aproximado. Siendo así, los escenarios de intervención expuestos dan una idea global de las acciones a generar en cada tipo de estructura, dentro de su período de diseño definido. Se concuerda con lo expuesto por Castro (2019b), de que los pavimentos flexibles tienden a tener mayores desembolsos por cuestión de mantenimiento y conservación.

De la misma forma, se debe hacer énfasis en que los costos dependen de una gran cantidad de variables, como lo es el caso de: rendimientos ligados a la empresa, equipo disponible, proveedores, frentes de trabajo, entre otros; que de forma conjunta inciden en posibles variaciones respecto al costo final. De lo anterior, es posible fundamentar que una base de datos con costos relacionada con empresas del mercado nacional y proyectos cercanos a la zona, se puede convertir en un mecanismo y herramienta útil para generar un valor aproximado y justificado del proyecto en evaluación. Además se debe resaltar una ventaja sumamente importante del

proyecto, y es que este cuenta con dos fuentes de materiales pétreos (agregados) prácticamente en el centroide de la carretera, siendo esto un posible factor de reducción de los costos asociados a los acarreos. Se recomienda evaluar la alternativa de instalar una planta de concreto en el sitio (en el caso del pavimento rígido), y determinar las posibles plantas de producción de mezcla asfáltica para contemplar las posibles fluctuaciones del presupuesto debido a los acarreos.

Además, con ayuda de un indicador como es el CAUE, se pueden comparar alternativas de diferentes vidas útiles entre sí. Esto a partir de un costo uniforme en cada lapso, que en sí representa los desembolsos periódicos necesarios para la operación del pavimento en buen estado. Dados los escenarios es el pavimento semi-rígido el que muestra el menor costo anual uniforme equivalente, para una tasa del 12 %. Variando en un porcentaje en ambos escenarios del 23.37 % y 21.60 % respecto al rígido; y 10.56 % y 10.27 % respecto al flexible. Siendo la alternativa más viable en términos económicos, ya que periódicamente evidencia menos desembolsos.

De forma complementaria, para la elección de una alternativa y en busca de un análisis que contemple diferentes puntos de vista, se evidencia una pequeña comparación técnica. De la cuál es posible determinar que en condiciones de confort y seguridad la alternativa más viable es el pavimento flexible, principalmente por su mayor capacidad de absorber las vibraciones brindando comodidad a los usuarios. Mientras que en condiciones de mantenimiento se puede evidenciar un empate entre el rígido y semi-rígido, sesgado principalmente por contemplar los desvíos de tráfico durante intervenciones, que castiga al primero mencionado. En cuanto a las condiciones ambientales y producto de la posibilidad de reciclaje, es el pavimento flexible el que lleva la delantera. Los ahorros a nivel energético y económico fundamentan su ganancia. De forma complementaria, Sebaaly (2009) señala en su estudio, que la adición de contenidos de RAP (pavimentos de asfalto reciclado, según su nombre en inglés) en mezclas convencionales entre un 20 % y 50 %, podrían incurrir en ahorros económicos entre un 14 % y 34 %, por tonelada de asfalto producida. Lo que sería un gran aporte para el proyecto al utilizar este tipo de materiales ó bien contemplarlo para el final de su vida útil. Esto anterior basado en el concepto de economía circular, donde todos los residuos de una forma técnica se incorporen nuevamente al proceso.

Así que, en resumidas cuentas, en cuanto lo descrito para cada una de las alternativas de pavimentación y su comparativa, es posible evidenciar que la estrategia que más se adecúa a las condiciones del sitio, que presenta el menor costo en el tiempo para la administración (de acuerdo a lo establecido por el CAUE), además de una condición estructural adecuada según el diseño definido, y un carácter funcional en términos de seguridad, confort y mantenimiento, es el caso del pavimento semi-rígido. Reuniendo las condiciones de la definición completa de pavimento descrita por Castro (2019b), que contempla el factor estructural y funcional. Sin embargo, se cuenta con los diseños e información de las otras tipologías en caso de que se varíen las condiciones y se decida hacer una comparación a futuro.

# Conclusiones

1. En síntesis, en función de las capacidades portantes de la subrasante y a partir de criterios estadísticos a un 90 % de significancia, se determinan dos secciones homogéneas que van de los estacionamientos 0+000 al 2+500 y del 2+500 al 9+500. Con módulos resilientes equivalentes respectivamente 2978.1 psi y 4656.58 psi.
2. El contraste de la metodología AASHTO 93 vrs criterios mecanísticos-empíricos, para el caso del pavimento flexible, muestra que se obtuvieron dimensiones mayores por AASHTO, según lo requerido por los criterios mecanísticos-empíricos. Caso contrario para una sección del semi-rígido donde se debió aumentar el espesor de la base estabilizada; por esto se concluye que ambas metodologías se fundamentan como complementarias.
3. Es posible concluir que si solo se tomasen los criterios mecanísticos-empíricos, se podría reducir el espesor de la carpeta en 1cm para el caso del pavimento flexible. Incurriendo en un posible ahorro de 1890 toneladas de mezcla asfáltica para todo el proyecto.
4. Respecto a las funciones de transferencia evaluadas se nota que para el pavimento flexible la falla se encuentra regida por el ahuellamiento total, mientras que el semi-rígido por la fatiga en la fibra inferior de la base estabilizada. Para el pavimento rígido el bombeo de finos.
5. Dentro de lo investigado se puede puntualizar que la MEPDG, no toma en cuenta el fenómeno de la fatiga producida por la repetición de esfuerzos compresivos en la fibra superior de la base estabilizada (del inglés "crushing fatigue"). Por lo que se debe evaluar por otros modelos.
6. En resumen, para el diseño de pavimentos rígidos, una variación de los ejes equivalentes de carga, respecto a los determinados para el pavimento flexible (ante recomendaciones de diseño), puede traer aumentos significativos en el espesor de losa, en este caso 1.5cm de incremento.
7. En cuanto a inversión inicial se puede sintetizar que la alternativa de menor costo es la estructura asociada al pavimento semi-rígido, con un valor total de \$1 342 089 980.33 y \$149 121 108.93 por km. Esto con un porcentaje de variación de 9.96 % respecto al flexible y 34.97 % al rígido. En términos de conservación anual un porcentaje de variación de 10.56 % inferior al flexible y 27.56 % superior al rígido. Además la incorporación del material de subbase existente en el diseño, representa un ahorro económico para todas las estructuras.
8. La actividad que representa el mayor costo asociado a la inversión inicial de los tres tipos de pavimento, es la construcción de la superficie de ruedo, donde los porcentajes rondan entre el 84.4 % (rígido) y el 49.6 % (semi-rígido).

9. En síntesis, pese a la gran durabilidad de la estructura de pavimento rígido y sus menores costos de intervención, no es una alternativa viable en términos económicos, debido a su alta inversión inicial, en este proyecto en específico y según el CAUE calculado.
10. Finalmente la estructura de pavimento que presenta mayores réditos en términos económicos, estructurales y técnicos, tanto para el usuario como para la administración, es la estructura de pavimento semi-rígido. La cual es elegida como la alternativa de pavimentación definitiva. Con 7.5 cm de carpeta asfáltica, una base estabilizada BE-25 de 20cm para ambas secciones. Diferenciándose en la subbase granular con 35cm para la primera sección y 30cm para la segunda.

# Recomendaciones

1. Respecto a los ensayos para la caracterización del material presente en sitio, se recomienda la utilización del ensayo de deflectometría de impacto para el retrocálculo de módulos, con la finalidad de conocer la condición actual del material que fue colocado, Así como la generación de calicatas que permitan evidenciar los espesores presentes del material colocado, junto a posibles ensayos de laboratorio como CBR, que den un panorama más amplio de la subrasante actual.
2. Es posible recomendar la generación de un conteo vehicular que permita conocer la magnitud actual del tráfico ó bien la implementación de espectros de carga que den un panorama a un mayor nivel de detalle. Además del cálculo de un factor de atracción al proyecto, ya que producto de la ubicación estratégica podría ser muy frecuentado, sobrepasando los valores del diseño de forma prematura.
3. Se recomienda generar un análisis de costo-beneficio que evalúe la premisa utilizada de contemplar la subbase presente en el diseño en términos económicos y constructivos, al tener un CBR superior al establecido por CR-2010.
4. En cuanto a las pobres características de la subrasante, en términos de capacidad portante, es posible recomendar la estabilización de la mismo con algún agente estabilizador (cal, cemento, emulsión, agentes químicos), dependiendo de las propiedades del material del sitio.
5. Para el caso del costo anual uniforme equivalente se recomienda implementar algún mecanismo que permita cuantificar el valor residual de la estructura al final de su vida útil, con el fin de ser incorporado al flujo de efectivo.
6. Para el caso del diseño es indispensable contemplar los sistemas de drenajes, ya que la humedad tiende a ser el enemigo por excelencia del pavimento. Por lo que estos deben estar presentes en la estructura, para la adecuada disposición de las aguas.
7. Durante la vida útil de la estructura, es recomendable la constante inspección y supervisión de las obras, con el fin de llevar un registro y posteriormente establecer datos históricos que permitan establecer panoramas más reales de intervención en comparación a los contemplados en el diseño. De la misma manera es recomendable consultar el criterio de diferentes profesionales con el fin de tener un panorama más amplio de los posibles tiempos de intervención.
8. Se recomienda generar una evaluación a nivel social, que determine los beneficios directos en contra de los costos asociados para los usuarios. Con el fin de ser comparado con una tasa social de descuento mínima, como criterio de aceptación.

# Referencias

- Aguilar, I. (2020). *Proyección de Tránsito*. Material de Curso de Procesos Constructivos. Tecnológico de Costa Rica.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*.
- (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (A Manual of Practice)*. ISBN: 978-1-56051-423-7.
- (2016). *Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*.
- (2017). *Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*.
- (2018a). *Standard Method of Test for Materials Finer Than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*.
- (2018b). *Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2018). *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications ASTM D6951-18*.
- Anguas, P, J. Gómez y J Sesma (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte. URL: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt197.pdf>.
- Ávila, T. (2012). *Experiencia costarricense en diseño, aseguramiento de la calidad y construcción de bases estabilizadas con cemento*. Lanamme UCR. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1519/LM-PI-PU-001-12-EXPERIENCIA%5C%20COSTARRICENSE%5C%20EN%5C%20DISE%5C%20Y%5C%20CONSTRUCCION%5C%20DE%5C%20BASES%5C%20ESTABILIZADAS%5C%20CON%5C%20CEMENTO%5C%20CON%5C%20LANTAS%5C%20DE%5C%20COSTA%5C%20RICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- (2017). *Inspectores Viales Ciudadanos. Tema 6: Materiales Granulares en Estructuras de Pavimento*. Lanamme UCR.
- Castro, P. (2007). *Oficio DVOP-5170-07*. Ministerio Obras Públicas y Transportes.
- (2019a). *Diseño Estructural de Pavimentos Rígidos*. Material de Curso de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- (2019b). *Introducción al curso de Pavimentos*. Material de Curso de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- (2019c). *Materiales de pavimentos*. Material de Curso de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- (2020a). *Espesores mínimos de estructuras de pavimento. [En persona]*. Cartago, Costa Rica.
- (2020b). *Factores Camión Pavimentos Rígidos. [En persona]*. Cartago, Costa Rica.
- (2020c). *Módulo de Rigidez o CBR equivalente [En persona]*. Cartago, Costa Rica.
- Centro de Investigación en Tecnologías Viales (2018). *Grupo BITAFAL*. URL: <https://bitafal.com.uy/categorias/sami/>.
- Costa, A (2019). «Revista Asfalto y Pavimentación». En: *Patologías de los Pavimentos*. URL: <https://www.asefma.es/wp-content/uploads/2019/03/29.patologias-1-fusionado-comprimido.pdf>.

- Covarrubias, J. (2012). *Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada*. URL: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732012000300005](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732012000300005).
- Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. Cengage Learning Editores S.A. ISBN: 987-607-481-823-9.
- Diccionario de Geotecnia OnLine* (2020). URL: <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/ahuellamiento/>.
- Diez, J. (2008). *Evaporación, transpiración y evapotranspiración*. URL: <http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/cstierra.php.html>.
- Dirección de Vialidad y Ministerio de Obras Públicas de Chile (2016). *Instructivo de Inspección Visual de Caminos Pavimentados*. Chile. URL: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/INSTRUCTIVO%20DE%20INSPECCION%20VISUAL%20DE%20CAMINOS%20PAVIMENTADOS%20-%20DICIEMBRE%202016.pdf>.
- Dirección Nacional de la República de Chile (2002). *Catálogo de Deterioros de Pavimentos Rígidos*. URL: <http://dircaibea.org/sites/all/themes/dircaibea/images/vol12.pdf>.
- Elizondo, F. (2013). *Material de Curso Técnico en Diseño de Pavimentos*. Lanamme UCR.
- Flores, B. (2017). *Guanacaste sostiene el turismo nacional*. La República. URL: <https://www.larepublica.net/noticia/guanacaste-sostiene-el-turismo-nacional>.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. 2.<sup>a</sup> ed. Pearson Prentice Hall.
- Hurtado, R (2016). «Análisis comparativo entre pavimento flexible y rígido para uso en ruta cantonal de El Guarco». Tesis doct. Tecnológico de Costa Rica. URL: [file:///C:/Users/f41364/Downloads/Analisis\\_comparativo\\_pavimento\\_flexible\\_rigido\\_uso\\_ruta\\_cantonal\\_guarco.pdf](file:///C:/Users/f41364/Downloads/Analisis_comparativo_pavimento_flexible_rigido_uso_ruta_cantonal_guarco.pdf).
- Instituto Costarricense de Estadística y Censo (INEC) (2019). *Vehículos automotres en circulación según estilo*. URL: <https://www.inec.cr/documento/cuadro-924-costa-rica-vehiculos-automotores-en-circulacion-segun-estilo-2015-2017>.
- Karunaratne, A. y col. (2016). «Review of calculation procedures of thornthwaite moisture index and its impact on footing design». En: *Australian Geomechanics* 51, págs. 85-95.
- LABTOP CA (2020). *Reparaciones de Fisuras en Carretera Pavimentada con Mezcla Asfáltica y Análisis de Pavimentos*. URL: <http://laptop-ca.com/nuestros-clientes/proyectos-ejecutados/>.
- Leiva, F. (2005). *Desarrollo de leyes de fatiga para bases estabilizadas con cemento (informe de avance)*. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1446/LM-PI-PV-IN-16B-05%5C%20Desarrollo%5C%20de%5C%20leyes%5C%20da%5C%20fatiga%5C%20para%5C%20bases%5C%20estabilizadas%5C%20con%5C%20cemento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- (2006). *Desarrollo de una guía de diseño para pavimentos de bajo volumen de tránsito en Costa Rica*. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/440>.
- Li, X y col. (2019). «Field Calibration of Fatigue Models of Cementitiously Stabilized Pavement Materials for Use in the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide». En: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. DOI: 10.1177/0361198118821924.

- Loría, G. (2013). *Desarrollo de la Guía de Diseño de Pavimentos en Costa Rica: CR<sub>M</sub>E*. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/533/DESARROLLO%5C%20DE%5C%20LA%5C%20GUIA%5C%20DE%5C%20DISENO%5C%20DE%5C%20PAVIMENTOS%5C%20DE%5C%20COSTA%5C%20RICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Loría, G y col. (2010). *Experiences in the characterization of materials used in the calibration of the AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) for Flexible Pavement for Costa Rica*. Lanamme UCR. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/513/REVISTA%5C%20%5C%20c3%5C%89xito%5C%20de%5C%20los%5C%20ensayos%5C%20acelerados%5C%20a%5C%20escala%5C%20natural%5C%20en%5C%20Costa%5C%20Rica%5C%20-PEQ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Ministerio Obras Públicas y Transportes (MOPT) (2009). *Reglamento de circulación por carretera con base en el peso y las dimensiones de vehículos de carga (Decreto Ejecutivo No. 31363-MOPT)*.
- (2010). *Manual general de especificaciones para la construcción de caminos, carreteras y puentes CR-2010*.
- Miranda, R (2010a). «Deterioro de Pavimentos Flexibles y Rígidos». En: URL: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcm672d/doc/bmfcm672d.pdf>.
- (2010b). «Deterioro de Pavimentos Flexibles y Rígidos». En: URL: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcm672d/doc/bmfcm672d.pdf>.
- Monge, S. (2013). *Evaluación del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-4,5 MPa con adición de Fibras de Polipropileno*. UCR.
- Moore, D. (1994). *The basic practice of statistics*. Purdue University. ISBN: 0-7167-2628-9.
- Moreno, J. (2018). *Estadísticamente significativo. El valor p y sus controversias*. URL: <https://afanporsaber.com/estadisticamente-significativo-el-valor-p-y-sus-controversias#.XvIT0mhKhPY>.
- Perera, A. (2015). *Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica*. UCR.
- Riquelme, M. (2013). *Costo Anual Equivalente o Beneficio Anual Equivalente*. URL: <https://www.webywmpresas.com>.
- RTPE Multimedia (2016). *RTPE Multimedia*. URL: <http://rtpemultimedia.com/wp/se-haran-tareas-de-bacheo-y-repavimentacion-de-la-33-en-su-paso-por-rivadavia/>.
- Sánchez, F. (2009). *Módulo 18 Evaluación de Pavimentos*. URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/p%20agina\\_via/modulos/MODULO%5C%2018.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/p%20agina_via/modulos/MODULO%5C%2018.pdf).
- (2016). *Introducción al Diseño de Pavimentos*. URL: <https://docplayer.es/14890573-Introduccion-al-diseno-de-pavimentos.html>.
- Sebaaly, P. (2009). *RAP in HMA PAVEMENTS*. Universidad de Nevada en Reno.
- Trejos, C. y col. (2017). *Costa Rica's Mechanical Empirical Design Software for Flexible Pavements, CRME*. Lanamme UCR. URL: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1053/Costa%5C%20Rica%5C%20C2%5C%B4S%5C%20Mechanical%5C%20Empirical%5C%20Design%5C%20Software%5C%20For%5C%20Flexible.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Ulloa, A. (2011). *Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico*. URL: <http://kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/13371/8393-11762-1-SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Universidad Nacional de Colombia y Ministerio de Transporte de Colombia (2016). *Estudio e Investigación del Estado Actual de las obras de la Red Nacional de Carreteras*. URL: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/664-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-rigidos/file>.
- Zhou, F, F Emmanuel y T Scullion (2008). «A review of performance models and test procedures with recommendations for use in the Texas M-E Desing Program». En: URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/aa76/b5f3f22fdee71f4a312462110ded37acb358.pdf>.

# Apéndices

1.	Fotografías de levantamiento Visual generado en primera gira . . . . .	117
2.	Fotografías de ensayo de DCP en subrasante Ruta Nacional 911 . . . . .	118
3.	Resultados de ensayo DCP (ASTM D6951-2018) en subrasante . . . . .	119
4.	Módulo de rigidez (MR) equivalente de subrasante . . . . .	136
5.	Secciones Homogéneas . . . . .	140
6.	Tránsito Promedio Diario y Tasas de Crecimiento . . . . .	143
7.	Determinación de Módulos de rigidez y números estructurales pavimentos flexi- bles y semi-rígidos . . . . .	144
8.	Determinación de coeficiente de reacción efectivo de subrasante (k) . . . . .	145
9.	Determinación del Índice de Thornthwaite (TMI) . . . . .	146
10.	Diseño de Pavimento Flexible para Sección Homogénea 1, según metodología AASHTO (1993) . . . . .	147
11.	Diseño de Pavimento Flexible para Sección Homogénea 2, según metodología AASHTO (1993) . . . . .	148
12.	Diseño de Pavimento Semi-rígido para Sección Homogénea 1, según metodo- logía AASHTO (1993) . . . . .	149
13.	Diseño de Pavimento Semi-rígido para Sección Homogénea 2, según metodo- logía AASHTO (1993) . . . . .	150
14.	Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 1, según metodología AASHTO (1993) . . . . .	151
15.	Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 1 (Variando EEQ), según metodología AASHTO (1993) . . . . .	152
16.	Diseño de acero para pavimento rígido de sección homogénea 1 . . . . .	153
17.	Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 2, según metodología AASHTO (1993) . . . . .	154
18.	Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 2 (Variando EEQ), según metodología AASHTO (1993) . . . . .	155
19.	Diseño de acero para pavimento rígido de sección homogénea 2 . . . . .	156
20.	Resumen de costos utilizados en licitaciones indagadas . . . . .	157
21.	Memoria de cálculo de costos de inversión inicial pavimento flexible . . . . .	158
22.	Memoria de cálculo de costos de inversión inicial pavimento semi-rígido . . . . .	163
23.	Memoria de cálculo de costos de inversión inicial pavimento rígido . . . . .	168
24.	Flujo de efectivo neto para cada estrategia de pavimentación . . . . .	171
25.	Evaluación técnica de variables como alternativa de selección . . . . .	172
26.	Preparación de muestras previo a ensayos de laboratorio . . . . .	173
27.	Ensayos de límites y granulometrías . . . . .	174
28.	Resultados de ensayos de laboratorio (Valor agregado para herramienta) . . . . .	175
29.	Ilustración de estructura en sitio (Infraworks Autodesk) . . . . .	182

## Apéndice 1. Fotografías de levantamiento Visual generado en primera gira

Las imágenes tomadas permiten contemplar la condición actual de la ruta, así como las zonas intervenidas por directriz de CONAVI. Lo que permite establecer un proyecto aún más apegado a las condiciones reales que se presentan en la zona.



(a) Est. 4+000 (Transición lastre-emulsión)

Fuente: Autoría Propia



(b) Est. 5+500 sellado con emulsión

Fuente: Autoría Propia



(c) Presencia de quebrada Est. 8+500

Fuente: Autoría Propia



(d) Tajo Los Mañones Est. 4+500

Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 2. Fotografías de ensayo de DCP en subrasante Ruta Nacional 911

Las imágenes adjuntas permiten ilustrar parte del ensayo de DCP, el cual fue realizado en 4 días, donde en el primero se generó un estacionamiento del proyecto con ayuda de un GPS perteneciente al MOPT (Garmin 64S). Y los restantes tres días, se avanzaron 6 puntos de ensayo por día, aproximadamente.



(a) Previo ensayo DCP Est. 0+110  
Fuente: Autoría Propia



(b) Ensayo de DCP Est. 0+110  
Fuente: Autoría Propia



(c) Ensayo de DCP Est. 2+500  
Fuente: Autoría Propia

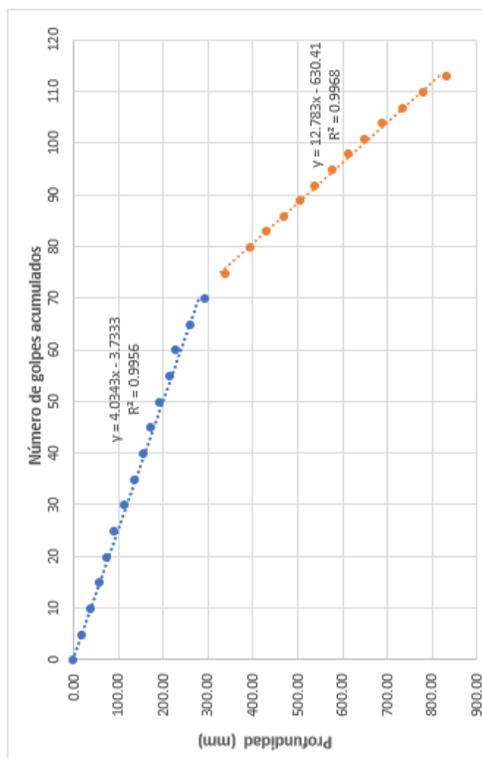


(d) Ensayo de DCP Est. 6+500  
Fuente: Autoría Propia

### Apéndice 3. Resultados de ensayo DCP (ASTM D6951-2018) en subrasante

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951			
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	Fecha:	25/02/20
Sección de Control:	51170	Encargado:	Ramón Saborío
Ubicación de punto:	Lado izquierdo	Peso Martillo(kg)	4.6
Estación	0+110	Lectura Inicial(cm)	36.5
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 295	4.03	2	8.07	28
2	339 - 835	12.78	2	25.57	8



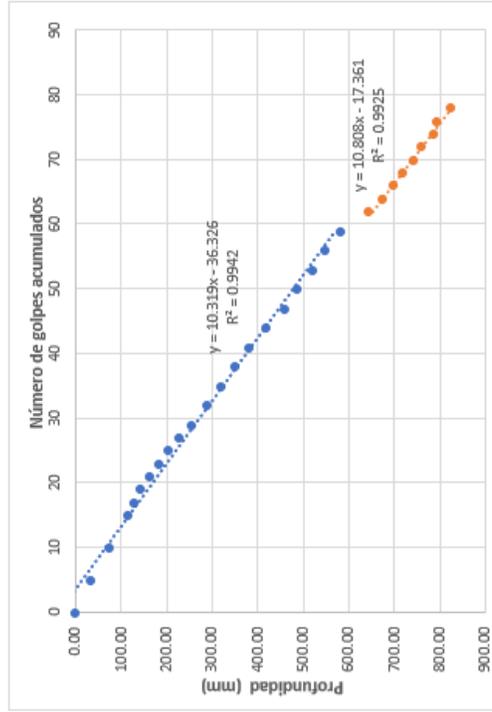
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	36.50	365.00	-	-	2	-	-
5	38.50	385.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	40.50	405.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	42.30	423.00	18.00	3.60	2	7.20	32
5	44.00	440.00	17.00	3.40	2	6.80	34
5	45.70	457.00	17.00	3.40	2	6.80	34
5	48.00	480.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	50.30	503.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	52.30	523.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	53.70	537.00	14.00	2.80	2	5.60	42
5	55.80	558.00	21.00	4.20	2	8.40	27
5	57.90	579.00	21.00	4.20	2	8.40	27
5	59.50	595.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	62.70	627.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	66.00	660.00	33.00	6.60	2	13.20	16
5	70.40	704.00	44.00	8.80	2	17.60	12
5	76.00	760.00	56.00	11.20	2	22.40	9
3	79.50	795.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	83.70	837.00	42.00	14.00	2	28.00	7
3	87.00	870.00	33.00	11.00	2	22.00	9
3	90.50	905.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	94.50	945.00	40.00	13.33	2	26.67	7
3	98.00	980.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	101.50	1015.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	105.50	1055.00	40.00	13.33	2	26.67	7
3	110.00	1100.00	45.00	15.00	2	30.00	6
3	114.50	1145.00	45.00	15.00	2	30.00	6
3	120.00	1200.00	55.00	18.33	2	36.67	5

(a) Resultados DCP Est. 0+110

Fuente: Autoría Propia

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951							
Proyecto:		Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero		Fecha:		25/02/20	
Sección de Control:		51170		Encargado:		Ramón Saborio	
Ubicación de punto:		Lado izquierdo		Peso Martillo(kg)		4.6	
Estación		0+500		Lectura Inicial(cm)		37.5	
Tipo de Material		Subrasante		Prof. bajo superficie (cm):		0	
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	37.50	375.00	-	-	2	-	-
5	40.90	409.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	45.00	450.00	41.00	8.20	2	16.40	13
5	49.00	490.00	40.00	8.00	2	16.00	13
2	50.50	505.00	15.00	7.50	2	15.00	14
2	52.00	520.00	15.00	7.50	2	15.00	14
2	54.00	540.00	20.00	10.00	2	20.00	10
2	56.00	560.00	20.00	10.00	2	20.00	10
2	58.00	580.00	20.00	10.00	2	20.00	10
2	60.50	605.00	25.00	12.50	2	25.00	8
2	63.00	630.00	25.00	12.50	2	25.00	8
3	66.50	665.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	69.50	695.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	72.50	725.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	75.80	758.00	33.00	11.00	2	22.00	9
3	79.50	795.00	37.00	12.33	2	24.67	8
3	83.50	835.00	40.00	13.33	2	26.67	7
3	86.30	863.00	28.00	9.33	2	18.67	11
3	89.60	896.00	33.00	11.00	2	22.00	9
3	92.50	925.00	29.00	9.67	2	19.33	11
3	95.70	957.00	32.00	10.67	2	21.33	9
3	102.00	1020.00	63.00	21.00	2	42.00	4
2	105.00	1050.00	30.00	15.00	2	30.00	6
2	107.50	1075.00	25.00	12.50	2	25.00	8
2	109.60	1096.00	21.00	10.50	2	21.00	10
2	111.70	1117.00	21.00	10.50	2	21.00	10
2	113.70	1137.00	20.00	10.00	2	20.00	10
2	116.30	1163.00	26.00	13.00	2	26.00	8
2	117.00	1170.00	7.00	3.50	2	7.00	33
2	120.00	1200.00	30.00	15.00	2	30.00	6

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 592	10.319	2	20.638	10
2	655 - 835	10.88	2	21.76	9

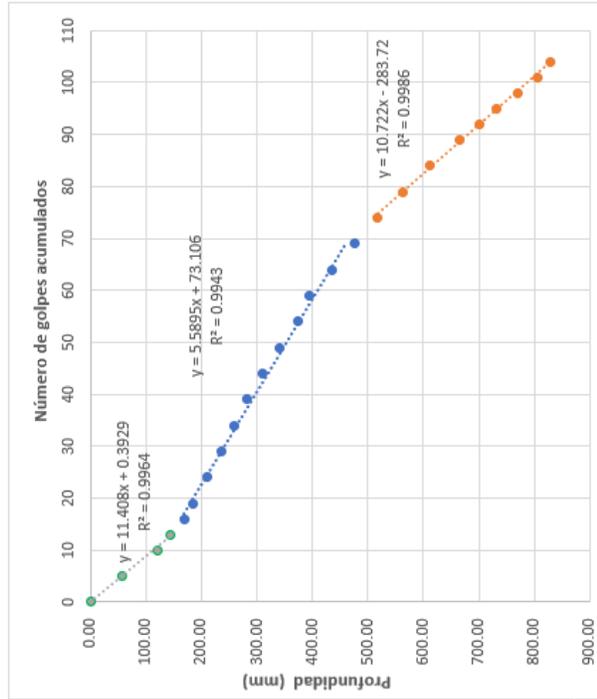


(b) Resultados DCP Est. 0+500  
Fuente: Autoría Propia

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951			
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	Fecha:	25/02/20
Sección de Control:	51170	Encargado:	Ramón Saborío
Ubicación de punto:	Lado izquierdo	Peso Martillo(kg)	4.6
Estación	1+000	Lectura Inicial(cm)	37.0
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	37.00	370.00	-	-	2	-	-
5	42.60	426.00	56.00	11.20	2	22.40	9
5	49.00	490.00	64.00	12.80	2	25.60	8
3	51.50	515.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	54.00	540.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	55.50	555.00	15.00	5.00	2	10.00	22
5	58.00	580.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	60.50	605.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	62.90	629.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	65.30	653.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	68.10	681.00	28.00	5.60	2	11.20	20
5	71.10	711.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	74.30	743.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	76.50	765.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	80.50	805.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	84.50	845.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	88.60	886.00	41.00	8.20	2	16.40	13
5	93.20	932.00	46.00	9.20	2	18.40	11
5	98.30	983.00	51.00	10.20	2	20.40	10
5	103.50	1035.00	52.00	10.40	2	20.80	10
3	107.20	1072.00	37.00	12.33	2	24.67	8
3	110.30	1103.00	31.00	10.33	2	20.67	10
3	114.00	1140.00	37.00	12.33	2	24.67	8
3	117.50	1175.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	120.00	1200.00	25.00	8.33	2	16.67	13

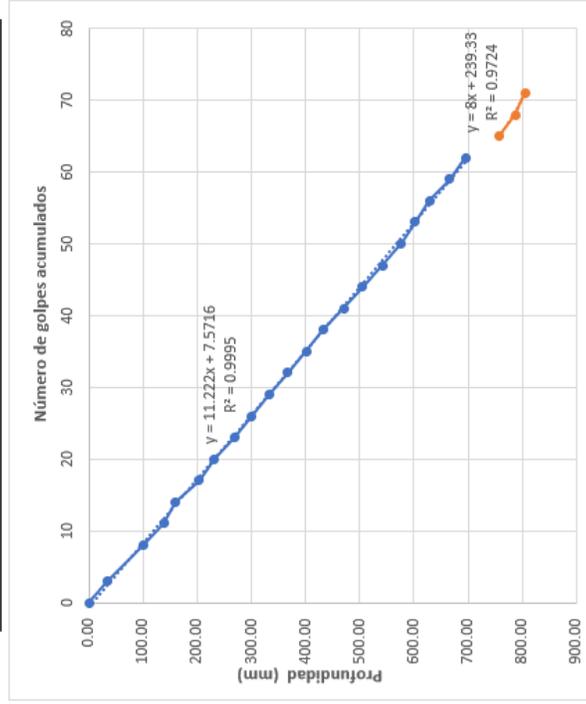
Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	CBR%
1	0 - 150	11.41	2	9
2	175 - 480	5.59	2	20
3	521 - 835	10.72	2	9



(c) Resultados DCP Est. 1+000  
Fuente: Autoría Propia

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951							
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero			Fecha:	25/02/20		
Sección de Control:	51170	Encargado:	Ramón Saborio				
Ubicación de punto:	Lado Izquierdo	Peso Martillo(kg)	4.6				
Estación	2+000	Lectura Inicial(cm)	39.5				
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0				
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	39.50	395.00	-	-	2	-	-
3	43.00	430.00	35.00	11.67	2	23.33	9
5	49.50	495.00	65.00	13.00	2	26.00	8
3	53.30	533.00	38.00	12.67	2	25.33	8
3	55.50	555.00	22.00	7.33	2	14.67	14
3	59.80	598.00	43.00	14.33	2	28.67	7
3	62.70	627.00	29.00	9.67	2	19.33	11
3	66.30	663.00	36.00	12.00	2	24.00	8
3	69.60	696.00	33.00	11.00	2	22.00	9
3	72.70	727.00	31.00	10.33	2	20.67	10
3	76.20	762.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	79.60	796.00	34.00	11.33	2	22.67	9
3	82.70	827.00	31.00	10.33	2	20.67	10
3	86.50	865.00	38.00	12.67	2	25.33	8
3	90.00	900.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	93.70	937.00	37.00	12.33	2	24.67	8
3	97.10	971.00	34.00	11.33	2	22.67	9
3	99.70	997.00	26.00	8.67	2	17.33	12
3	102.40	1024.00	27.00	9.00	2	18.00	11
3	106.10	1061.00	37.00	12.33	2	24.67	8
3	109.10	1091.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	115.20	1152.00	61.00	20.33	2	40.67	5
3	118.30	1183.00	31.00	10.33	2	20.67	10
3	120.00	1200.00	17.00	5.67	2	11.33	19

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 696	11.22	2	22.44	9
2	757 - 805	8.00	2	16.00	13

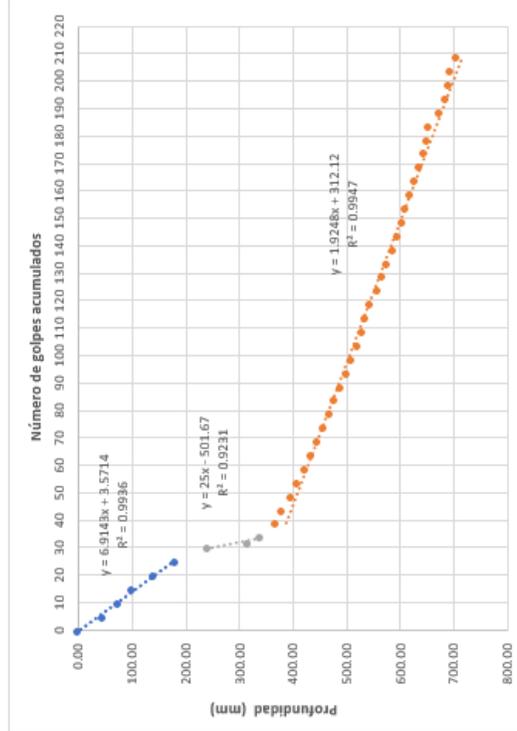


(d) Resultados DCP Est. 2+000  
Fuente: Autoría Propia

<b>Proyecto:</b> Ruta Nacional 911 Sardinial Playa Potreroc		<b>Encargado:</b> Ramón Saborio		<b>Fecha:</b> 25/02/20
<b>Sección de Control:</b> Lado Izquierdo		<b>Peso Martillo(kg)</b>		4.6
<b>Ubicación de punto:</b> Subrasante		<b>Lectura Inicial(cm)</b>		39.5
<b>Estación</b>		<b>Prof. bajo superficie (cm):</b>		0
<b>Tipo de Material</b>				

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	39.50	395.00	-	-	2	-	-
5	44.00	440.00	45.00	9.00	2	18.00	11
5	47.00	470.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	49.50	495.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	53.50	535.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	57.50	575.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	63.50	635.00	60.00	12.00	2	24.00	8
2	71.00	710.00	75.00	37.50	2	75.00	2
2	73.50	735.00	25.00	12.50	2	25.00	8
5	76.40	764.00	29.00	5.80	2	11.60	19
5	77.50	775.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	79.10	791.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	80.50	805.00	14.00	2.80	2	5.60	42
5	81.90	819.00	14.00	2.80	2	5.60	42
5	83.00	830.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	84.10	841.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	86.40	864.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	87.40	874.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	88.50	885.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	89.50	895.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	90.50	905.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	91.50	915.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	92.50	925.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	94.00	940.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	95.30	953.00	13.00	2.60	2	5.20	46
5	96.20	962.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	97.10	971.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	98.20	982.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	99.10	991.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	100.00	1000.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	100.50	1005.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	101.50	1015.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	102.30	1023.00	8.00	1.60	2	3.20	79
5	103.10	1031.00	8.00	1.60	2	3.20	79
5	104.00	1040.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	104.50	1045.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	105.00	1050.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	107.00	1070.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	108.00	1080.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	108.50	1085.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	109.00	1090.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	110.00	1100.00	10.00	2.00	2	4.00	62

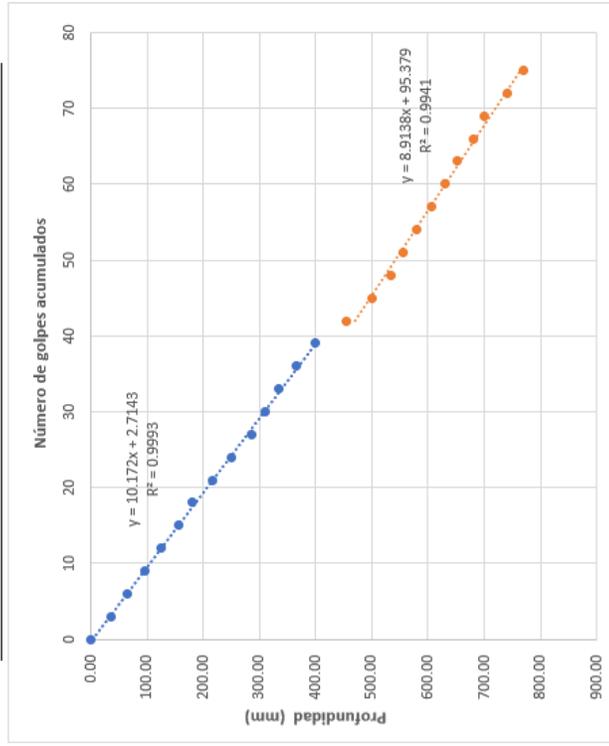
Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0-180	6.91	2	13.83	15
2	240-340	25.00	2	50.00	4
3	369-705	1.92	2	3.84	65



(e) Resultados DCP Est. 2+500  
Fuente: Autoría Propia

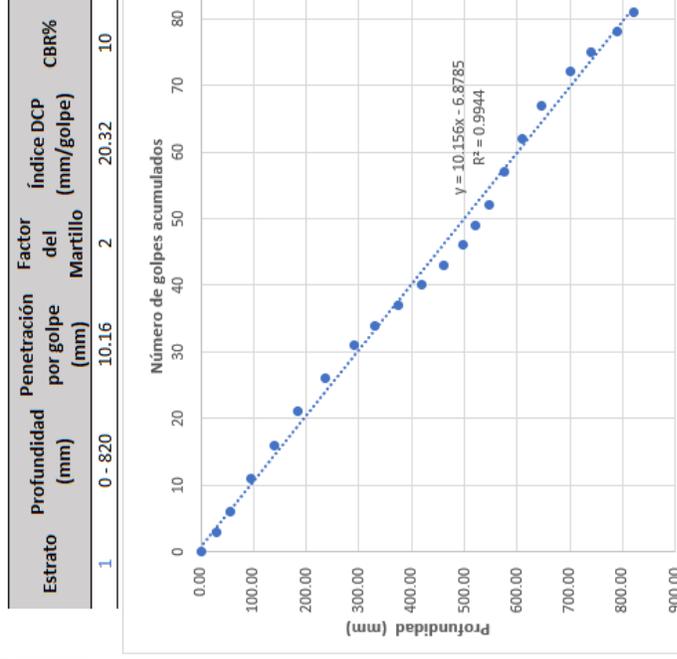
Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951							
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	Fecha:	25/02/20				
Sección de Control:	51170	Encargado:	Ramón Saborío				
Ubicación de punto:	Lado Derecho	Peso Martillo(kg)	4.6				
Estación	3+000	Lectura Inicial(cm)	43.0				
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0				
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	43.00	430.00	-	-	2	-	-
3	46.50	465.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	49.50	495.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	52.50	525.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	55.50	555.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	58.50	585.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	61.00	610.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	64.50	645.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	68.00	680.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	71.50	715.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	74.00	740.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	76.50	765.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	79.50	795.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	83.00	830.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	88.50	885.00	55.00	18.33	2	36.67	5
3	93.00	930.00	45.00	15.00	2	30.00	6
3	96.50	965.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	98.50	985.00	20.00	6.67	2	13.33	16
3	101.00	1010.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	103.50	1035.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	106.00	1060.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	108.10	1081.00	21.00	7.00	2	14.00	15
3	111.10	1111.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	113.00	1130.00	19.00	6.33	2	12.67	17
3	117.00	1170.00	40.00	13.33	2	26.67	7
3	120.00	1200.00	30.00	10.00	2	20.00	10

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 400	10.17	2	20.34	10
2	405 - 770	8.91	2	17.82	12



(f) Resultados DCP Est. 3+000  
Fuente: Autoría Propia

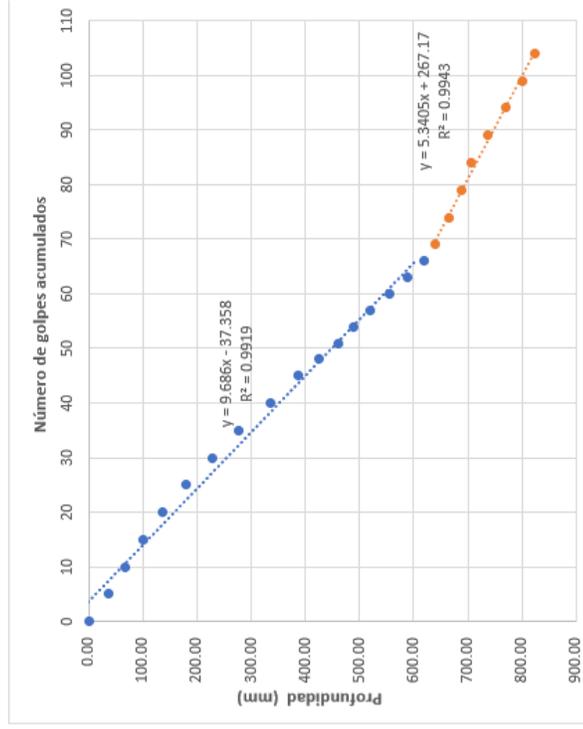
Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951									
Proyecto:		Ruta Nacional 911 Sardinial Playa Potrero				Fecha: 25/02/20			
Sección de Control:		51170		Encargado:		Ramón Saborío			
Ubicación de punto:		Lado Derecho		Peso Martillo(kg)		4.6			
Estación		3+500		Lectura Inicial(cm)		38.0			
Tipo de Material		Subrasante		Prof. bajo superficie (cm):		0			
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%		
0	38.00	380.00	-	-	2	-	-	-	-
3	41.00	410.00	30.00	10.00	2	20.00	10		
3	43.50	435.00	25.00	8.33	2	16.67	13		
5	47.50	475.00	40.00	8.00	2	16.00	13		
5	52.00	520.00	45.00	9.00	2	18.00	11		
5	56.50	565.00	45.00	9.00	2	18.00	11		
5	61.50	615.00	50.00	10.00	2	20.00	10		
5	67.00	670.00	55.00	11.00	2	22.00	9		
3	71.00	710.00	40.00	13.33	2	26.67	7		
3	75.50	755.00	45.00	15.00	2	30.00	6		
3	80.00	800.00	45.00	15.00	2	30.00	6		
3	84.00	840.00	40.00	13.33	2	26.67	7		
3	87.60	876.00	36.00	12.00	2	24.00	8		
3	90.10	901.00	25.00	8.33	2	16.67	13		
3	92.70	927.00	26.00	8.67	2	17.33	12		
5	95.50	955.00	28.00	5.60	2	11.20	20		
5	99.00	990.00	35.00	7.00	2	14.00	15		
5	102.50	1025.00	35.00	7.00	2	14.00	15		
5	108.10	1081.00	56.00	11.20	2	22.40	9		
3	112.00	1120.00	39.00	13.00	2	26.00	8		
3	117.00	1170.00	50.00	16.67	2	33.33	6		
3	120.00	1200.00	30.00	10.00	2	20.00	10		



(g) Resultados DCP Est. 3+500  
Fuente: Autoría Propia

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951			
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	Fecha:	26/02/20
Sección de Control:	51170	Encargado:	Ramón Saborío
Ubicación de punto:	Lado Derecho	Peso Martillo(kg)	4.6
Estación	4+000	Lectura Inicial(cm)	37.5
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 620	9.69	2	19.37	11
2	640 - 825	5.34	2	10.68	21

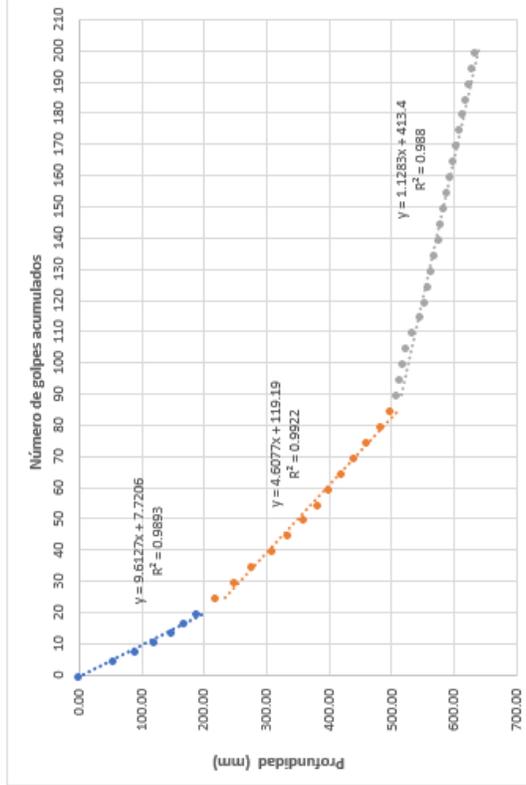


Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	37.50	375.00	-	-	2	-	-
5	41.10	411.00	36.00	7.20	2	14.40	15
5	44.10	441.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	47.50	475.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	51.20	512.00	37.00	7.40	2	14.80	14
5	55.40	554.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	60.20	602.00	48.00	9.60	2	19.20	11
5	65.30	653.00	51.00	10.20	2	20.40	10
5	71.10	711.00	58.00	11.60	2	23.20	9
5	76.30	763.00	52.00	10.40	2	20.80	10
3	80.10	801.00	38.00	12.67	2	25.33	8
3	83.70	837.00	36.00	12.00	2	24.00	8
3	86.50	865.00	28.00	9.33	2	18.67	11
3	89.50	895.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	93.00	930.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	96.40	964.00	34.00	11.33	2	22.67	9
3	99.50	995.00	31.00	10.33	2	20.67	10
3	101.50	1015.00	20.00	6.67	2	13.33	16
5	104.10	1041.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	106.30	1063.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	108.10	1081.00	18.00	3.60	2	7.20	32
5	111.30	1113.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	114.50	1145.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	117.50	1175.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	120.00	1200.00	25.00	5.00	2	10.00	22

(h) Resultados DCP Est. 4+000  
Fuente: Autoría Propia

<b>Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951</b>			
<b>Proyecto:</b>	Ruta Nacional 911 Sardinial Playa Potrero	Fecha:	26/02/20
<b>Sección de Control:</b>	51170	<b>Encargado:</b>	Ramón Saborio
<b>Ubicación de punto:</b>	Lado Izquierdo	<b>Peso Martillo(kg)</b>	4.6
<b>Estación</b>	4+500	<b>Lectura Inicial(cm)</b>	39.5
<b>Tipo de Material</b>	Subrasante	<b>Prof. bajo superficie (cm):</b>	0

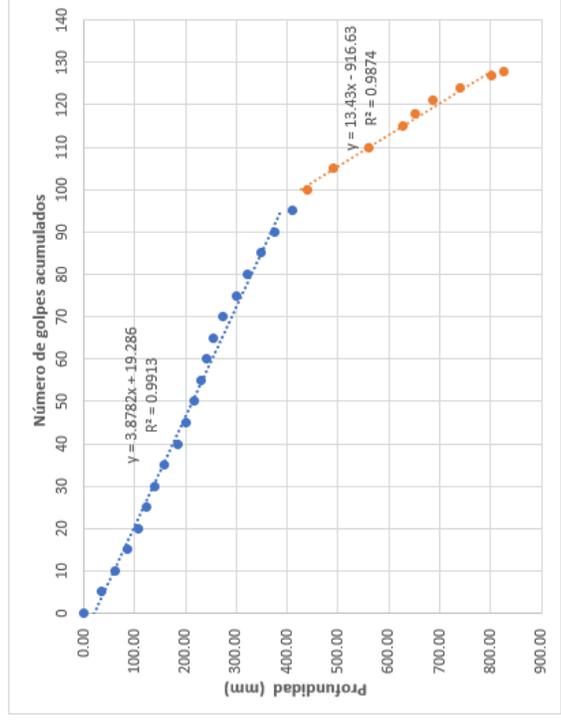
Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 190	9.61	2	19.22	11
2	220 - 500	4.60	2	9.20	24
3	510 - 635	1.13	2	2.26	117



Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	39.50	395.00	-	-	2	-	-
5	45.00	450.00	55.00	11.00	2	22.00	9
3	48.50	485.00	35.00	11.67	2	23.33	9
3	51.50	515.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	54.50	545.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	56.50	565.00	20.00	6.67	2	13.33	16
3	58.50	585.00	20.00	6.67	2	13.33	16
5	61.50	615.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	64.50	645.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	67.30	673.00	28.00	5.60	2	11.20	20
5	70.50	705.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	73.00	730.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	75.50	755.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	77.80	778.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	79.50	795.00	17.00	3.40	2	6.80	34
5	81.50	815.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	83.70	837.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	85.60	856.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	88.00	880.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	89.50	895.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	90.50	905.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	91.00	910.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	91.50	915.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	92.00	920.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	93.00	930.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	94.30	943.00	13.00	2.60	2	5.20	46
5	95.00	950.00	7.00	1.40	2	2.80	92
5	95.50	955.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	96.00	960.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	96.50	965.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	97.30	973.00	8.00	1.60	2	3.20	79
5	97.50	975.00	2.00	0.40	2	0.80	375
5	98.00	980.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	98.50	985.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	99.00	990.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	99.50	995.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	100.00	1000.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	100.50	1005.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	101.00	1010.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	101.50	1015.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	102.00	1020.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	102.50	1025.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	103.00	1030.00	5.00	1.00	2	2.00	134

Ensayo de Como de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951									
Proyecto:		Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero			Fecha:		26/02/20		
Sección de Control:		51170			Encargado:		Ramón Saborío		
Ubicación de punto:		Lado Derecho			Peso Martillo(kg)		4.6		
Estación		5+000			Lectura Inicial(cm)		37.4		
Tipo de Material		Subrasante			Prof. bajo superficie (cm):		0		
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%		
0	37.40	374.00	-	-	2	-	-	-	-
5	41.00	410.00	36.00	7.20	2	14.40	15	7.76	29
5	43.50	435.00	25.00	5.00	2	10.00	22	26.86	7
5	46.00	460.00	25.00	5.00	2	10.00	22		
5	48.00	480.00	20.00	4.00	2	8.00	28		
5	49.70	497.00	17.00	3.40	2	6.80	34		
5	51.40	514.00	17.00	3.40	2	6.80	34		
5	53.20	532.00	18.00	3.60	2	7.20	32		
5	56.00	560.00	28.00	5.60	2	11.20	20		
5	57.60	576.00	16.00	3.20	2	6.40	37		
5	59.00	590.00	14.00	2.80	2	5.60	42		
5	60.40	604.00	14.00	2.80	2	5.60	42		
5	61.60	616.00	12.00	2.40	2	4.80	50		
5	63.00	630.00	14.00	2.80	2	5.60	42		
5	64.80	648.00	18.00	3.60	2	7.20	32		
5	67.30	673.00	25.00	5.00	2	10.00	22		
5	69.50	695.00	22.00	4.40	2	8.80	26		
5	72.20	722.00	27.00	5.40	2	10.80	20		
5	75.00	750.00	28.00	5.60	2	11.20	20		
5	78.40	784.00	34.00	6.80	2	13.60	16		
5	81.50	815.00	31.00	6.20	2	12.40	17		
5	86.50	865.00	50.00	10.00	2	20.00	10		
5	93.50	935.00	70.00	14.00	2	28.00	7		
5	100.10	1001.00	66.00	13.20	2	26.40	7		
3	102.50	1025.00	24.00	8.00	2	16.00	13		
3	106.00	1060.00	35.00	11.67	2	23.33	9		
3	111.50	1115.00	55.00	18.33	2	36.67	5		
3	117.50	1175.00	60.00	20.00	2	40.00	5		
1	120.00	1200.00	25.00	25.00	2	50.00	4		

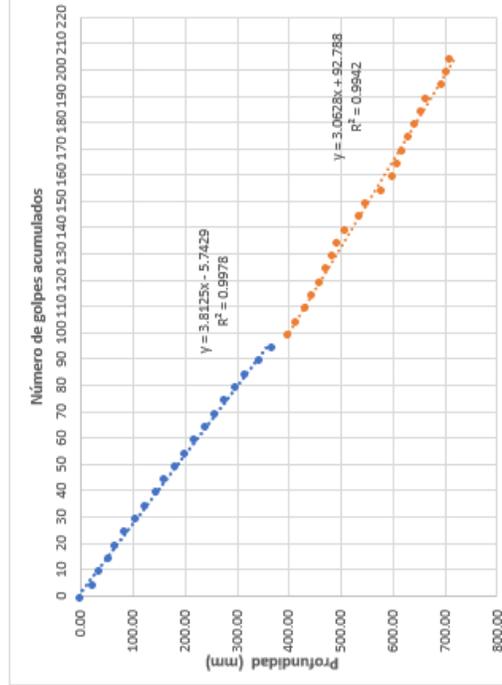
Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 410	3.88	2	7.76	29
2	441 - 826	13.43	2	26.86	7



(j) Resultados DCP Est. 5+000  
Fuente: Autoría Propia

<b>Proyecto:</b> Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951		Ruta Nacional 911 Sardinai Playa Potrero		Fecha: 26/02/20	
<b>Sección de Control:</b> 51170		Encargado: Ramón Saborío		Peso Martillo(kg) 4.6	
<b>Ubicación de punto:</b> Lado Derecho		Lectura Inicial(cm) 37.0		Prof. bajo superficie (cm): 0	
<b>Estación:</b> 5+500		Subrasante			
<b>Tipo de Material:</b>					

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 370	3.81	2	7.62	30
2	400 - 711	3.06	2	6.12	38



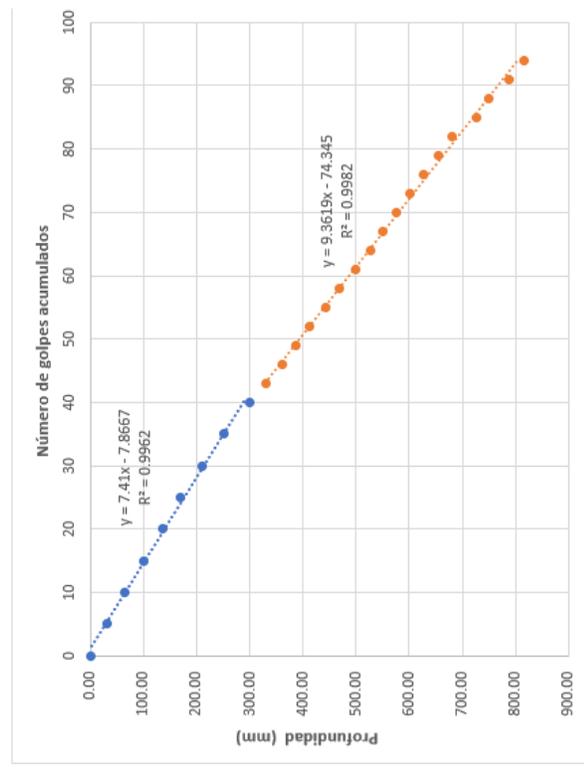
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	37.00	370.00	-	-	2	-	-
5	39.50	395.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	40.50	405.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	42.30	423.00	18.00	3.60	2	7.20	32
5	43.50	435.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	45.50	455.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	47.50	475.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	49.50	495.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	51.50	515.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	53.20	532.00	17.00	3.40	2	6.80	34
5	55.20	552.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	57.10	571.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	59.00	590.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	61.00	610.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	63.00	630.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	64.70	647.00	17.00	3.40	2	6.80	34
5	66.70	667.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	68.70	687.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	71.30	713.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	74.00	740.00	27.00	5.40	2	10.80	20
5	77.00	770.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	78.50	785.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	80.30	803.00	18.00	3.60	2	7.20	32
5	81.40	814.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	83.10	831.00	17.00	3.40	2	6.80	34
5	84.30	843.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	85.50	855.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	86.50	865.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	88.00	880.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	90.50	905.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	92.00	920.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	95.00	950.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	97.00	970.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	98.10	981.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	99.00	990.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	100.10	1001.00	11.00	2.20	2	4.40	56
5	101.30	1013.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	102.50	1025.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	103.50	1035.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	106.50	1065.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	107.50	1075.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	108.10	1081.00	6.00	1.20	2	2.40	110

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951			
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	Fecha:	26/02/20
Sección de Control:	50443	Encargado:	Ramón Saborío
Ubicación de punto:	Lado Derecho	Peso Martillo(kg)	4.6
Estación	6+000	Lectura Inicial(cm)	38.5
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	38.50	385.00	-	-	2	-	-
5	41.60	416.00	31.00	6.20	2	12.40	17
5	45.00	450.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	48.50	485.00	35.00	7.00	2	14.00	15
5	52.00	520.00	35.00	7.00	2	14.00	15
5	55.50	555.00	35.00	7.00	2	14.00	15
5	59.50	595.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	63.70	637.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	68.50	685.00	48.00	9.60	2	19.20	11
3	71.50	715.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	74.50	745.00	30.00	10.00	2	20.00	10
3	77.10	771.00	26.00	8.67	2	17.33	12
3	79.80	798.00	27.00	9.00	2	18.00	11
3	82.90	829.00	31.00	10.33	2	20.67	10
3	85.30	853.00	24.00	8.00	2	16.00	13
3	88.50	885.00	32.00	10.67	2	21.33	9
3	91.30	913.00	28.00	9.33	2	18.67	11
3	93.50	935.00	22.00	7.33	2	14.67	14
3	96.20	962.00	27.00	9.00	2	18.00	11
3	98.70	987.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	101.30	1013.00	26.00	8.67	2	17.33	12
3	104.00	1040.00	27.00	9.00	2	18.00	11
3	106.70	1067.00	27.00	9.00	2	18.00	11
3	111.30	1113.00	46.00	15.33	2	30.67	6
3	113.60	1136.00	23.00	7.67	2	15.33	14
3	117.30	1173.00	37.00	12.33	2	24.67	8
3	120.00	1200.00	27.00	9.00	2	18.00	11

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 300	7.41	2	14.82	14
2	330 - 811	9.36	2	18.72	11

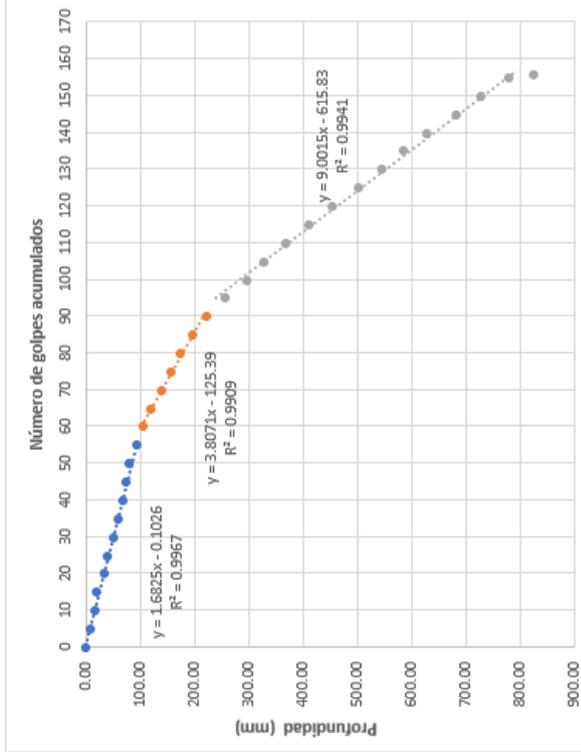


(I) Resultados DCP Est. 6+000  
Fuente: Autoría Propia

<b>Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951</b>			
<b>Proyecto:</b>	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	<b>Fecha:</b>	26/02/20
<b>Sección de Control:</b>	50443	<b>Encargado:</b>	Ramón Saborio
<b>Ubicación de punto:</b>	Lado Derecho	<b>Peso Martillo(kg)</b>	4.6
<b>Estación</b>	6+500	<b>Lectura Inicial(cm)</b>	37.3
<b>Tipo de Material</b>	Subrasante	<b>Prof. bajo superficie (cm):</b>	0

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	37.30	373.00	-	-	2	-	-
5	38.30	383.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	39.00	390.00	7.00	1.40	2	2.80	92
5	39.50	395.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	40.70	407.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	41.30	413.00	6.00	1.20	2	2.40	110
5	42.50	425.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	43.30	433.00	8.00	1.60	2	3.20	79
5	44.20	442.00	9.00	1.80	2	3.60	70
5	44.70	447.00	5.00	1.00	2	2.00	134
5	45.50	455.00	8.00	1.60	2	3.20	79
5	46.70	467.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	48.10	481.00	14.00	2.80	2	5.60	42
5	49.30	493.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	51.30	513.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	53.20	532.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	54.70	547.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	57.00	570.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	59.60	596.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	63.00	630.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	67.00	670.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	70.30	703.00	33.00	6.60	2	13.20	16
5	74.30	743.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	78.50	785.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	82.70	827.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	87.60	876.00	49.00	9.80	2	19.60	10
5	92.00	920.00	44.00	8.80	2	17.60	12
5	96.00	960.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	100.30	1003.00	43.00	8.60	2	17.20	12
5	105.80	1058.00	55.00	11.00	2	22.00	9
5	110.30	1103.00	45.00	9.00	2	18.00	11
5	115.40	1154.00	51.00	10.20	2	20.40	10
1	120.00	1200.00	46.00	46.00	2	92.00	2

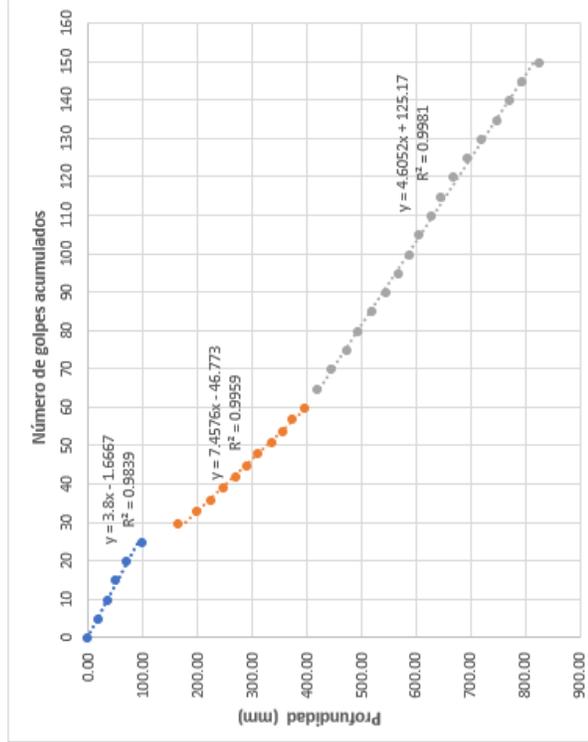
Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 94	1.68	2	3.36	75
2	108 - 223	3.80	2	7.60	30
3	257 - 827	9.00	2	18.00	11



(m) Resultados DCP Est. 6+500  
Fuente: Autoría Propia

<b>Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951</b>			
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	Fecha:	26/02/20
Sección de Control:	50443	Encargado:	Ramón Saborío
Ubicación de punto:	Lado izquierdo	Peso Martillo(kg)	4.6
Estación	7+000	Lectura Inicial(cm)	37.5
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0

Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 100	3.80	2	7.60	30
2	166 - 396	7.46	2	14.92	14
3	420 - 825	4.60	2	9.20	24



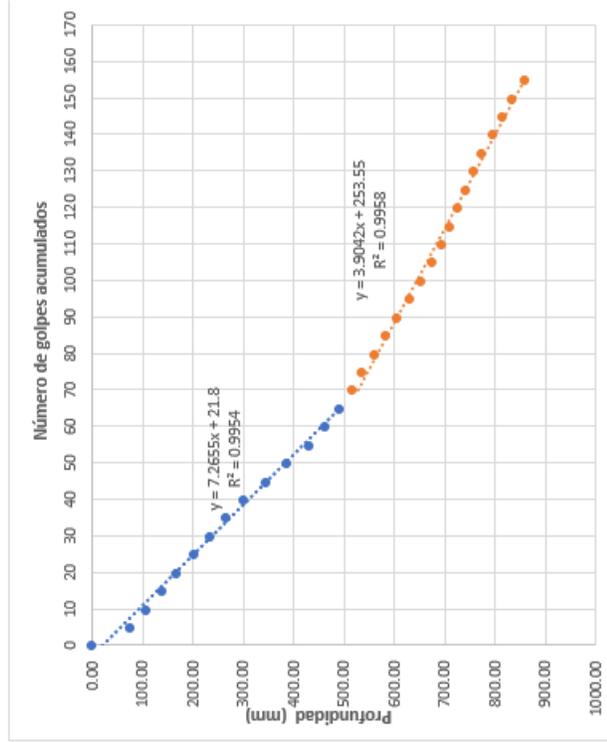
Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	37.50	375.00	-	-	2	-	-
5	39.50	395.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	41.00	410.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	42.50	425.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	44.50	445.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	47.50	475.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	54.10	541.00	66.00	13.20	2	26.40	7
3	57.50	575.00	34.00	11.33	2	22.67	9
3	60.00	600.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	62.30	623.00	23.00	7.67	2	15.33	14
3	64.70	647.00	24.00	8.00	2	16.00	13
3	66.50	665.00	18.00	6.00	2	12.00	18
3	68.70	687.00	22.00	7.33	2	14.67	14
3	71.20	712.00	25.00	8.33	2	16.67	13
3	75.00	750.00	19.00	6.33	2	12.67	17
3	77.10	771.00	21.00	7.00	2	14.00	15
5	79.50	795.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	82.00	820.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	85.00	850.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	87.00	870.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	89.50	895.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	92.00	920.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	94.50	945.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	96.50	965.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	98.00	980.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	100.50	1005.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	102.10	1021.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	104.30	1043.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	107.00	1070.00	27.00	5.40	2	10.80	20
5	109.50	1095.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	112.30	1123.00	28.00	5.60	2	11.20	20
5	114.70	1147.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	117.00	1170.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	120.00	1200.00	30.00	6.00	2	12.00	18

(n) Resultados DCP Est. 7+000  
Fuente: Autoría Propia

<b>Proyecto:</b> Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951	
<b>Sección de Control:</b> Ruta Nacional 911 Sardinal Playa Potrero	<b>Fecha:</b> 27/02/20
<b>Ubicación de punto:</b> 50443	<b>Encargado:</b> Ramón Saborío
<b>Estación:</b> Lado izquierdo	<b>Peso Martillo(kg)</b> 4.6
<b>Tipo de Material:</b> Subrasante	<b>Lectura inicial(cm)</b> 34.0
	<b>Prof. bajo superficie (cm):</b> 0

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	34.00	340.00	-	-	2	-	-
5	41.50	415.00	75.00	15.00	2	30.00	6
5	44.70	447.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	48.00	480.00	33.00	6.60	2	13.20	16
5	50.70	507.00	27.00	5.40	2	10.80	20
5	54.30	543.00	36.00	7.20	2	14.40	15
5	57.40	574.00	31.00	6.20	2	12.40	17
5	60.50	605.00	31.00	6.20	2	12.40	17
5	64.20	642.00	37.00	7.40	2	14.80	14
5	68.50	685.00	43.00	8.60	2	17.20	12
5	72.70	727.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	77.00	770.00	43.00	8.60	2	17.20	12
5	80.40	804.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	83.20	832.00	28.00	5.60	2	11.20	20
5	85.60	856.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	87.70	877.00	21.00	4.20	2	8.40	27
5	90.30	903.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	92.50	925.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	94.50	945.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	97.00	970.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	99.30	993.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	101.50	1015.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	103.40	1034.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	105.00	1050.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	106.50	1065.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	108.10	1081.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	109.70	1097.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	111.50	1115.00	18.00	3.60	2	7.20	32
5	113.50	1135.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	115.40	1154.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	117.50	1175.00	21.00	4.20	2	8.40	27
5	120.00	1200.00	25.00	5.00	2	10.00	22

Estrato	Profundidad (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 585	2	14.53	15
2	605 - 860	2	7.80	29

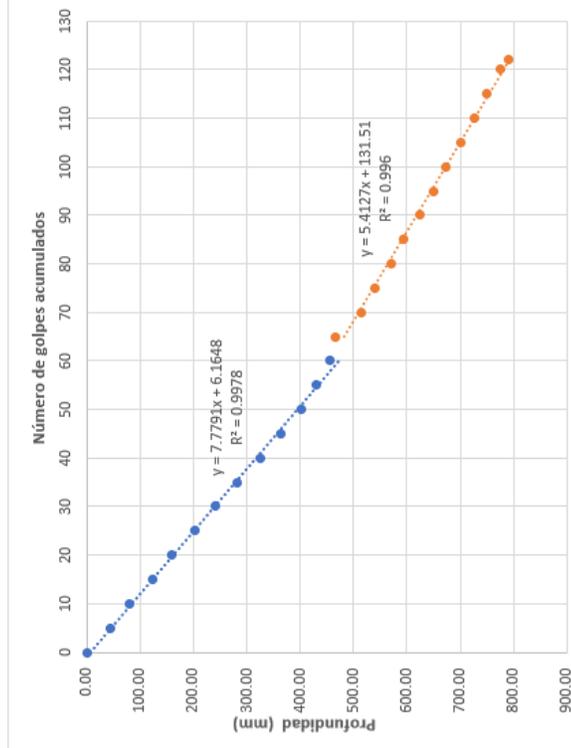


(ñ) Resultados DCP Est. 7+500  
Fuente: Autoría Propia

Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951					
Proyecto:	Ruta Nacional 911 Sardinial Playa Potrero	Fecha:	27/02/20		
Sección de Control:	50443	Encargado:	Ramón Saborio		
Ubicación de punto:	Lado izquierdo	Peso Martillo(kg)	4.6		
Estación	8+000	Lectura Inicial(cm)	41.0		
Tipo de Material	Subrasante	Prof. bajo superficie (cm):	0		

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	41.00	410.00	-	-	2	-	-
5	45.50	455.00	45.00	9.00	2	18.00	11
5	49.10	491.00	36.00	7.20	2	14.40	15
5	53.30	533.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	57.00	570.00	37.00	7.40	2	14.80	14
5	61.30	613.00	43.00	8.60	2	17.20	12
5	65.10	651.00	38.00	7.60	2	15.20	14
5	69.30	693.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	73.50	735.00	42.00	8.40	2	16.80	12
5	77.50	775.00	40.00	8.00	2	16.00	13
5	81.30	813.00	38.00	7.60	2	15.20	14
5	84.00	840.00	27.00	5.40	2	10.80	20
5	86.50	865.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	87.50	875.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	92.50	925.00	50.00	10.00	2	20.00	10
5	95.00	950.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	98.00	980.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	100.50	1005.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	103.50	1035.00	30.00	6.00	2	12.00	18
5	106.00	1060.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	108.30	1083.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	111.20	1112.00	29.00	5.80	2	11.60	19
5	113.70	1137.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	116.10	1161.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	118.50	1185.00	24.00	4.80	2	9.60	23
2	120.00	1200.00	15.00	7.50	2	15.00	14

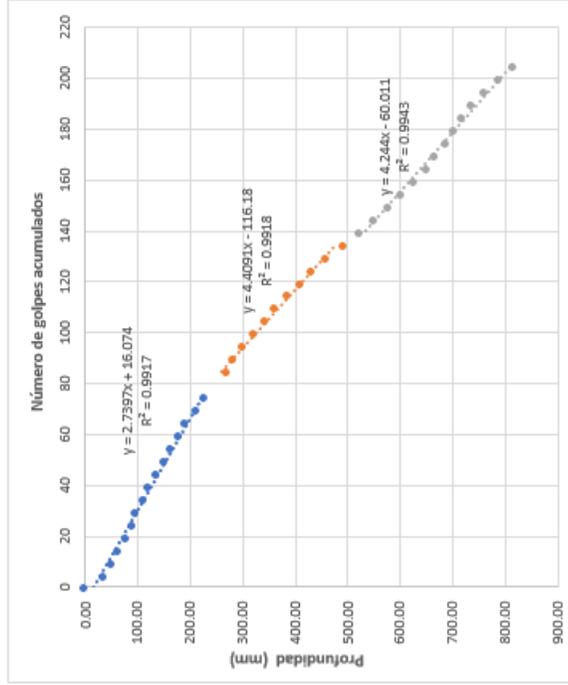
Estrato	Profundidad (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
1	0 - 455	7.78	2	15.56	14
2	465 - 790	5.41	2	10.83	20



(o) Resultados DCP Est. 8+000  
Fuente: Autoría Propia

<b>Proyecto:</b> Ensayo de Cono de Penetración Dinámico, DCP ASTM D6951		<b>Fecha:</b> 27/02/20	
<b>Sección de Control:</b> Ruta Nacional 911 Sardinial Playa Potrero		<b>Encargado:</b> Ramón Saborío	
<b>Ubicación de punto:</b> Lado Izquierdo		<b>Peso Martillo(kg)</b> 4.6	
<b>Estación:</b> 9+000		<b>Lectura Inicial(cm)</b> 38.3	
<b>Tipo de Material:</b> Subrasante		<b>Prof. bajo superficie (cm):</b> 0	

Número de Golpes	Penetración Acumulada (cm)	Penetración Acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Martillo	Índice DCP (mm/golpe)	CBR%
0	38.30	383.00	-	-	2	-	-
5	41.70	417.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	43.30	433.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	44.70	447.00	14.00	2.80	2	5.60	42
5	46.00	460.00	13.00	2.60	2	5.20	46
5	47.20	472.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	48.00	480.00	8.00	1.60	2	3.20	79
5	49.50	495.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	50.50	505.00	10.00	2.00	2	4.00	62
5	52.00	520.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	53.30	533.00	13.00	2.60	2	5.20	46
5	54.50	545.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	56.00	560.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	57.50	575.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	59.40	594.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	61.00	610.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	62.50	625.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	65.30	653.00	28.00	5.60	2	11.20	20
5	66.50	665.00	12.00	2.40	2	4.80	50
5	68.50	685.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	70.50	705.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	72.50	725.00	20.00	4.00	2	8.00	28
5	74.30	743.00	18.00	3.60	2	7.20	32
5	77.00	770.00	27.00	5.40	2	10.80	20
5	79.30	793.00	23.00	4.60	2	9.20	24
5	81.50	815.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	84.10	841.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	87.50	875.00	34.00	6.80	2	13.60	16
5	90.70	907.00	32.00	6.40	2	12.80	17
5	93.30	933.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	96.10	961.00	28.00	5.60	2	11.20	20
5	98.50	985.00	24.00	4.80	2	9.60	23
5	101.10	1011.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	103.30	1033.00	22.00	4.40	2	8.80	26
5	104.90	1049.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	107.00	1070.00	21.00	4.20	2	8.40	27
5	108.50	1085.00	15.00	3.00	2	6.00	39
5	110.10	1101.00	16.00	3.20	2	6.40	37
5	112.00	1120.00	19.00	3.80	2	7.60	30
5	114.50	1145.00	25.00	5.00	2	10.00	22
5	117.10	1171.00	26.00	5.20	2	10.40	21
5	120.00	1200.00	29.00	5.80	2	11.60	19



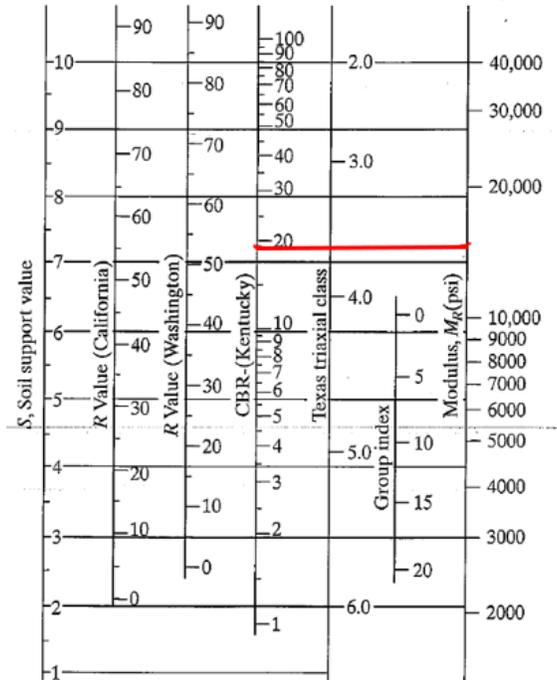
#### Apéndice 4. Módulo de rigidez (MR) equivalente de subrasante

Como se menciona en en la sección de metodología primeramente se determina un promedio de los índices de CBR, con ese promedio un módulo de rigidez (gráfico según Huang (2004))

Estación	Estrato	Profundidad (mm)	CBR%
0+110	1	0 - 295	28
	2	339 - 835	8
0+500	1	0 - 592	10
	2	655 - 835	9
1+000	1	0 - 150	9
	2	175 - 480	20
	3	521 - 835	9
2+000	1	0 - 696	9
	2	757 - 805	13
2+500	1	0 - 180	15
	2	240-340	4
	3	369-705	65
3+000	1	0 - 400	10
	2	405 - 770	12
3+500	1	0 - 820	10
4+000	1	0 - 620	11
	2	640 - 825	21
4+500	1	0 - 190	11
	2	220 - 500	24
	3	510 - 635	117
5+000	1	0 - 410	29
	2	441 - 826	7
5+500	1	0 - 370	30
	2	400 - 711	38
6+000	1	0 - 300	14
	2	330 - 811	11
6+500	1	0 - 94	75
	2	108 - 223	30
	3	257 - 827	11
7+000	1	0 - 100	30
	2	166 - 396	14
	3	420 - 825	24
7+500	1	0 - 585	15
	2	605 - 860	29
8+000	1	0 - 455	14
	2	465 - 790	20
9+000	1	0 - 242	43
	2	270 - 492	26
	3	524 - 817	27
Promedio		-	19

(a) CBR promedio de todos los estratos y estaciones a partir de apéndice 1

Fuente: Autoría Propia



(b) Módulo de Rigidez para estrato equivalente (gráfico para subrasantes)  
Fuente: Huang (2004)

Importante recalcar que de lo anterior se toma decisión de excluir los datos del tercer estrato de las estación 4+500 y del primero de la 6+500. (valores atípicos). Posteriormente como fue indicado, el módulo de rigidez (15500psi) se reduce en un tercio y se diseña la estructura de pavimento flexible uniforme, que en resumen tiene los siguientes parámetros, deformación vertical por compresión máxima ( $\epsilon_t$ ) (-) a 60cm (necesario para el procedimiento establecido) y la deformación por tensión presente en la carpeta ( $\epsilon_{vs}$ ) (valor complementario y no necesario para el procedimiento establecido) (+).

Capa	CBR	MR (psi)	MR (kPa)	Poisson $\mu$	h (m)
Carpeta Asfáltica	-	450000	3102300	0.35	0.12
Base Granular	80	28000	193032	0.40	0.15
Subbase Granular	47	17000	117198	0.40	0.20
Subrasante	19	5167	35619	0.45	infinito
<b>Valores de deformación para subrasante promedio (3D-MOVE)</b>					
<b><math>\epsilon_t</math> máximo (ms) en carpeta</b>			<b><math>\epsilon_{vs}</math> máximo (ms) en subrasante</b>		
-266			175.47		

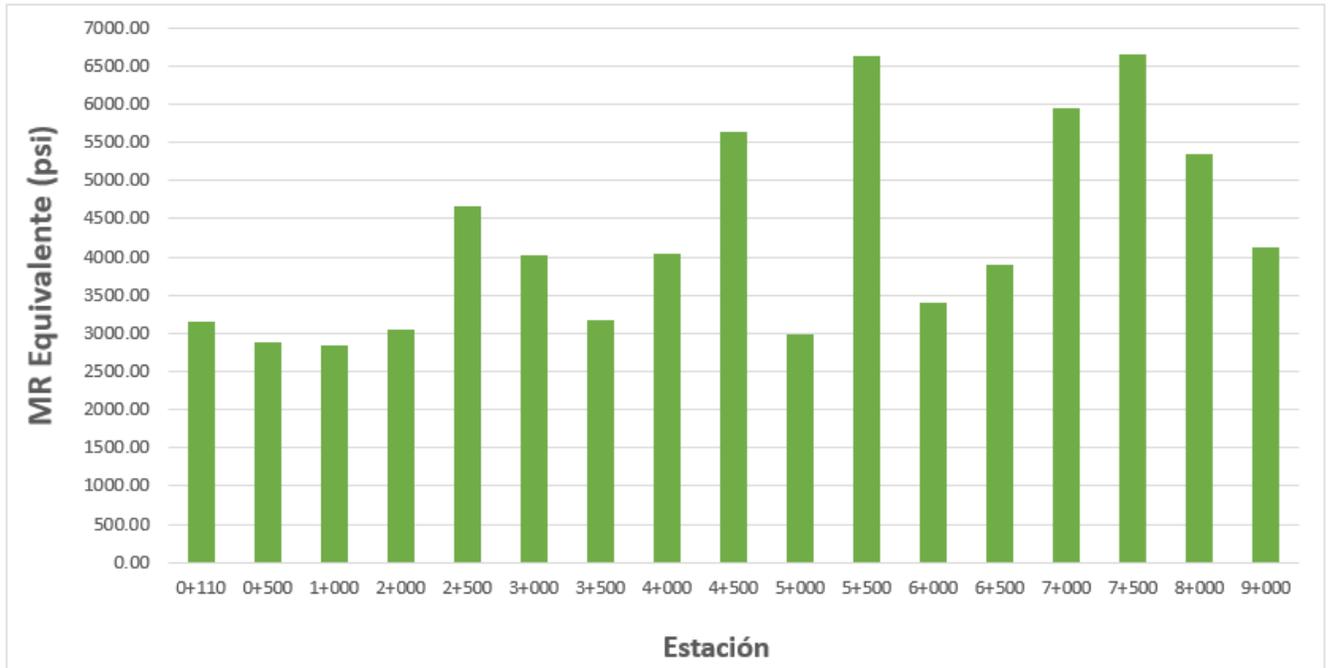
(c) Estructura de pavimento flexible según metodología AASHTO93 para MR equivalente  
Fuente: Autoría Propia

De manera iterativa se coloca la estructura de pavimento uniforme sobre los estratos reales (para cada estación) se busca la deformación vertical por compresión máxima ( $\epsilon_t$ ) (-) a 60cm (necesario para el procedimiento establecido) y la deformación por tensión presente en la carpeta ( $\epsilon_{vs}$ ) (valor complementario y no necesario para el procedimiento establecido) (+). Y finalmente se busca un módulo de rigidez equivalente (un solo estrato), donde se genere la misma deformación vertical por compresión máxima ( $\epsilon_t$ ) (-) a 60cm:

Estación	$\epsilon_t$ max de estrato real 60 cm (ms)	$\epsilon_{vs}$ max a estrato real 60 cm (ms)	MR equivalente (kPa)	$\epsilon_t$ max de estrato equivalente a 60 cm (ms)	$\epsilon_{vs}$ max de estrato equivalente a 60 cm (ms)	Diferencia $\epsilon_{vs}$ max (%)	MR equivalente (psi)
0+110	-290.99	325.30	21700	-301.23	325.68	0.12	3147.32
0+500	-301.83	341.30	19900	-303.12	341.44	0.04	2886.25
1+000	-298.46	344.00	19550	-303.50	344.68	0.20	2835.49
2+000	-301.61	331.33	21000	-301.72	331.27	0.02	3045.79
2+500	-292.60	261.00	32100	-292.80	260.84	0.06	4655.71
3+000	-299.59	284.40	27750	-295.84	284.23	0.06	4024.80
3+500	-301.10	324.08	21833	-301.10	324.08	0.00	3166.61
4+000	-298.20	283.19	27900	-295.37	283.36	0.06	4046.55
4+500	-293.37	232.81	38900	-288.35	232.75	0.03	5641.97
5+000	-289.62	334.88	20650	-302.36	334.91	0.01	2995.03
5+500	-284.87	210.69	45700	-284.86	210.58	0.05	6628.22
6+000	-295.77	312.15	23450	-299.54	312.34	0.06	3401.13
6+500	-286.48	290.68	26850	-296.11	290.50	0.06	3894.26
7+000	-288.89	225.87	41000	-287.33	225.95	0.04	5946.54
7+500	-291.50	211.31	45850	-284.92	211.10	0.10	6649.98
8+000	-292.57	241.12	36920	-289.62	240.86	0.11	5354.79
9+000	-283.27	279.70	28475	-295.28	280.03	0.12	4129.95

**(d)** Módulos de rigidez equivalentes para cada estación  
Fuente: Autoría Propia

Con lo que es posible construir:



(d) Módulos de rigidez equivalentes en función estación  
 Fuente: Autoría Propia

### Apéndice 5. Secciones Homogéneas

Como es indicado en la sección de metodología primeramente se genera un seccionamiento (visual preliminar a partir de figura d apéndice 4) de la forma:

Segmento	Estación	MR equivalente (psi)	Promedio MR equivalente (psi)	Desv. Estándar MR equivalente	Numero de Datos
Segmento 1	0+110	3147.32	2978.71	143.75	4
	0+500	2886.25			
	1+000	2835.49			
	2+000	3045.79			
Segmento2	2+500	4655.71	4656.58	1263.93	13
	3+000	4024.80			
	3+500	3166.61			
	4+000	4046.55			
	4+500	5641.97			
	5+000	2995.03			
	5+500	6628.22			
	6+000	3401.13			
	6+500	3894.26			
	7+000	5946.54			
	7+500	6649.98			
	8+000	5354.79			
	9+000	4129.95			

(a) Escenario 1, a partir de segmentación preliminar  
Fuente: Autoría Propia

Segmento	Estación	MR equivalente (psi)	Promedio MR equivalente (psi)	Desv. Estándar MR equivalente	Numero de Datos
Segmento1	0+110	3147.32	2978.71	143.75	4
	0+500	2886.25			
	1+000	2835.49			
	2+000	3045.79			
Segmento2	2+500	4655.71	4307.13	915.38	5
	3+000	4024.80			
	3+500	3166.61			
	4+000	4046.55			
	4+500	5641.97			
Segmento 3	5+000	2995.03	4874.99	1455.35	8
	5+500	6628.22			
	6+000	3401.13			
	6+500	3894.26			
	7+000	5946.54			
	7+500	6649.98			
	8+000	5354.79			
	9+000	4129.95			

(b) Escenario 2, a partir de segmentación preliminar  
Fuente: Autoría Propia

Con las segmentaciones generadas, se evalúan las medias y varianzas a partir de la prueba de hipótesis:

Escenario	Segmentos Comparados	Error estándar	t	P- Value	Criterio	Dif. Signif.
1	1-2	357.89	-4.69	0.01	H1	Sí
2	1-2	415.49	-3.20	0.02	H1	Sí
	2-3	657.32	-0.86	0.22	H0	No

(c) Prueba de Hipótesis para medias (promedios)  
Fuente: Autoría Propia

Escenario	Segmentos Comparados	F	P- Value	Criterio	Dif. Signif.
1	1-2	77.05	0.00	H1	Sí
2	1-2	40.38	0.01	H1	Sí
	2-3	2.53	0.19	H0	No

**(d) Prueba de Hipótesis para varianzas**  
Fuente: Autoría Propia

De lo que se determina que para el caso de los segmentos tres y dos del escenario dos, no existe evidencia que ambas muestras correspondan a una población diferente (al no rechazarse las hipótesis nulas de varianza y media) por lo que se establece el escenario 1 como segmentación definitiva.

## Apéndice 6. Tránsito Promedio Diario y Tasas de Crecimiento

Se determina a a partir de anuarios un TPDA (2019), se calculan tasas de crecimiento anual (con crecimientos de la flota vehicular en Costa Rica, según INEC) y se utilizan para obtener un TPDA para 2020.

### Costa Rica: Vehículos automotores en circulación, según estilo (INEC)

Año	Estilos de vehículos			
	Automóvil a/	Autobuses b/	Camiones de carga tipo C2	Camiones de carga tipo c3
2013	754 689	17 411	164 736	35 392
2014	789 260	18 554	169 864	35 897
2015	833 570	17 237	176 091	36 868
2016	877 023	17 908	182 596	37 937
2017	921 668	18 472	188 529	39 695

#### Tasas de Crecimiento Anuales por tipo de vehículo 2013-2017

Liviano	Carga Liv.	Bus	C. 2 ejes	C. 3 ejes
5.12%	3.43%	1.49%	3.43%	2.91%

#### Vehículos 2019 (Anuario) y 2020 (crecimiento con tasas)

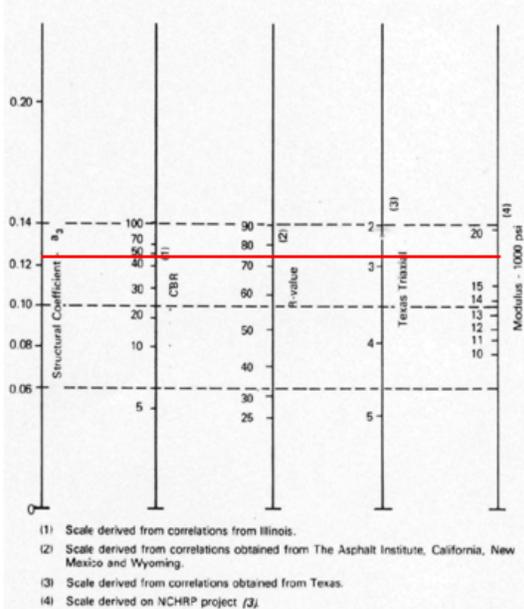
Año	TPDA	Liviano	Carga Liv.	Bus	C. 2 ejes	C. 3 ejes
2019	1426	810	439	36	59	82
2020	1488	851	454	37	61	84

(a) Tránsito Promedio Diario Anualizado 2020

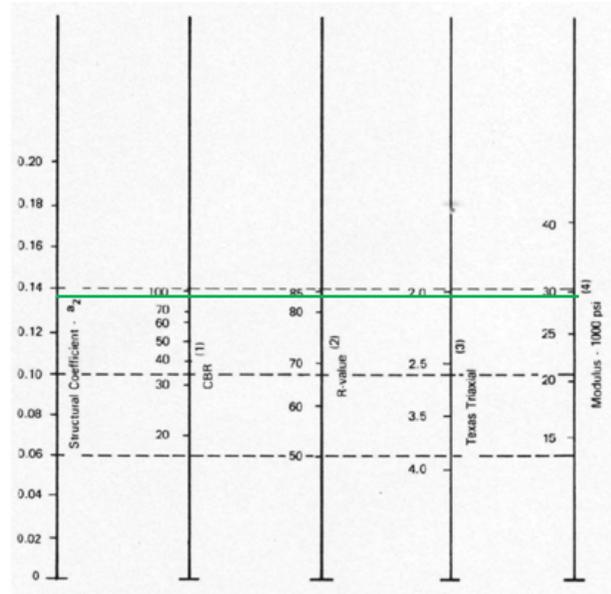
Fuente: Autoría Propia

**Apéndice 7.** Determinación de Módulos de rigidez y números estructurales pavimentos flexibles y semi-rígidos

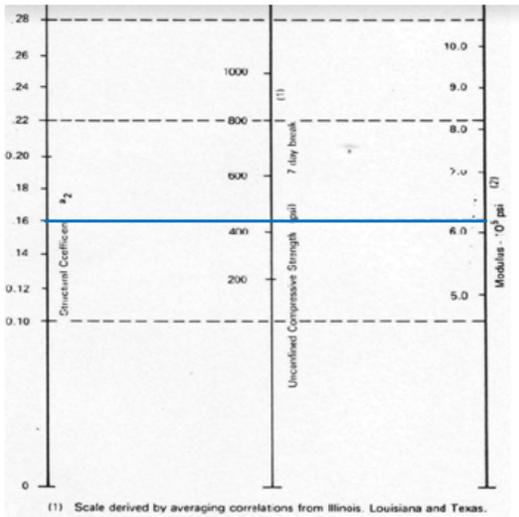
**Subbase Granular**



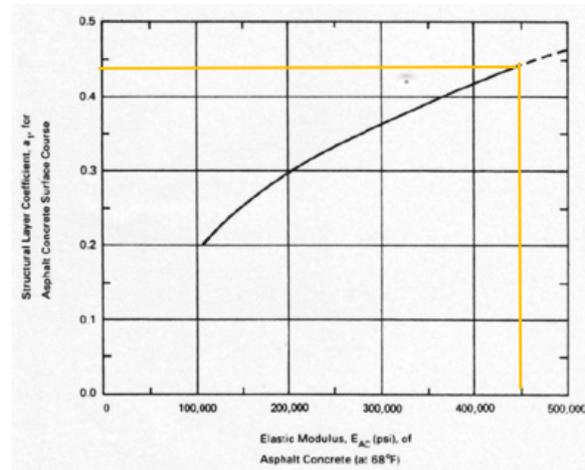
**Base Granular**



**Base estabilizada con cemento**



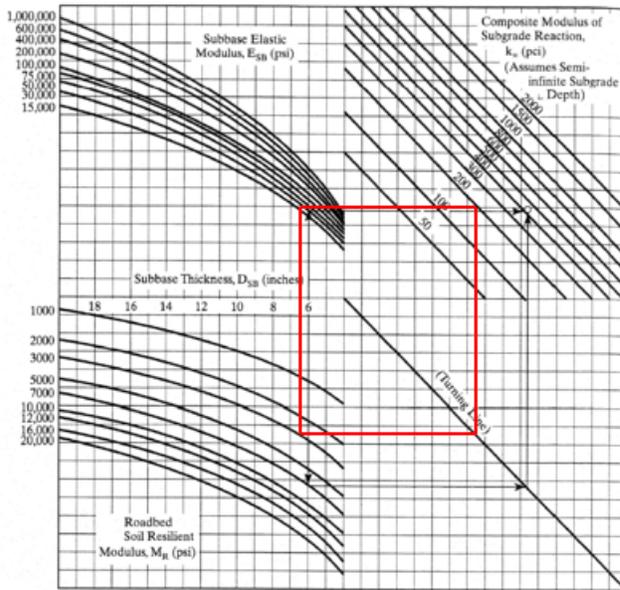
**Carpeta Asfáltica**



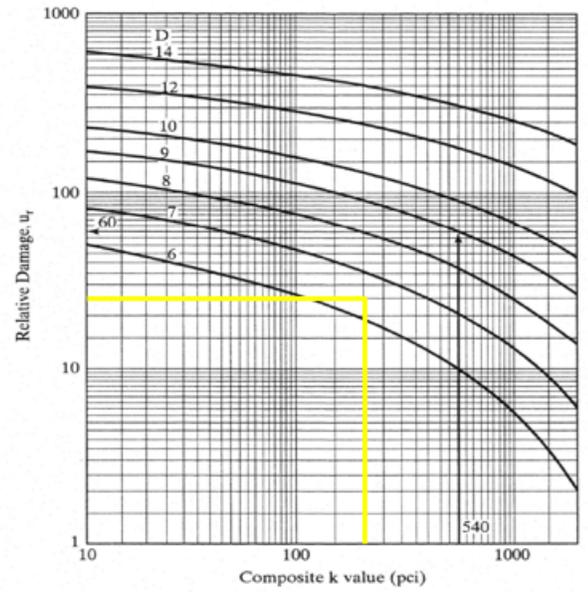
Fuente: AASHTO, 1993

## Apéndice 8. Determinación de coeficiente de reacción efectivo de subrasante ( $k$ )

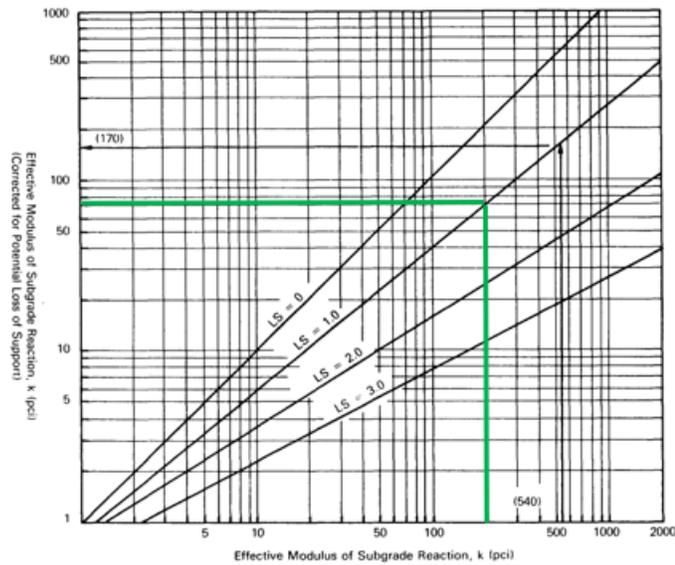
Módulo de Reacción compuesto de subrasante (Fig. 3.4 AASHTO)



Daño Relativo a partir de módulo de reacción (Fig. 3.5 AASHTO)



Módulo de Reacción efectivo corregido por L.S (Fig. 3.6 AASHTO)



Fuente: AASHTO, 1993

## Apéndice 9. Determinación del Índice de Thornthwaite (TMI)

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Índice Calor (i)
Enero	27.2	2.2	13.0
Febrero	27.8	3.2	13.4
Marzo	28.4	3.5	13.9
Abril	29.2	40.0	14.5
Mayo	28.6	210.3	14.0
Junio	27.5	184.1	13.2
Julio	27.6	114.7	13.3
Agosto	27.6	193.5	13.3
Setiembre	26.9	340.3	12.8
Octubre	26.5	362.4	12.5
Noviembre	26.5	96.8	12.5
Diciembre	26.7	10.4	12.6
<b>Promedio (°C) / Total (mm) / I (Σ)</b>	<b>27.5</b>	<b>1561.4</b>	<b>158.9</b>
<b>Exponente "a"</b>	<b>4.1</b>		

(a) Datos de entrada y cálculo de índice de calor

Fuente: Autoría Propia

Mes	Día del mes	FC para latitud Norte	ET (mm)	ETi (mm)	Mes
Enero	31	1	145.05	145.05	Seco
Febrero	29	0.91	158.64	144.36	Seco
Marzo	31	1.03	173.16	178.36	Seco
Abril	30	1.03	194.07	199.89	Seco
Mayo	31	1.08	178.22	192.48	Húmedo
Junio	30	1.06	151.73	160.83	Húmedo
Julio	30	1.08	154.01	166.33	Seco
Agosto	31	1.07	154.01	164.79	Húmedo
Setiembre	30	1.02	138.60	141.37	Húmedo
Octubre	31	1.02	130.34	132.94	Húmedo
Noviembre	30	0.98	130.34	127.73	Seco
Diciembre	31	0.99	134.42	133.07	Seco

Mes	A <sub>i-1</sub> (mm)	A <sub>i</sub> (mm)	Ex <sub>i</sub> (mm)	Di (mm)	TMI
Enero	0.00	0.00	0.00	142.85	-59.09
Febrero	0.00	0.00	0.00	141.16	-58.67
Marzo	0.00	0.00	0.00	174.86	-58.82
Abril	0.00	0.00	0.00	159.89	-47.99
Mayo	0.00	17.82	0.00	0.00	0.00
Junio	17.82	41.09	0.00	0.00	0.00
Julio	41.09	0.00	0.00	10.54	-3.80
Agosto	0.00	28.71	0.00	0.00	0.00
Setiembre	28.71	100.00	127.64	0.00	90.29
Octubre	100.00	100.00	229.46	0.00	100.00
Noviembre	100.00	69.07	0.00	0.00	0.00
Diciembre	69.07	0.00	0.00	53.60	-24.17

(b) Cálculo evapora-transpiraciones, almacenamientos, déficit, excesos y TMI

Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 10. Diseño de Pavimento Flexible para Sección Homogénea 1, según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR AASHTO 93 SECCIÓN 1 (0+000 A 2+500)																																																																																			
4. Iteración de ecuación para obtener números estructurales (SN)																																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Periodo de diseño</td> <td>15 años</td> </tr> <tr> <td>Factor Direccional</td> <td>50%</td> </tr> <tr> <td>Factor Carril</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>Tasa Crecimiento Anual</td> <td>4%</td> </tr> <tr> <td>Factor Crecimiento</td> <td>20.02</td> </tr> </tbody> </table>		Parámetro	Valor	Periodo de diseño	15 años	Factor Direccional	50%	Factor Carril	100%	Tasa Crecimiento Anual	4%	Factor Crecimiento	20.02	$\log_{10} W_{18} = Z_R + S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{1094} \right]}{0.40 + (SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \cdot \log_{10} M_R$																																																																					
Parámetro	Valor																																																																																		
Periodo de diseño	15 años																																																																																		
Factor Direccional	50%																																																																																		
Factor Carril	100%																																																																																		
Tasa Crecimiento Anual	4%																																																																																		
Factor Crecimiento	20.02																																																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Tipo Vehículo</th> <th>TPD</th> <th>Factor Camión</th> <th>EEQ Diarios</th> <th>EEQ Anuales</th> <th>EEQ Diseño</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Livianos</td> <td>851</td> <td>0.001</td> <td>1</td> <td>311</td> <td>3110</td> </tr> <tr> <td>Carga Liviana</td> <td>454</td> <td>0.010</td> <td>5</td> <td>1658</td> <td>16598</td> </tr> <tr> <td>Buses</td> <td>37</td> <td>1.710</td> <td>63</td> <td>22853</td> <td>228763</td> </tr> <tr> <td>C2</td> <td>61</td> <td>0.630</td> <td>38</td> <td>14041</td> <td>140551</td> </tr> <tr> <td>C3</td> <td>84</td> <td>1.710</td> <td>144</td> <td>52666</td> <td>527191</td> </tr> <tr> <td colspan="5">Total de EEQ Diseño (Σ)</td> <td>916213</td> </tr> </tbody> </table>		Tipo Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Diarios	EEQ Anuales	EEQ Diseño	Livianos	851	0.001	1	311	3110	Carga Liviana	454	0.010	5	1658	16598	Buses	37	1.710	63	22853	228763	C2	61	0.630	38	14041	140551	C3	84	1.710	144	52666	527191	Total de EEQ Diseño (Σ)					916213	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Capa</th> <th>MR (psi)</th> <th>a<sub>i</sub></th> <th>m<sub>i</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carpeta Asfáltica</td> <td>450000</td> <td>0.44</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Base Granular</td> <td>28000</td> <td>0.14</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Subbase Granular</td> <td>17000</td> <td>0.12</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Subrasante</td> <td>2978.71</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		Capa	MR (psi)	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	Carpeta Asfáltica	450000	0.44	1	Base Granular	28000	0.14	1	Subbase Granular	17000	0.12	1	Subrasante	2978.71	-	-	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EEQ</td> <td>916213</td> </tr> <tr> <td>Nivel de Confianza (%)</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>Estadístico (Z<sub>R</sub>)</td> <td>-0.674</td> </tr> <tr> <td>Índice de Servicio Inicial PSI</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>Índice de Servicio Terminal PSI</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>ΔPSI</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>Desviación de Desempeño (S<sub>e</sub>)</td> <td>0.45</td> </tr> </tbody> </table>		Parámetro	Valor	EEQ	916213	Nivel de Confianza (%)	75	Estadístico (Z <sub>R</sub> )	-0.674	Índice de Servicio Inicial PSI	4.2	Índice de Servicio Terminal PSI	2.0	ΔPSI	2.2	Desviación de Desempeño (S <sub>e</sub> )	0.45
Tipo Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Diarios	EEQ Anuales	EEQ Diseño																																																																														
Livianos	851	0.001	1	311	3110																																																																														
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	16598																																																																														
Buses	37	1.710	63	22853	228763																																																																														
C2	61	0.630	38	14041	140551																																																																														
C3	84	1.710	144	52666	527191																																																																														
Total de EEQ Diseño (Σ)					916213																																																																														
Capa	MR (psi)	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>																																																																																
Carpeta Asfáltica	450000	0.44	1																																																																																
Base Granular	28000	0.14	1																																																																																
Subbase Granular	17000	0.12	1																																																																																
Subrasante	2978.71	-	-																																																																																
Parámetro	Valor																																																																																		
EEQ	916213																																																																																		
Nivel de Confianza (%)	75																																																																																		
Estadístico (Z <sub>R</sub> )	-0.674																																																																																		
Índice de Servicio Inicial PSI	4.2																																																																																		
Índice de Servicio Terminal PSI	2.0																																																																																		
ΔPSI	2.2																																																																																		
Desviación de Desempeño (S <sub>e</sub> )	0.45																																																																																		
5. Definición de espesores de cálculo y diseño																																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Capa</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>SN (Iterado)</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>Diferencia A-(B+C+D)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>s/subrasante (SN3)</td> <td>5.962</td> <td>-0.303</td> <td>4.08</td> <td>6.267</td> <td>-0.010</td> <td>0.008</td> </tr> <tr> <td>s/subbase (SN2)</td> <td>5.962</td> <td>-0.303</td> <td>2.21</td> <td>4.513</td> <td>1.745</td> <td>0.007</td> </tr> <tr> <td>s/base (SN1)</td> <td>5.962</td> <td>-0.303</td> <td>1.83</td> <td>4.012</td> <td>2.247</td> <td>0.006</td> </tr> <tr> <td colspan="6">SN requerido para la estructura</td> <td>4.08</td> </tr> </tbody> </table>		Capa	A	B	SN (Iterado)	C	D	Diferencia A-(B+C+D)	s/subrasante (SN3)	5.962	-0.303	4.08	6.267	-0.010	0.008	s/subbase (SN2)	5.962	-0.303	2.21	4.513	1.745	0.007	s/base (SN1)	5.962	-0.303	1.83	4.012	2.247	0.006	SN requerido para la estructura						4.08	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Capa</th> <th>ai</th> <th>mi</th> <th>Espesores Cálculo (cm)</th> <th>Diseño (cm)</th> <th>SN por capa</th> <th>SN acumulado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carpeta Asfáltica</td> <td>0.44</td> <td>1.000</td> <td>10.6</td> <td>11.0</td> <td>1.94</td> <td>1.94</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td>0.14</td> <td>1.000</td> <td>5.5</td> <td>15.0</td> <td>0.84</td> <td>2.78</td> </tr> <tr> <td>Subbase</td> <td>0.12</td> <td>1.000</td> <td>28.3</td> <td>30.0</td> <td>1.38</td> <td>4.16</td> </tr> <tr> <td colspan="5">Espesor total de estructura de pavimento (cm)</td> <td>56.0</td> <td>SN Estructura</td> <td>4.16</td> </tr> </tbody> </table>								Capa	ai	mi	Espesores Cálculo (cm)	Diseño (cm)	SN por capa	SN acumulado	Carpeta Asfáltica	0.44	1.000	10.6	11.0	1.94	1.94	Base	0.14	1.000	5.5	15.0	0.84	2.78	Subbase	0.12	1.000	28.3	30.0	1.38	4.16	Espesor total de estructura de pavimento (cm)					56.0	SN Estructura	4.16			
Capa	A	B	SN (Iterado)	C	D	Diferencia A-(B+C+D)																																																																													
s/subrasante (SN3)	5.962	-0.303	4.08	6.267	-0.010	0.008																																																																													
s/subbase (SN2)	5.962	-0.303	2.21	4.513	1.745	0.007																																																																													
s/base (SN1)	5.962	-0.303	1.83	4.012	2.247	0.006																																																																													
SN requerido para la estructura						4.08																																																																													
Capa	ai	mi	Espesores Cálculo (cm)	Diseño (cm)	SN por capa	SN acumulado																																																																													
Carpeta Asfáltica	0.44	1.000	10.6	11.0	1.94	1.94																																																																													
Base	0.14	1.000	5.5	15.0	0.84	2.78																																																																													
Subbase	0.12	1.000	28.3	30.0	1.38	4.16																																																																													
Espesor total de estructura de pavimento (cm)					56.0	SN Estructura	4.16																																																																												
6. Representación de estructura obtenida																																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Detalle gráfico de espesores (cm) de paquete estructural de pavimento flexible</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Parámetro	Valor	Detalle gráfico de espesores (cm) de paquete estructural de pavimento flexible																																																																															
Parámetro	Valor																																																																																		
Detalle gráfico de espesores (cm) de paquete estructural de pavimento flexible																																																																																			

Fuente: Autoría Propia, 2020

# Apéndice 11. Diseño de Pavimento Flexible para Sección Homogénea 2, según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR AASHTO 93 SECCIÓN 2 (2+500 A 9+000)

### 1. Caracterización de Tránsito (Ejes Equivalentes de Diseño)

Parámetro	Valor
Periodo de diseño	15 años
Factor Direccional	50%
Factor Carril	100%
Tasa Crecimiento Annual	4%
Factor Crecimiento	20.02

Tipo Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Diarios	EEQ Anuales	EEQ Diseño
Livianos	851	0.001	1	311	3110
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	16598
Buses	37	1.710	63	22853	228763
C2	61	0.630	38	14041	140551
C3	84	1.710	144	52666	527191
Total de EEQ Diseño (Σ)					916213

### 4. Iteración de ecuación para obtener números estructurales (SN)

$$\log_{10} W_{18} = z_R * S_0 + 9.36 * \log_{10} (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1}{(SN + 1)^{3.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R$$

Capa	A	B	SN (iterado)	C	D	Diferencia A-(B+C+D)
s/subrasante (SN3)	5.962	-0.303	3.51	5.817	0.440	0.008
s/subbase (SN2)	5.962	-0.303	2.21	4.512	1.745	0.008
s/base (SN1)	5.962	-0.303	1.83	4.012	2.247	0.006
SN requerido para la estructura						3.51

5. Definición de espesores de cálculo y diseño

### 2. Propiedades y Caracterización de Materiales

Capa	MR (psi)	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>
Carpeta Asfáltica	450000	0.44	1
Base Granular	28000	0.14	1
Subbase Granular	17000	0.12	1
Subrasante	4656.58	-	-

### 3. Valores de entrada para diseño AASHTO 93

Parámetro	Valor
EEQ	916213
Nivel de Confianza (%)	75
Estadístico (Z <sub>R</sub> )	-0.674
Índice de Servicio Inicial PSI	4.2
Índice de Servicio Terminal PSI	2.0
ΔPSI	2.2
Desviación de Desempeño (S <sub>e</sub> )	0.45

6. Representación de estructura obtenida

### 5. Definición de espesores de cálculo y diseño

Capa	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	Espesores		SN	SN acumulado	
			Cálculo (cm)	Diseño (cm)			
Carpeta	0.44	1.000	10.6	11.0	1.91	1.91	
Base	0.14	1.000	5.5	15.0	0.83	2.73	
Subbase	0.12	1.000	17.2	20.0	0.91	3.64	
Espesor total de estructura de pavimento (cm)					46.0	SN Estructura	3.64

### 6. Representación de estructura obtenida

Fuente: Autoría Propia, 2020

## Apéndice 12. Diseño de Pavimento Semi-rígido para Sección Homogénea 1, según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO SEMIRÍGIDO POR AASHTO 93 SECCIÓN 1 (0+000 A 2+500)						
<b>1. Caracterización de Tránsito [Ejes Equivalentes de Diseño]</b>						
Parámetro	Valor					
Período de diseño	15 años					
Factor Direccional	50%					
Factor Carril	100%					
Tasa Crecimiento Anual	4%					
Factor Crecimiento	20.02					
Tipo Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Diarios	EEQ Anuales	EEQ Diseño	
Livianos	851	0.001	1	311	3110	
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	16598	
Buses	37	1.710	63	22853	228763	
C2	61	0.630	38	14041	140551	
C3	84	1.710	144	52666	527191	
Total de EEQ Diseño (Σ)					916213	
2. Propiedades y Caracterización de Materiales						
Capa	MR (psi)	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>			
Carpeta Asfáltica	450000	0.44	1			
Base BE-25	625000	0.16	1			
Subbase Granular	17000	0.12	1			
Subrasante	2978.71	-	-			
3. Valores de entrada para diseño AASHTO 93						
Parámetro	Valor					
EEQ	916213					
Nivel de Confianza (%)	75					
Estadístico (Z <sub>R</sub> )	-0.674					
Índice de Servicio Inicial PSI	4.3					
Índice de Servicio Terminal PSI	2.0					
ΔPSI	2.3					
Desviación de Desempeño (S <sub>e</sub> )	0.4					
4. Iteración de ecuación para obtener números estructurales (SN)						
$\log_{10} W_{18} = \underbrace{Z_R * S_0}_{A} + \underbrace{9.36 * \log_{10}(SN + 1)}_{B} - \underbrace{0.20}_{C} + \underbrace{\frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{1094} (4.2 - 1.5) \right]}{0.40 + (SN + 1)^{5.19}}}_{D} + \underbrace{2.32 * \log_{10} M_R}_{D}$						
Capa	A B SN (iterado) C D Diferencia A.(B+C+D)					
s/subrasante (SN3)	5.962 -0.270 4.00 6.233 -0.010 0.009					
s/subbase (SN2)	5.962 -0.270 2.18 4.480 1.745 0.007					
s/base BE-25 (SN1)	5.962 -0.270 0.29 0.846 5.376 0.009					
SN requerido para la estructura 4.00						
5. Definición de espesores de cálculo y diseño						
Capa	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	Espesores	SN	por	SN acumulado
			Cálculo (cm)	Diseño (cm)	capa	
Carpeta	0.44	1.000	1.7	7.5	1.30	1.30
Base BE-25	0.16	1.000	14.0	20.0	1.26	2.56
Subbase	0.12	1.000	31.7	35.0	1.58	4.14
Espesor total de estructura de pavimento (cm)			62.5	SN Estructura		4.14
6. Representación de estructura obtenida						
Detalle gráfico de espesores (cm) de paquete estructural de pavimento semi-rígido						
Carpeta Asfáltica	7.5 cm					
Base estabilizada con cemento BE-25	20.0 cm					
Subbase Granular	35.0 cm					

Fuente: Autoría Propia, 2020

# Apéndice 13. Diseño de Pavimento Semi-rígido para Sección Homogénea 2, según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO SEMIRÍGIDO POR AASHTO 93 SECCIÓN 2 (2+500 A 9+000)

### 1. Caracterización de Tránsito [Ejes Equivalentes de Diseño]

Parámetro	Valor
Período de diseño	15 años
Factor Direccional	50%
Factor Carril	100%
Tasa Crecimiento Annual	4%
Factor Crecimiento	20.02

Tipo Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Diarios	EEQ Anuales	EEQ Diseño
Livianos	851	0.001	1	311	3110
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	16598
Buses	37	1.710	63	22853	228763
C2	61	0.630	38	14041	140551
C3	84	1.710	144	52666	527191
Total de EEQ Diseño (Σ)					916213

### 4. Iteración de ecuación para obtener números estructurales (SN)

$$\log_{10} W_{18} = z_R * S_0 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{1094} + 2.32 * \log_{10} M_R$$

A
B
C
D

-8.07
D

Capa	A	B	SN (Iterado)	C	D	Diferencia A-(B+C+D)
s/subrasante (SN3)	5.962	-0.270	3.44	5.783	0.440	0.009
s/subbase (SN2)	5.962	-0.270	2.18	4.478	1.745	0.009
s/base BE-25 (SN1)	5.962	-0.270	0.29	0.846	5.376	0.009
SN requerido para la estructura						3.44

### 2. Propiedades y Caracterización de Materiales

Capa	MR (psi)	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>
Carpeta Asfáltica	450000	0.44	1
Base BE-25	625000	0.16	1
Subbase Granular	17000	0.12	1
Subrasante	4656.58	-	-

### 3. Valores de entrada para diseño AASHTO 93

Parámetro	Valor
EEQ	916213
Nivel de Confianza (%)	75
Estadístico (Z <sub>a</sub> )	-0.674
Índice de Servicio Inicial PSI	4.3
Índice de Servicio Terminal PSI	2.0
ΔPSI	2.3
Desviación de Desempeño (S <sub>o</sub> )	0.4

### 5. Definición de espesores de cálculo y diseño

Capa	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	Esposres Cálculo (cm)	SN por capa	SN acumulado
Carpeta	0.44	1.000	1.7	7.5	1.30
Base BE-25	0.16	1.000	14.0	0.94	2.24
Subbase	0.12	1.000	26.4	1.36	3.60
Espesor total de estructura de pavimento (cm)					52.5
SN Estructura					3.60

### 6. Representación de estructura obtenida

Detalle gráfico de espesores (cm) de paquete estructural de pavimento semi-rígido

Fuente: Autoría Propia, 2020

# Apéndice 14. Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 1, según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR AASHTO 93 SECCIÓN 1 (0+000 A 2+500)									
<b>2. Caracterización de Tránsito (Ejes Equivalentes de Diseño)</b>									
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>								
Periodo de diseño	20 años								
Factor Direccional	50%								
Factor Carril	100%								
Tasa Crecimiento Annual	4%								
Factor Crecimiento	29.78								
<b>Tipo Vehículo</b>	<b>TPD</b>	<b>Factor Camión</b>	<b>EEQ Diarios</b>	<b>EEQ Anuales</b>	<b>EEQ Diseño</b>				
Livianos	851	0.001	1	311	4626				
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	24689				
Buses	37	1.710	63	22853	340288				
C2	61	0.630	38	14041	209072				
C3	84	1.710	144	52666	784203				
Total de EEQ Diseño (Σ)					1362878				
<b>3. Propiedades del concreto hidráulico y valores de entrada para diseño AASHTO 93</b>									
<b>Propiedad del concreto</b>	<b>Valor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>						
Resistencia compresión a 28 días (F <sub>c</sub> ) (psi)	3982	Nivel de Confianza (%)	75						
Módulo de Elasticidad (E <sub>c</sub> ) (psi)	3597075	Estadístico (ZR)	-0.674						
Módulo de Ruptura (S <sub>c</sub> ) (psi)	645	Índice de Servicio Inicial PSI	4.5						
		Índice de Servicio Terminal PSI	2.0						
		ΔPSI	2.5						
		Desviación de Desempeño (So)	0.35						
<b>4. Módulo de Reacción de la subrasante (K)</b>									
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>								
Espesor de losa supuesto (D) (in)	6.5								
Espesor de Subbase supuesto (in)	10								
Módulo resiliente de SR (psi)	2579								
Módulo resiliente de base (psi)	17000								
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Gráfico que debe utilizarse de AASHTO-93</b>							
Módulo de reacción compuesto de subrasante (K <sub>s</sub> ) (pci)	200	Fig. 3.3 Chart for estimating Composite Modulus of Subgrade reaction (K <sub>s</sub> )							
Profundidad estrato rígido (D <sub>eq</sub> ) (ft)	No aplica	Fig. 3.4 Chart to Modify Modulus of (K <sub>s</sub> ) (Rigid foundation)							
K corregido por estrato rígido	200	Fig. 3.5 Chart for Estimating Relative Damage to Rigid Pavements							
Daño relativo (urf)	30	Table 2.7 Typical Ranges of Loss of Support (LS) for Various Materials							
Pérdida Soporte (LS)	1.0	Fig. 3.6 Correction of Effective Modulus for Potential Loss of Subbase							
Módulo de reacción efectivo corregido por LS (K <sub>efectivo</sub> ) (pci)	70								
<b>5. Definición de espesor de losa D</b>									
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>E</b>						
$\log_{10}(W_{99}) - Z_k \times S_k + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.024 \times 10^{-7}}{(D+1)^{0.85}}}$	$(67 \times C_2 \times D^{0.75} - 1.132)$	$215.65(L)^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}$	$D^{0.75}$						
<b>Capa</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>D (in) Iterado</b>	<b>C</b>	<b>E</b>	<b>Diferencia A-(B+C+E)</b>			
Espesor de losa teórico (D)	6.134	6.242	6.610	-0.060	-0.057	0.009			
<b>6. Representación de estructura obtenida</b>									
<b>Espesor &amp; Capa</b>	<b>Valor</b>								
Losa teórico (in)	6.6								
Losa construcción (in)	6.6								
Subbase construcción (in)	10.0								
<b>3. Coeficientes de pavimentos rígidos</b>									
<b>Coefficiente de drenaje</b>	<b>Valor</b>	<b>Coefficiente de transferencia</b>	<b>Valor</b>						
Tiempo de exposición de la estructura a humedad (%)	>25%	Tipo de Pavimento	JPCP						
Calidad de drenajes	Buena	Tipo de espaldón	Asfáltico						
Coefficiente de drenaje (C <sub>d</sub> )	1	Presencia de dovelas	SI						
		Coef. Transferencia (j)	3.2						

Fuente: Autoría Propia, 2020

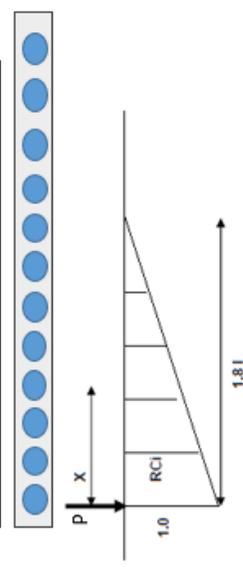
# Apéndice 15. Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 1 (Variando EEQ), según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR AASHTO 93 SECCIÓN 1 (0+000 A 2+500) (VARIANDO EEQ SEGÚN AASHTO 1993)						
<b>1. Caracterización de Tránsito (Ejes Equivalentes de Diseño)</b>						
Parámetro	Valor					
Período de diseño	20 años					
Factor Direccional	50%					
Factor Carril	100%					
Tasa Crecimiento Annual	4%					
Factor Crecimiento	29.78					
<b>Tipo Vehículo</b>	<b>TPD</b>	<b>Factor Camión</b>	<b>EEQ Diarios</b>	<b>EEQ Anuales</b>	<b>EEQ Diseño</b>	
Livianos	851	0.001	1	311	4626	
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	24689	
Buses	37	1.710	63	22853	340288	
C2	61	0.630	38	14041	209072	
C3	84	1.710	144	52666	784203	
Total de EEQ Diseño (Σ)		2034146				
<b>2. Propiedades del concreto hidráulico y valores de entrada para diseño AASHTO 93</b>						
Propiedad del concreto	Valor	Parámetro	Valor			
Resistencia compresión a 28 días (f'c) (psi)	3982	Nivel de Confianza (%) Estadístico (ZR)	75 -0.674			
Módulo de Elasticidad (Ec) (psi)	3597075	Índice de Servicio Inicial PSI	4.5			
Módulo de Ruptura (Sc) (psi)	645	Índice de Servicio Terminal PSI ΔPSI	2.0 2.5			
Desviación de Desempeño (So)		0.35				
<b>3. Coeficientes de pavimentos rígidos</b>						
Coefficiente de drenaje	Valor	Coefficiente de transferencia	Valor			
Tiempo de exposición de la estructura a humedad (%)	>25%	Tipo de Pavimento	JPCP			
Calidad de drenajes	Buena	Tipo de espaldón	Asfáltico			
Coefficiente de drenaje (Cd)	1	Presencia de dovelas	Si			
		Coef. Transferencia (U)	3.2			
<b>4. Módulo de Reacción de la subrasante (K)</b>						
Parámetros	Valor					
Espesor de losa supuesto (D) (in)	7					
Espesor de Subbase supuesto (in)	10					
Módulo resiliente de SR (psi)	2979					
Módulo resiliente de base (psi)	17000					
Parámetro	Valor	Gráfico que debe utilizarse de AASHTO-93				
Módulo de reacción compuesto de subrasante (K <sub>c</sub> ) (pci)	190	Fig. 3.3 Chart for estimating Composite Modulus of Subgrade reaction (K <sub>c</sub> )				
Profundidad estrato rígido (D <sub>ecr</sub> ) (ft)	No aplica					
K corregido por estrato rígido	190	Fig. 3.4 Chart to Modify Modulus of (K <sub>c</sub> ) (Rigid foundation)				
Daño relativo (μf)	32	Fig. 3.5 Chart for Estimating Relative Damage to Rigid Pavements				
Pérdida Soporte (LS)	1.0	Table 2.7 Typical Ranges of Loss of Support (LS) for Various Materials				
Módulo de reacción efectivo corregido por LS (K <sub>efectivo</sub> ) (pci)	65	Fig. 3.6 Correction of Effective Modulus for Potential Loss of Subbase				
<b>5. Definición de espesor de losa D</b>						
$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_e + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + 1.024 \times 10^{-6} (D+1)^{0.469}}$						
$D = \left[ \frac{(S_e) \times Z_R \times (D+1)^{0.75} - 1.132}{21.5 \text{ ó } 65(f) \times (D+1)^{0.75} - \frac{18.42}{(R_e/k)^{0.25}}} \right]^{1.469}$						
Capa	A	B	D (in) Iterado	C	E	Diferencia A-(B+C+E)
Espesor de losa teórico (D)	6.308	6.430	7.070	-0.060	-0.071	0.010
<b>6. Representación de estructura obtenida</b>						
Espeor & Capa	Valor					
Losa teorico (in)	7.1					
Losa construcción(in)	7.0					
Subbase construcción (in)	10.0					

Fuente: Autoría Propia, 2020

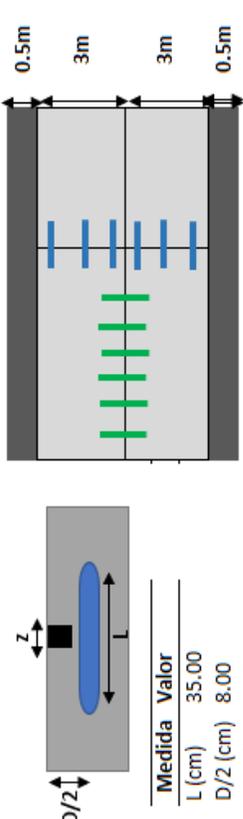
## Apéndice 16. Diseño de acero para pavimento rígido de sección homogénea 1

DISEÑO DE ACERO PARA PAVIMENTO RÍGIDO SECCIÓN 1 (0+000 A 2+500)	
<b>1. Análisis para determinar dovela crítica</b>	
Parámetro	Valor
Módulo Rigidez concreto $E_c$ (psi)	3597074.86
Espesor de Losa D (in)	6.6
Coef. Poisson Concreto ( $\mu$ )	0.15
k efectiva de losa	70.00
Razón Rigidez Relativa I (in)	33.54
<b>Parámetro dosificación</b>	<b>Valor</b>
Separación entre doveles (cm)	30.00
Separación entre doveles (in)	11.81
Número de Dovela	6.00
1.8(l) (in)	60.37
Ancho de carril (in)	118.11
Recubrimiento al borde (in)	6.00
# Doveles que reciben carga	6.00
Eje simple carga (lb)	18000.00
P (lb)	4500.00



Dovela	Distancia	Rci	*Pdi (lb)
1	0.00	1.00	1468.06
2	11.81	0.80	1180.83
3	23.62	0.61	893.61
4	35.43	0.41	606.39
5	47.24	0.22	319.17
6	59.06	0.02	31.94
$\Sigma$		3.07	4500.00

**2. Determinación de resistencia de la dovela**			
Parámetro	Valor		
Módulo Rigidez acero E (psi)	29000000.00		
Momento Inercia dovela  $I$  (in<sup>4</sup>)	0.02		
Ancho de junta (z) (in)	0.15		
Módulo Interacción Concreto/dovela (Kd) (pci)	300000.00		
$\beta$	0.59		
Resistencia compresión a 28 días ( $f'_c$ ) (psi)	3982		
Carga en dovela crítica (lb)	1468.06		
**Parámetros de Resistencia**	**Valor**		
Esfuerzo aplicado en dovela ( $\sigma_s$ ) (psi)	2430.99		
Resistencia dovela (int. concreto-acero) ( $f_{s_c}$ ) (psi)	4314.31		
	**cumple**		
**3. Diseño Amarres longitudinales**			
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Peso Unitario concreto (pci)	0.09	Número de varilla	3
Distancia a borde libre ( $L'$ ) (in)	118.11	Separación (cm)	60.00
Factor fricción losa/soposte ( $f_a$ )	1.50	Separación (in)	23.62
Resistencia acero grado ( $f_s$ ) 40 (psi)	27000.00	Área a colocar (in<sup>2</sup>/ft)	0.056
Área necesaria (in<sup>2</sup>/ft)	0.004	Acolocada > Anecesaria	cumple
**4. Representación de doveles y acero longitudinal**			



Medida	Valor
L (cm)	35.00
D/2 (cm)	8.00
z (cm)	0.40

| N° | @ (cm) | N° | @ (cm) |
| 3.00 | 60.00 | 6.00 | 30.00 |

\*Se contempla ambas llantas "P" con separación de 72in, igual dovela 1 predomina

# Apéndice 17. Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 2, según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR AASHTO 93 SECCIÓN 2 (2+500 A 9+000)					
<b>1. Caracterización de Tránsito [Ejes Equivalentes de Diseño]</b>					
Parámetro	Valor				
Período de diseño	20 años				
Factor Direccional	50%				
Factor Carril	100%				
Tasa Crecimiento Annual	4%				
Factor Crecimiento	29.78				
<b>Tipo Vehículo</b>	<b>TPD</b>	<b>Factor Camión</b>	<b>EEQ Diarios</b>	<b>EEQ Anuales</b>	<b>EEQ Diseño</b>
Livianos	851	0.001	1	311	4626
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	24689
Buses	37	1.710	63	22853	340288
C2	61	0.630	38	14041	209072
C3	84	1.710	144	52666	784203
Total de EEQ Diseño (Σ)		1362878			
<b>2. Propiedades del concreto hidráulico y valores de entrada para diseño AASHTO 93</b>					
Propiedad del concreto	Valor	Parámetro	Valor		
Resistencia compresión a 28 días (f'c) (psi)	3982	Nivel de Confianza (%) Estadístico (ZR)	75 -0.674		
Módulo de Elasticidad (Ec) (psi)	3597075	Índice de Servicio Inicial PSI	4.5		
Módulo de Ruptura (Sc) (psi)	645	Índice de Servicio Terminal PSI	2.0		
		ΔPSI	2.5		
		Desviación de Desempeño (So)	0.35		
<b>3. Coeficientes de pavimentos rígidos</b>					
Coefficiente de drenaje	Valor	Coefficiente de transferencia	Valor		
Tiempo de exposición de la estructura a humedad (%)	>25%	Tipo de Pavimento	JPCP		
Calidad de drenajes	Buena	Tipo de espaldón	Asfáltico		
Coefficiente de drenaje (Cd)	1	Presencia de dovelas	Si		
		Coef. Transferencia (f)	3.2		
<b>4. Módulo de Reacción de la subrasante [K]</b>					
Parámetros	Valor				
Espesor de losa supuesto (D) (in)	6.5				
Espesor de Subbase supuesto (in)	10				
Módulo resiliente de SR (psi)	4657				
Módulo resiliente de base (psi)	17000				
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Gráfico que debe utilizarse de AASHTO-93</b>			
Módulo de reacción compuesto de subrasante (K <sub>c</sub> ) (pci)	280	Fig. 3.3 Chart for estimating Composite Modulus of Subgrade reaction (K <sub>c</sub> )			
Profundidad estrato rígido (D <sub>ec</sub> ) (ft)	No aplica				
K corregido por estrato rígido	280	Fig. 3.4 Chart to Modify Modulus of (K <sub>c</sub> ) (Rigid foundation)			
Daño relativo (μf)	22	Fig. 3.5 Chart for Estimating Relative Damage to Rigid Pavements			
Pérdida Soporte (LS)	1.0	Table 2.7 Typical Ranges of Loss of Support (LS) for Various Materials			
Módulo de reacción efectivo corregido por LS (K <sub>efectivo</sub> ) (pci)	90	Fig. 3.6 Correction of Effective Modulus for Potential Loss of Subbase			
<b>5. Definición de espesor de losa D</b>					
$\log_{10}(W_{18}) = Z_A \times S_p + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + 1.624 \times 10^{-6} (D+1)^{4.67}}$					
$D = \left[ \frac{215.03(t)^{0.75}}{(S_p/k)^{0.25}} \left( D^{0.75} - 18.42 \right) \right]^{1.332}$					
<b>Capa</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>D (in) Iterado</b>	<b>C</b>	<b>E</b>
Espesor de losa teórico (D)	6.134	6.198	6.504	-0.060	-0.012
					Diferencia A-(B+C+E)
					0.009
<b>6. Representación de estructura obtenida</b>					
Espesor & Capa	Valor				
Losa teorico (in)	6.5				16.5 cm
Losa construcción(in)	6.6				
Subbase construcción (in)	10.0				25.0 cm

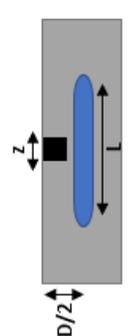
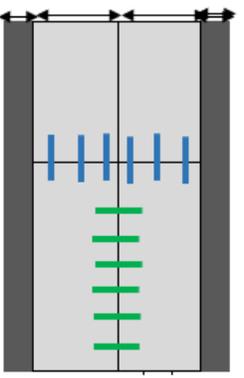
Fuente: Autoría Propia, 2020

# Apéndice 18. Diseño de Pavimento rígido para Sección Homogénea 2 (Variando EEQ), según metodología AASHTO (1993)

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR AASHTO 93 SECCIÓN 2 (2+500 A 9+000) (VARIANDO EEQ SEGÚN AASHTO 1993)						
<b>1. Caracterización de Tránsito [Ejes Equivalentes de Diseño]</b>						
Parámetro	Valor					
Período de diseño	20 años					
Factor Direccional	50%					
Factor Carril	100%					
Tasa Crecimiento Annual	4%					
Factor Crecimiento	29.78					
Tipo Vehículo	TPD	Factor Camión	EEQ Diarios	EEQ Anuales	EEQ Diseño	
Livianos	851	0.001	1	311	4626	
Carga Liviana	454	0.010	5	1658	24689	
Buses	37	1.710	63	22853	340288	
C2	61	0.630	38	14041	209072	
C3	84	1.710	144	52666	784203	
Total de EEQ Diseño (Σ)					2034146	
<b>2. Propiedades del concreto hidráulico y valores de entrada para diseño AASHTO 93</b>						
Propiedad del concreto	Valor	Parámetro	Valor			
Resistencia compresión a 28 días (F'c) (psi)	3982	Nivel de Confianza (%)	75			
Módulo de Elasticidad (Ec) (psi)	3597075	Estadístico (ZR)	-0.674			
Módulo de Ruptura (Sc) (psi)	645	Índice de Servicio Inicial PSI	4.5			
		Índice de Servicio Terminal PSI	2.0			
		ΔPSI	2.5			
		Desviación de Desempeño (So)	0.35			
<b>3. Coeficientes de pavimentos rígidos</b>						
Coefficiente de drenaje	Valor	Coefficiente de transferencia	Valor			
Tiempo de exposición de la estructura a humedad (%)	>25%	Tipo de Pavimento	JPCP			
Calidad de drenajes	Buena	Tipo de espaldón	Asfáltico			
Coefficiente de drenaje (Cd)	1	Presencia de dovelas	Si			
		Coef. Transferencia (I)	3.2			
<b>4. Módulo de Reacción de la subrasante [K]</b>						
Parámetros	Valor					
Espesor de losa supuesto (D) (in)	7					
Espesor de Subbase supuesto (in)	10					
Módulo resiliente de SR (psi)	4657					
Módulo resiliente de base (psi)	17000					
<b>5. Definición de espesor de losa D</b>						
Capa	A	B	D (in) Iterado	C	E	Diferencia A-(B+C+E)
Espesor de losa teórico (D)	6.308	6.402	7.000	-0.060	-0.038	0.005
<b>6. Representación de estructura obtenida</b>						
Espeor & Capa	Valor					
Losa teórico (in)	7.0					
Losa construcción (in)	7.0					
Subbase construcción (in)	10.0					

Fuente: Autoría Propia, 2020

## Apéndice 19. Diseño de acero para pavimento rígido de sección homogénea 2

DISEÑO DE ACERO PARA PAVIMENTO RÍGIDO SECCIÓN 2 (2+500 A 9+000)			
<b>2. Determinación de resistencia de la dovela</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>		
Módulo Rigidez acero E (psi)	29000000.00		
Momento inercia dovela (I) (in <sup>4</sup> )	0.02		
Ancho de junta (z) (in)	0.15		
Módulo Interacción Concreto/dovela (Kd) (pci)	300000.00		
$\beta$	0.59		
Resistencia compresión a 28 días (f'c) (psi)	3982		
Carga en dovela crítica (lb)	2457.73		
<b>Parámetros de Resistencia</b>	<b>Valor</b>		
Esfuerzo aplicado en dovela ( $\sigma_b$ ) (psi)	4069.81		
Resistencia dovela (Int. concreto-acero) ( $f_b$ ) (psi)	4314.31		
	<b>cumple</b>		
<b>3. Diseño Amarres longitudinales</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Peso Unitario concreto (pci)	0.09	Número de varilla	3
Distancia a borde libre (L') (in)	118.11	Separación (cm)	60.00
Factor fricción losa/soposte (fa)	1.50	Separación (in)	23.62
Resistencia acero grado (fs) 40 (psi)	27000.00	Área a colocar (in <sup>2</sup> /ft)	0.056
Área necesaria (in <sup>2</sup> /ft)	0.004	Acolocada > Anecesaria	cumple
<b>4. Representación de dovelas y acero longitudinal</b>			
			
<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>N°</b>	<b>@ (cm)</b>
L (cm)	35.00		
D/2 (cm)	8.00	3.00	60.00
z (cm)	0.40		6.00
			30.00
			@ (cm)
			30.00

1. Análisis para determinar dovela crítica	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Módulo Rigidez concreto Ec (psi)	3597074.86
Espesor de Losa D (in)	6.6
Coef. Poisson Concreto ( $\mu$ )	0.15
k efectiva de losa	90.00
Razón Rigidez Relativa I (in)	31.46
<b>Parámetro dosificación</b>	<b>Valor</b>
Separación entre dovelas (cm)	30.00
Separación entre dovelas (in)	11.81
Número de Dovela	6.00
1.8(l) (in)	56.63
Ancho de carril (in)	118.11
Recubrimiento al borde (in)	6.00
# Dovelas que reciben carga	5.00
Eje simple carga (lb)	18000.00
P (lb)	4500.00

Dovela	Distancia	Rci	*Pdi (lb)
1	0.00	1.00	2457.73
2	11.81	0.79	1945.37
3	23.62	0.58	1433.00
4	35.43	0.37	920.64
5	47.24	0.17	408.27
$\Sigma$		2.92	7165.02

\*Se contempla ambas llantas "p" con separación de 72in, igual dovela 1 predomina

Fuente: Autoría Propia, 2020

## Apéndice 20. Resumen de costos utilizados en licitaciones indagadas

En este caso se revisan específicamente las licitaciones públicas: 2020LA-000007-0003200001 (A) 2018LA-000011-0006000001(B) y 2019LN-000005-0006000001 (C), todas pertenecientes a la zona de Guanacaste, excepto otra investigada 2019CD-001653-0015499999 (para determinar algunos costos inherentes al pavimento rígido).

COSTOS DE ALQUILER DE MAQUINARIA				
DESCRIPCION	COSTO/HORA (PROMEDIO)	A	B	C
MOTONIVELADORA ARTICULADA	€30,094.76	€30,643.27	€24,640.00	€35,001.00
PALA EXCAVADORA HIDRAULICA	€35,414.50	-	€35,828.00	€35,001.00
CARGADOR RETROEXCAVADOR LLANTAS	€14,737.61	€15,103.13	€10,644.71	€18,465.00
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	€19,188.59	€20,120.07	€17,263.70	€20,182.00
TANQUE DE AGUA	€20,906.67	€18,880.00	€22,702.00	€21,138.00
CAMIÓN BRIGADA	€8,321.17	€6,800.00	€9,170.52	€8,993.00
COMPACTADOR	€21,605.61	€13,060.83	€25,436.00	€26,320.00
COMPACTADOR LLANTA DE HULE	€14,500.00	€19,127.80	€23,260.57	€21,138.00
PAVIMENTADORA	€33,500.00	€33,500.00	-	-
BARREDORA AUTOPROPULSADA	€8,601.33	€9,440.00	€6,458.00	€9,906.00
DISTRIBUIDOR DE ASFALTO	€20,050.80	€15,015.50	€29,428.90	€15,708.00
RECUPERADORA	€50,150.00	€50,150.00	-	-
EQUIPO DE ACARREO	€11,500.00	€11,500.00	-	-

\*Costos no contemplan operador

SALARIO MÍNIMO Y PAGADOS POR EMPRESAS						
TRABAJADOR/EMPLEADO	(Ministerio de Trabajo y Seguridad Social)	A	B	C	SALARIO A UTILIZAR (PROMEDIO DE A,B,C)	UNIDADES
ENCARGADO DE CUADRILLA	€1,734.09	€3,500.00	€4,403.40	€4,775.00	€4,226.13	SALARIO/HORA
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	€1,470.22	€3,500.00	€4,300.00	€4,918.00	€4,239.33	SALARIO/HORA
PEÓN	€1,335.00	€2,700.00	€2,854.00	€2,180.00	€2,578.00	SALARIO/HORA
CHOFER VEHICULO PESADO	€1,470.22	€3,500.00	€3,440.00	€2,914.00	€3,284.67	SALARIO/HORA
VAGONETEROS	€1,470.22	€3,500.00	€3,060.19	€2,914.00	€3,158.06	SALARIO/HORA
OPERADOR DE MONTONIVELADORA	€1,470.22	€3,500.00	€4,818.14	€4,918.00	€4,412.05	SALARIO/HORA

\*Salarios de empresas contemplan cargas sociales

MATERIAL	COSTO	UNIDAD
SUBABASE GRADUACIÓN ESPECIAL CASO 2	€6,500.00	m <sup>3</sup>
BASE GRANULAR GRADUACIÓN C	€7,500.00	m <sup>3</sup>
EMULSIÓN ASFÁLTICA	€400.00	l
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO B TMN 12MM	€50,000.00	ton
CEMENTO UG SACO 50kg	€6,085.00	saco
SUMINISTRO CONCRETO MR.45 kg/cm <sup>2</sup> REVENIMIENTO 15cm	€101,675.00	m <sup>3</sup>
VARILLA LISA No. 6 GRADO 40	€7,100.00	6m
VARILLA LISA No. 3 GRADO 40	€2,150.00	6m
FORMALETA	€10,200.00	m <sup>3</sup>
MEMBRANA DE CURADO	€650.00	m
SELLO DE POLIURETANO PARA JUNTAS	€1,286.00	m

Fuente: Autoría Propia, 2020

## Apéndice 21. Memoria de cálculo de costos de inversión inicial pavimento flexible

REGLÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.209.01	Excavación para estructuras	m <sup>3</sup>	16200

EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA
CARGADOR RETROEXCAVADOR LLANTAS	2	0.0244	h/m <sup>3</sup>	396	40	¢14,737.61
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	6	0.0244	h/m <sup>3</sup>	396	40	¢19,188.59
TANQUE DE AGUA	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	396	40	¢20,906.67
COMPACTADOR	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	396	40	¢21,605.61
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	396	40	¢8,321.17
SUB TOTAL						¢77,411,528.36

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>3</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0244	396	40	¢4,226.13	¢1,673.921
PEÓN (BANDERILERO)	2	0.0244	396	40	¢2,578.00	¢2,042.230
OPERADORES	3	0.0244	396	40	¢4,239.33	¢5,037.447
VAGONETOS	6	0.0244	396	40	¢3,158.06	¢7,505.226
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0244	396	40	¢3,284.67	¢1,301.017
PEÓN	4	0.0244	396	40	¢2,578.00	¢4,084.460
SUB TOTAL						¢21,644,301.1

EQUIPO Y HERRAMIENTAS						
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO	
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	¢400,000.00	¢400,000	
BOTADERO	1.000	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1	¢500,000.00	¢500,000	
SUB TOTAL				¢900,000.00	¢900,000.00	

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	¢99,955,829.49
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	¢6,170.11
IMPREVISTOS	5%
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	3%
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	5%
UTILIDAD	8%
PRECIO UNITARIO COLONES	¢7,465.84

(a) Reglón de pago CR.209.01

Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO			
CR.301.01	Sub base granular graduación especial caso 2	m <sup>3</sup>	6900				
<b>EQUIPO</b>							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
MOTONIVELADORA ARTICULADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€30,094.76	€4,389,216.25
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	5	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€19,188.59	€113,992,947.69
TANQUE DE AGUA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€20,906.67	€3,049,165.08
COMPACTADOR	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€21,605.61	€3,151,103.55
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€8,321.17	€1,213,614.37
<b>SUB TOTAL</b>							€25,796,046.95
<b>MANO DE OBRA</b>							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€4,226.13	€616,367
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€2,578.00	€751,985
OPERADORES	2	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€4,239.33	€1,236,584
VAGONETAS	6	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€3,158.06	€2,763,556
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€3,284.67	€479,057
PEÓN	4	0.0211	h/m <sup>3</sup>	146	15	€2,578.00	€1,503,970
<b>SUB TOTAL</b>							€7,351,518.5
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>							
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO			
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	g/obal	1	€210,000.00			
SUBBASE GRADUACIÓN ESPECIAL CASO 2	1.200	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	8280	€6,500.00			
<b>SUB TOTAL</b>				€54,030,000.0			
<b>SUBTOTAL PRECIO UNITARIO</b>				€87,177,565.48			
<b>SUBTOTAL PRECIO UNITARIO</b>				€12,634.43			
IMPREVISTOS				5%			
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)				3%			
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA				5%			
UTILIDAD				8%			
<b>PRECIO UNITARIO COLONES</b>				€15,287.66			

(b) Región de pago CR.301.01  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.301.02	Base granular graduación tipo C	m <sup>3</sup>	8100

EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA
MOTONIVELADORA ARTICULADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€30,094.76
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	6	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€19,188.59
TANQUE DE AGUA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€20,906.67
COMPACTADOR	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€21,605.61
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€8,321.17
						SUB TOTAL
						€33,567,616.74

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>3</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0211	171	17	€4,226.13	€723,561
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0211	171	17	€2,578.00	€882,765
OPERADORES	2	0.0211	171	17	€4,239.33	€1,451,642
VAGONETOS	6	0.0211	171	17	€3,158.06	€3,244,174
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0211	171	17	€3,284.67	€562,372
PEÓN	4	0.0211	171	17	€2,578.00	€1,765,529
						SUB TOTAL
						€8,630,043.5

EQUIPO Y HERRAMIENTAS						
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO	
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€215,000.00	€215,000	
BASE GRANULAR GRADUACIÓN C	1.200	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	9720	€7,500.00	€72,900,000	
					SUB TOTAL	
					€73,115,000.0	

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€115,312,660.24
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€14,236.13
IMPREVISTOS	5%
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	3%
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	5%
UTILIDAD	8%
PRECIO UNITARIO COLONES	€17,225.72

(c) Región de pago CR.301.02  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.405.03	Capa de mezcla asfáltica en caliente tipo B preparada en planta	ton	13662

EQUIPO							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
PAVIMENTADORA	1	0.0286	h/ton	390	39	€33,500.00	€13,076,485.71
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	9	0.0286	h/ton	390	39	€19,188.59	€167,411,161.41
COMPACTADOR LLANTA DE HULE	1	0.0286	h/ton	390	39	€14,500.00	€5,659,971.43
COMPACTADOR	1	0.0286	h/ton	390	39	€21,605.61	€8,433,595.54
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0286	h/ton	390	39	€8,321.17	€3,248,110.57
						SUB TOTAL	€97,829,324.66

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/ton)	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0286	390	39	€4,226.13	€1,649,641
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0286	390	39	€2,578.00	€2,012,608
OPERADORES	3	0.0286	390	39	€4,239.33	€4,964,380
VAGONETOS	9	0.0286	390	39	€3,158.06	€11,094,547
PEÓN	6	0.0286	390	39	€2,578.00	€6,037,823
					SUB TOTAL	€25,758,999.7

EQUIPO Y HERRAMIENTAS					
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€500,000.00	€500,000
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO B	1.000	ton/ton	13662	€50,000.00	€683,100,000
				SUB TOTAL	€683,600,000.0

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€807,188,324.34
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€59,082.73
IMPREVISTOS	5%
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	3%
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	5%
UTILIDAD	8%
PRECIO UNITARIO COLONES	€71,490.11

(d) Región de pago CR.405.03  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD				
CR.413.02	Riego de Imprimación	L	118800				
<b>EQUIPO</b>							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/l)	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
TANQUE DE AGUA	1	0.0015	h/l	179	18	€20,906.67	€3,748,923.80
BARREDORA AUTOPROPULSADA	1	0.0015	h/l	179	18	€8,601.33	€1,542,366.54
DISTRIBUIDOR DE ASFALTO	1	0.0015	h/l	179	18	€20,050.80	€3,595,452.23
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0015	h/l	179	18	€8,321.17	€1,492,129.05
SUB TOTAL							€10,378,871.62
<b>MANO DE OBRA</b>							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/l)	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO	
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0015	179	18	€4,226.13	€757,818	
PEÓN (BANDERILERO)	2	0.0015	179	18	€2,578.00	€924,559	
OPERADORES	1	0.0015	179	18	€4,239.33	€760,185	
CHOFER VEHICULO PESADO	2	0.0015	179	18	€3,284.67	€1,177,994	
PEÓN	4	0.0015	179	18	€2,578.00	€1,849,118	
SUB TOTAL							€5,469,675.0
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>							
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO		
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€216,000.00	€216,000		
EMULSIÓN ASFÁLTICA	2.000	l/m <sup>2</sup>	118800	€400.00	€47,520,000		
SUB TOTAL					€47,736,000.0		
<b>SUBTOTAL PRECIO UNITARIO</b>				€63,584,546.65			
<b>SUBTOTAL PRECIO UNITARIO</b>				€535,222			
<b>IMPREVISTOS</b>				5%	€26,760		
<b>ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)</b>				3%	€16,060		
<b>ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA</b>				5%	€26,760		
<b>UTILIDAD</b>				8%	€42,820		
<b>PRECIO UNITARIO COLONES</b>					€647,620		

(e) Región de pago CR.413.02  
Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 22. Memoria de cálculo de costos de inversión inicial pavimento semi-rígido

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.209.01	Excavación para estructuras	m <sup>3</sup>	24300

EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA
CARGADOR RETROEXCAVADOR LLANTAS	2	0.0244	h/m <sup>3</sup>	594	59	€14,737.61
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	6	0.0244	h/m <sup>3</sup>	594	59	€19,188.59
TANQUE DE AGUA	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	594	59	€20,906.67
COMPACTADOR	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	594	59	€21,605.61
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	594	59	€8,321.17
SUB TOTAL						€116,117,292.54

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>3</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0244	594	59	€4,226.13	€2,510.881
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0244	594	59	€2,578.00	€3,063.345
OPERADORES	3	0.0244	594	59	€4,239.33	€7,556.171
VAGONETOS	6	0.0244	594	59	€3,158.06	€11,257.839
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0244	594	59	€3,284.67	€1,951.526
PEÓN	4	0.0244	594	59	€2,578.00	€6,126.689
SUB TOTAL						€32,466,451.7

EQUIPO Y HERRAMIENTAS			
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1
BOTADERO	1.000	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1
COSTO/UNIDAD			€400,000.00
COSTO			€500,000.00
SUB TOTAL			€900,000.00

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€149,483,744.23
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€6,170.11
IMPREVISTOS	€308.51
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	€185.10
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	€308.51
UTILIDAD	€493.61
PRECIO UNITARIO COLONES	€7,465.84

(a) Región de pago CR.209.01  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.301.01	Sub base granular graduación especial caso 2	m <sup>3</sup>	11550

EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA
MOTONIVELADORA ARTICULADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	244	24	€30,094.76
VAGONETA (9 m <sup>2</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	5	0.0211	h/m <sup>3</sup>	244	24	€19,188.59
TANQUE DE AGUA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	244	24	€20,906.67
COMPACTADOR	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	244	24	€21,605.61
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	244	24	€8,321.17
						SUB TOTAL
						€43,180,339.45

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>3</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0211	244	24	€4,226.13	€1,031,745
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0211	244	24	€2,578.00	€1,258,757
OPERADORES	2	0.0211	244	24	€4,239.33	€2,069,934
VAGONETEROS	5	0.0211	244	24	€3,158.06	€3,854,960
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0211	244	24	€3,284.67	€801,900
PEÓN	4	0.0211	244	24	€2,578.00	€2,517,514
						SUB TOTAL
						€11,534,810.8

EQUIPO Y HERRAMIENTAS						
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO	
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€220,000.00	€220,000	
SUBABASE GRADUACIÓN ESPECIAL CASO 2	1.200	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	13860	€6,500.00	€90,090,000	
					SUB TOTAL	
					€90,310,000.0	

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€145,025,150.22
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€12,634.43
IMPREVISTOS	€631.72
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	€379.03
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	€631.72
UTILIDAD	€1,010.75
PRECIO UNITARIO COLONES	€15,287.66

(b) Región de pago CR.301.01  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN CR.302.01	DESCRIPCIÓN Base estabilizada con cemento tipo BE-25	UNIDAD m³	CANTIDAD 8100			
<b>EQUIPO</b>						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
MOTONIVELADORA ARTICULADA	1	0.0323	h/m³	26	€30,094.76	€7,863,468.68
RECUPERADORA	1	0.0323	h/m³	26	€50,150.00	€13,103,709.68
EQUIPO DE ACARREO	1	0.0323	h/m³	26	€11,500.00	€3,004,838.71
TANQUE DE AGUA	1	0.0323	h/m³	26	€20,906.67	€5,462,709.68
COMPACTADOR	1	0.0323	h/m³	26	€21,605.61	€5,645,336.81
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0323	h/m³	26	€8,321.17	€2,174,242.06
					SUB TOTAL	€37,254,305.61
<b>MANO DE OBRA</b>						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m³)	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0323	261	26	€4,226.13	€1,104,248
PEÓN (BANDERILERO)	2	0.0323	261	26	€2,578.00	€1,347,213
OPERADORES	3	0.0323	261	26	€4,239.33	€3,323,090
CHOFER VEHICULO PESADO	2	0.0323	261	26	€3,284.67	€1,716,503
PEÓN	6	0.0323	261	26	€4,578.00	€4,041,639
					SUB TOTAL	€11,532,692.9
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO	
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€215,000.00	€215,000	
BASE GRANULAR GRADUACIÓN C	1.200	m³/m³	9720	€7,500.00	€72,900,000	
CEMENTO UG SACO 50kg	2.000	sacos/m³	4050	€6,085.00	€24,644,250	
				SUB TOTAL	€97,759,250.0	
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO				€146,546,248.52		
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO				€18,092.13		
IMPREVISTOS				5%		
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERIA...)				3%		
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA				5%		
UTILIDAD				8%		
PRECIO UNITARIO COLONES				€21,891.48		

(c) Región de pago CR.302.01  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.405.03	Capa de mezcla asfáltica en caliente tipo B preparada en planta	ton	9315

EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO
PAVIMENTADORA	1	0.0286	h/ton	266	27	€33,500.00
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	9	0.0286	h/ton	266	27	€45,962,155.50
COMPACTADOR LLANTA DE HULE	1	0.0286	h/ton	266	27	€14,500.00
COMPACTADOR	1	0.0286	h/ton	266	27	€5,750,178.78
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0286	h/ton	266	27	€8,321.17
						SUB TOTAL
						€66,701,812.27

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/ton)	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0286	266	27	€4,226.13	€1,124,755
PEÓN (BANDERILERO)	2	0.0286	266	27	€2,578.00	€1,372,233
OPERADORES	3	0.0286	266	27	€4,239.33	€3,384,805
VAGONETOS	9	0.0286	266	27	€3,158.06	€7,564,464
PEÓN	6	0.0286	266	27	€2,578.00	€4,116,698
						SUB TOTAL
						€17,562,954.3

EQUIPO Y HERRAMIENTAS						
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO	
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€500,000.00	€500,000	
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO B	1.000	ton/ton	9315	€465,750.000	€465,750,000.0	
					SUB TOTAL	
					€466,250,000.0	

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€550,514,766.60
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€59,082.73
IMPREVISTOS	5%
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	3%
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	5%
UTILIDAD	8%
PRECIO UNITARIO COLONES	€71,490.11

(d) Región de pago CR.405.03  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN CR.413.02	DESCRIPCIÓN Riego de Imprimación	UNIDAD L	CANTIDAD 118800				
<b>EQUIPO</b>							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
TANQUE DE AGUA	1	0.0015	h/l	179	18	¢20,906.67	¢3,748,923.80
BARREDORA AUTOPROPULSADA	1	0.0015	h/l	179	18	¢8,601.33	¢1,542,366.54
DISTRIBUIDOR DE ASFALTO	1	0.0015	h/l	179	18	¢20,050.80	¢3,595,452.23
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0015	h/l	179	18	¢8,321.17	¢1,492,129.05
						<b>SUB TOTAL</b>	<b>¢10,378,871.62</b>
<b>MANO DE OBRA</b>							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/l)	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO	
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0015	179	18	¢4,226.13	¢757.818	
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0015	179	18	¢2,578.00	¢924,559	
OPERADORES	1	0.0015	179	18	¢4,239.33	¢760,185	
CHOFER VEHICULO PESADO	2	0.0015	179	18	¢3,284.67	¢1,177,994	
PEÓN	4	0.0015	179	18	¢2,578.00	¢1,849,118	
					<b>SUB TOTAL</b>	<b>¢5,469,675.0</b>	
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>							
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO		
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	¢216,000.00	¢216,000		
EMULSIÓN ASFÁLTICA	2.000	l/m <sup>2</sup>	118800	¢400.00	¢47,520,000		
				<b>SUB TOTAL</b>	<b>¢47,736,000.0</b>		
<b>SUBTOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>¢63,584,546.65</b>			
<b>SUBTOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>¢535.22</b>			
<b>IMPREVISTOS</b>				<b>5%</b>	<b>¢26.76</b>		
<b>ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERIA...)</b>				<b>3%</b>	<b>¢16.06</b>		
<b>ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA</b>				<b>5%</b>	<b>¢26.76</b>		
<b>UTILIDAD</b>				<b>8%</b>	<b>¢42.82</b>		
<b>PRECIO UNITARIO COLONES</b>					<b>¢647.62</b>		

(e) Región de pago CR.413.02  
Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 23. Memoria de cálculo de costos de inversión inicial pavimento rígido

REGLÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.209.01	Excavación para estructuras	m <sup>3</sup>	13500

EQUIPO							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
CARGADOR RETROEXCAVADOR LLANTAS	2	0.0244	h/m <sup>3</sup>	330	33	€14,737.61	€9,728,986.80
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	6	0.0244	h/m <sup>3</sup>	330	33	€19,188.59	€38,001,853.06
TANQUE DE AGUA	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	330	33	€20,906.67	€6,900,733.50
COMPACTADOR	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	330	33	€21,605.61	€7,131,436.06
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0244	h/m <sup>3</sup>	330	33	€8,321.17	€2,746,597.56
						SUB TOTAL	€64,509,606.97

MANO DE OBRA							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>3</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO	
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0244	330	33	€4,226.13	€1,394,934	
PEÓN (BANDERILERO)	2	0.0244	330	33	€2,578.00	€1,701,858	
OPERADORES	3	0.0244	330	33	€4,239.33	€4,197,873	
VAGONETOS	6	0.0244	330	33	€3,158.06	€6,254,355	
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0244	330	33	€3,284.67	€1,084,181	
PEÓN	4	0.0244	330	33	€2,578.00	€3,403,716	
					SUB TOTAL	€18,036,917.6	

EQUIPO Y HERRAMIENTAS							
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO		
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€400,000.00	€400,000		
BOTADERO	1.000	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1	€500,000.00	€500,000		
				SUB TOTAL	€900,000.0		

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€83,446,524.57
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€6,170.11
IMPREVISTOS	5%
	€308.51
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	3%
	€185.10
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	5%
	€308.51
UTILIDAD	8%
	€493.61
PRECIO UNITARIO COLONES	€7,465.84

(a) Región de pago CR.209.01  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.301.01	Sub base granular graduación especial caso 2	m <sup>3</sup>	8100

EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA
MOTONIVELADORA ARTICULADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€30,094.76
VAGONETA (9 m <sup>3</sup> - 12 m <sup>3</sup> )	5	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€19,188.59
TANQUE DE AGUA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€20,906.67
COMPACTADOR	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€21,605.61
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0211	h/m <sup>3</sup>	171	17	€8,321.17
						SUB TOTAL
						€30,282,315.98

MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>3</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0211	171	17	€4,226.13	€723,561
PEÓN (BANDERILLERO)	2	0.0211	171	17	€2,578.00	€882,765
OPERADORES	2	0.0211	171	17	€4,239.33	€1,451,642
VAGONETARIOS	5	0.0211	171	17	€3,158.06	€2,703,478
CHOFER VEHICULO PESADO	1	0.0211	171	17	€3,284.67	€562,372
PEÓN	4	0.0211	171	17	€2,578.00	€1,765,529
						SUB TOTAL
						€8,089,347.8

EQUIPO Y HERRAMIENTAS						
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO	
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€220,000.00	€220,000	
SUBBASE GRADUACIÓN ESPECIAL CASO 2	1.200	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	9720	€6,500.00	€63,180,000	
					SUB TOTAL	
					€63,400,000.0	

				SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€101,771,663.79
				SUBTOTAL PRECIO UNITARIO	€12,634.43
				IMPREVISTOS	€631.72
			5%		
			ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	3%	€379.03
			ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	5%	€631.72
			UTILIDAD	8%	€1,010.75
				PRECIO UNITARIO COLONES	€15,287.66

(b) Región de pago CR.301.01  
Fuente: Autoría Propia

REGIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
CR.501.01	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo	m <sup>2</sup>	54000

EQUIPO							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO	UNIDAD	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	COSTO/HORA	COSTO
SIERRA DE CORTE	5	0.0323	h/m <sup>2</sup>	1742	174	€5,023.00	€43,748,709.68
VIBRADORES	9	0.0323	h/m <sup>2</sup>	1742	174	€2,800.00	€43,896,774.19
TANQUE DE AGUA	1	0.0323	h/m <sup>2</sup>	1742	174	€20,906.67	€36,418,064.52
EQUIPO DE ACARREO	2	0.0323	h/m <sup>2</sup>	1742	174	€11,500.00	€40,064,516.13
CAMIÓN BRIGADA	1	0.0323	h/m <sup>2</sup>	1742	174	€8,321.17	€14,494,947.10
						SUB TOTAL	€178,623,011.61

MANO DE OBRA							
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h/m <sup>2</sup> )	HORAS	DÍAS DE TRABAJO	SALARIO/HORA	COSTO	
ENCARGADO DE CUADRILLA	1	0.0323	1742	174	€4,226.13	€7,361,652	
PEÓN (BANDERILERO)	2	0.0323	1742	174	€2,578.00	€8,981,419	
OPERADORES	5	0.0323	1742	174	€4,239.33	€36,923,226	
CHOFER VEHICULO PESADO	2	0.0323	1742	174	€3,284.67	€11,443,355	
PEÓN	12	0.0323	1742	174	€2,578.00	€53,888,516	
					SUB TOTAL	€118,598,167.7	

EQUIPO Y HERRAMIENTAS							
DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO		
HERRAMIENTA MENOR, SEÑALIZACIÓN Y EQUIPO DE SEGURIDAD	1.000	global	1	€3,000,000.00	€3,000,000		
SUMINISTRO CONCRETO MR.45 kg/cm <sup>2</sup> . REVENIMIENTO 15cm	1.100	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	9356	€101,675.00	€1,046,342,509		
VARILLA LISA No. 6 GRADO 60	1.100	6m/6m	284	€7,100.00	€2,214,135		
VARILLA LISA No. 3 GRADO 40	1.100	6m/6m	331	€2,150.00	€782,224		
FORMALETA	1.100	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1440	€10,200.00	€16,156,800		
MEMBRANA DE CURADO	1.100	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	54000	€650.00	€38,610,000		
SELLO DE POLIURETANO PARA JUNTAS	1.100	ml/ml	24429	€1,286.00	€1,286,657		
				SUB TOTAL	€1,141,662,324.6		

SUBTOTAL PRECIO UNITARIO		€1,438,883,504.00
SUBTOTAL PRECIO UNITARIO		€26,645.99
IMPREVISTOS		€1,332.30
ADMINISTRACIÓN (INSUMOS, OFICINA, PAPELERÍA...)	5%	€795.38
ADMINISTRACIÓN MANO DE OBRA	3%	€1,332.30
UTILIDAD	5%	€1,332.30
	8%	€2,131.68
PRECIO UNITARIO COLONES		€32,241.65

(c) Región de pago CR.501.01  
Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 24. Flujo de efectivo neto para cada estrategia de pavimentación

Periodo	Pavimento Flexible		Pavimento Semirígido		Pavimento Rígido	
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
0	₡ 1,490,574,645.75	₡ 1,490,574,645.75	₡ 1,342,089,980.33	₡ 1,342,089,980.33	₡ 2,063,951,274.89	₡ 2,063,951,274.89
1						
2						
3		₡ 1,760,843.04		₡ 1,217,249.45		
4	₡ 2,401,149.60	₡ 7,647,414.83	₡ 1,680,804.72	₡ 7,647,414.83	₡ 1,042,391.03	
5	₡ 97,808,986.30		₡ 66,687,945.21			
6					₡ 14,213,264.00	
7	₡ 3,601,724.40		₡ 2,667,944.00			
8		₡ 114,661,548.00		₡ 114,661,548.00		₡ 21,929,035.89
9						₡ 15,989,922.00
10	₡ 114,661,548.00		₡ 114,661,548.00			₡ 3,390,749.10
11		₡ 21,447,110.36		₡ 21,447,110.36	₡ 2,928,622.41	
12		₡ 3,601,724.40		₡ 2,521,207.08		
13	₡ 5,869,476.80	₡ 146,713,479.45	₡ 4,868,997.80	₡ 113,369,506.85	₡ 3,638,227.20	₡ 16,372,022.40
14	₡ 10,958,432.19		₡ 10,958,432.19			
15					₡ 104,822,822.00	
16						₡ 115,127,438.40
17					₡ 18,797,507.20	
18						₡ 5,684,730.00
19						
20						
<b>VPN</b>	₡ 1,725,875,963.04	₡ 1,786,406,765.83	₡ 1,543,615,652.25	₡ 1,602,954,016.91	₡ 2,209,394,108.73	₡ 2,242,445,172.67

Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 25. Evaluación técnica de variables como alternativa de selección

<b>Condiciones de Mantenimiento</b>	
<b>Deformabilidad</b>	Sin duda es el pavimento rígido, la tipología que presenta una mayor resistencia a la deformabilidad (producto de su gran valor de rigidez). Así que en comparación con el flexible, este primero presenta menos problemas por deformación (cambios volumétricos de subrasante, paso de vehículos de transporte especial). Mientras que el semirígido es una alternativa intermedia.
<b>Resistencia térmica</b>	El pavimento con superficie de concreto hidráulico es menos susceptible a cambios por temperatura que los pavimentos con superficies de mezcla asfáltica. Esto puede ir de la mano con los posibles efectos de deformación, fatiga ó el proceso de elección de un ligante.
<b>Desvío de tráfico en intervenciones de mantenimiento</b>	Basados en Castro (2019), pese a las grandes ventajas que posee el pavimento rígido en términos de resistencia; en caso de producirse un daño su reparación se torna bastante difícil, por lo que se tiende a interrumpir el tránsito (ya que el concreto hidráulico necesita un tiempo de fraguado y no se debe posar sobre él). Lo que no sucede en las carpetas de concreto asfáltico, por lo que el flexible y rígido se tornan favorables en este sentido.
<b>Condiciones de Comfort y seguridad</b>	
<b>Comfort en la conducción</b>	El pavimento flexible, es capaz de absorber mejor las vibraciones producto de su elasticidad dada por la mezcla, siendo mejor para la conducción. Mientras que en el caso del rígido el paso por las juntas transversales tiende a ser percibido por los conductores.
<b>Iluminación</b>	Por su color típico y claro, el pavimento de concreto hidráulico requiere una menor iluminación; pudiendo incurrir en ahorros al no colocar captaluces en zonas con suficiente iluminación. Mientras que el semi-rígido y flexible comparten características oscuras.
<b>Visibilidad</b>	Una contraparte del color claro del pavimento de concreto hidráulico, es que logra reflejar la luz del día hacia el conductor, aún más, cuando son días soleados ó ha llovido anteriormente (mayor reflexión), ya que el pavimento rígido no logra evacuar el agua tan efectiva y rápidamente de la superficie como lo logran los otros tipos. Por otra parte no hay diferencia entre el rígido y semi-rígido
<b>Condiciones ambientales</b>	
<b>Huella de Carbono</b>	Es un término muy dependiente de la dimensión de la estructura, materiales utilizados y tiempo de construcción. Ya que los procesos de extracción de la materia prima (asfalto (derivado del petróleo), agregados (de fuentes naturales), cemento (explotación de caliza para obtener clínker)) tienden a ser invasivos. Además, las emisiones generadas por los equipos durante la fase constructiva, hace de este proceso un agente emisor de CO2.
<b>Reciclaje de materiales</b>	Comúnmente uno de los materiales más reciclados en el mundo es la mezcla asfáltica. Esto con el fin de ser reincorporada a la mezcla como agregado ó recuperar parte de su ligante y utilizarlo. De aquí la ventaja de los pavimentos con capas de mezcla asfáltica, los cuales son perfilados y aprovechados nuevamente.

Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 26. Preparación de muestras previo a ensayos de laboratorio

Las fotografías tomadas permiten mostrar parte de la secuencia seguida para la preparación de las muestras previo a ensayos de límites y granulometría.



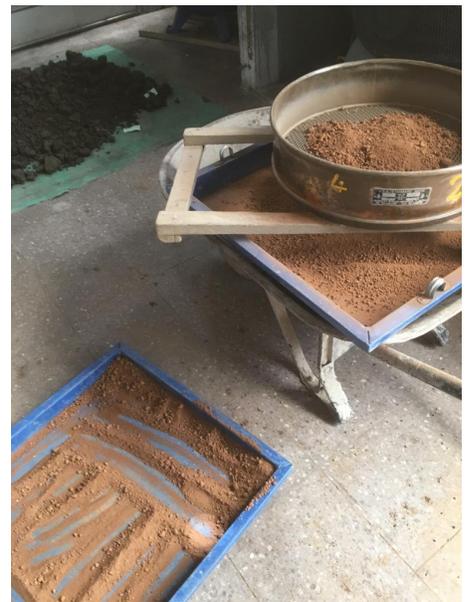
(a) Recolección muestra estación 2+000  
Fuente: Autoría Propia



(b) Secado al aire preliminar de muestras  
Fuente: Autoría Propia



(c) Material durante secado al aire  
Fuente: Autoría Propia



(d) Separación preliminar por malla No.4  
Fuente: Autoría Propia

## Apéndice 27. Ensayos de límites y granulometrías

Las fotografías tomadas permiten mostrar parte de los de ensayos de límites y granulometría, practicados a 5 muestras.



(a) Saturación previo lavado  
Fuente: Autoría Propia



(b) Ensayo límite líquido  
Fuente: Autoría Propia



(c) Ensayo límite plástico  
Fuente: Autoría Propia



(d) Secuencia tamices (Granulometría)  
Fuente: Autoría Propia

**Apéndice 28.** Resultados de ensayos de laboratorio (Valor agregado para herramienta)

Como lo es indicado en los resultados, y como valor agregado para el proyecto y para la pequeña base de datos, se extraen muestras alteradas de subrasante aproximadamente a 50 cm en cada uno de los puntos de DCP, con el fin de obtener la clasificación AASHTO. En este caso solo se ensayan 5 (al azar) por cuestiones de tiempo y lo relacionado a la emergencia nacional. Así que se detallan los resultados obtenidos para el ensayo de límite líquido, plástico, lavado y granulometría vía seca.

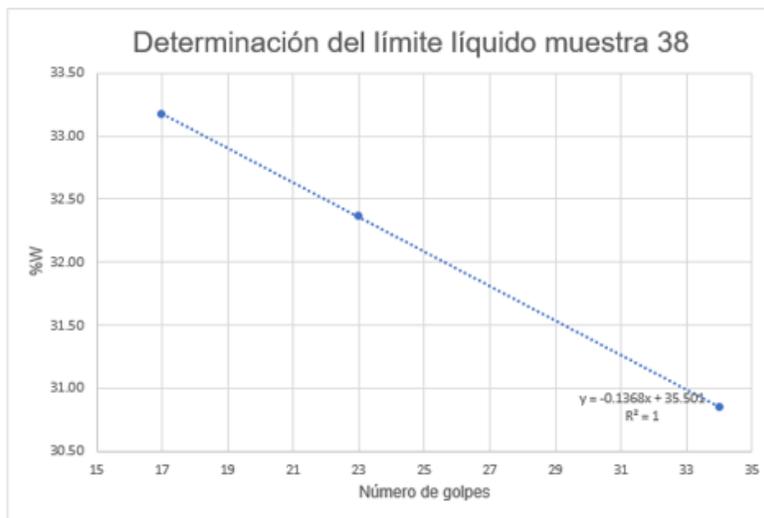
Punto	Est Proyecto	Código(MOPT) IMSBE-20-	# Muestra campo	Descripción
1	0+110	38	1 y 2	Se elige para ensayos para clasificación AASHTO
2	0+500	39	3 y 4	Muestras no ensayadas
3	1+000	40	5 y 6	Muestras no ensayadas
4	1+500	NR	NR	No se caracteriza el punto, rebote en DCP
5	2+000	41	7 y 8	Se tienen estudios previos de caracterización y CBR (anexo 5 (b))
6	2+500	42	9 y 10	Muestras no ensayadas
7	3+000	43	11 y 12	Muestras no ensayadas
8	3+500	44	13 y 14	Se tienen estudios previos de caracterización y CBR (anexo 5 (d))
9	4+000	45	15 y 16	Se elige para ensayos para clasificación AASHTO
10	4+500	46	17 y 18	Muestras no ensayadas
11	5+000	47	19 y 20	Se elige para ensayos para clasificación AASHTO
12	5+500	48	21 y 22	Muestras no ensayadas
13	6+000	49	23 y 24	Muestras no ensayadas
14	6+500	50	25 y 26	Se elige para ensayos para clasificación AASHTO
15	7+000	51	27 y 28	Se tienen estudios previos de caracterización y CBR (anexo 5 (c))
16	7+500	52	29 y 30	Muestras no ensayadas
17	8+000	53	31 y 32	Se elige para ensayos para clasificación AASHTO
18	8+500	NR	NR	Cerca de quebrada, no se extrae material ni se hace DCP
19	9+000	54	33 y 34	Muestras no ensayadas

(a) Detalle de muestras seleccionadas y su respectivo código

Fuente: Autoría Propia

Determinación del límite líquido y límite plástico muestra IMSB-20-38					
Item	Límite Líquido			Límite Plástico	
Cápsula	5	8	11	35	35
Pcont (g)	15.69	15.49	15.50	15.53	15.53
Pcont + Phum (g)	23.41	25.51	23.65	23.25	20.73
Pcont + Pseco (g)	21.59	23.06	21.62	21.61	19.63
Pseco (g)	5.90	7.57	6.12	6.08	4.10
Pagua (g)	1.82	2.45	2.03	1.64	1.10
Número de Golpes	34	23	17	-	-
%W	30.85	32.36	33.17	26.97	26.83

LL	32.08
LP	26.90
IP	5



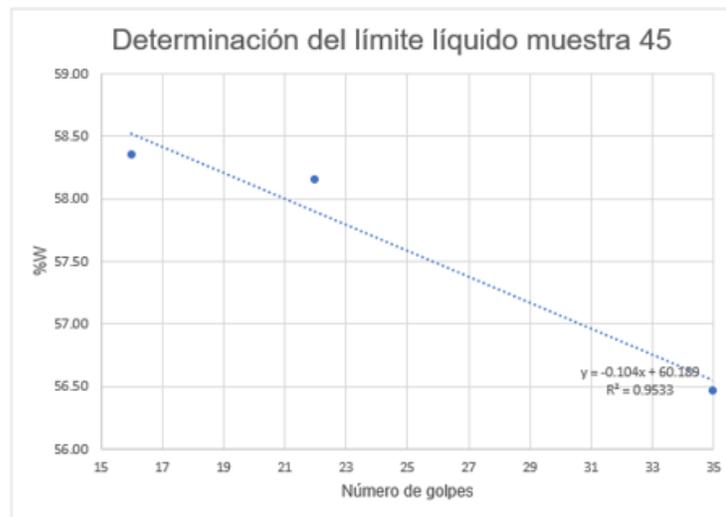
Granulometría muestra IMSB-20-38					
Masa inicial (g)	500.00				
Masa seca (g)	500.00	Masa seca lavada (g)	196.80		
Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando
4	4.750	0.00	0.00%	0.00%	100%
10	2.000	7.82	1.56%	1.56%	98%
40	0.425	51.83	10.37%	11.93%	88%
200	0.075	134.98	27.00%	38.93%	61%
CH	0	0.76	0.15%	39.08%	

**(b) Resultados muestra 38, estación 0+110**  
Fuente: Autoría Propia

Determinación del límite líquido y límite plástico muestra IMSB-20-45					
Item	Límite Líquido			Límite Plástico	
Cápsula	37	4	28	29	14
Pcont (g)	15.60	15.58	15.63	15.55	15.50
Pcont + Phum (g)	22.25	22.95	22.36	20.47	20.58
Pcont + Pseco1 (g)	19.85	20.24	19.88	19.15	19.05
Pseco 1 (g)	4.25	4.66	4.25	3.60	3.55
Pagua (g)	2.40	2.71	2.48	1.32	1.53
Número de Golpes	35	22	16	-	-
%W	56.47	58.15	58.35	36.67	43.10

LL	57.59
LP	39.88
IP	18

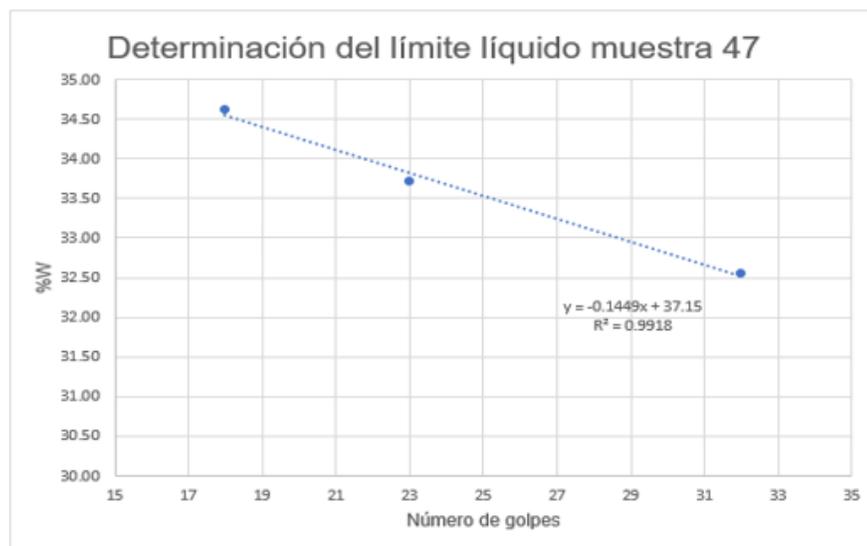


Granulometría muestra IMSB-20-45					
Masa inicial (g)	500.00				
Masa seca (g)	500.00	Masa seca lavada (g)	57.20		
Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando
4	4.750	0.00	0.00%	0.00%	100%
10	2.000	2.00	0.40%	0.40%	100%
40	0.425	26.60	5.32%	5.72%	94%
200	0.075	27.90	5.58%	11.30%	89%
CH	0	0.10	0.02%	11.32%	

(c) Resultados muestra 45, estación 4+000  
Fuente: Autoría Propia

Determinación del límite líquido y límite plástico muestra IMSB-20-47					
Item	Límite Líquido			Límite Plástico	
Cápsula	13	17	25	26	34
Pcont (g)	15.56	15.70	15.57	15.59	15.55
Pcont + Phum (g)	24.03	25.14	25.41	19.24	21.38
Pcont + Pseco1 (g)	21.95	22.76	22.88	18.58	20.23
Pseco 1 (g)	6.39	7.06	7.31	2.99	4.68
Pagua (g)	2.08	2.38	2.53	0.66	1.15
Número de Golpes	32	23	18	-	-
%W	32.55	33.71	34.61	22.07	24.57

LL	33.53
LP	23.32
IP	10



Granulometría muestra IMSB-20-47					
Masa inicial (g)	500.00				
Masa seca (g)	500.00	Masa seca lavada (g)	330.40		
Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando
4	4.750	0.00	0.00%	0.00%	100%
10	2.000	54.20	10.84%	10.84%	89%
40	0.425	150.70	30.14%	40.98%	59%
200	0.075	123.00	24.60%	65.58%	34%
CH	0	0.60	0.12%	65.70%	

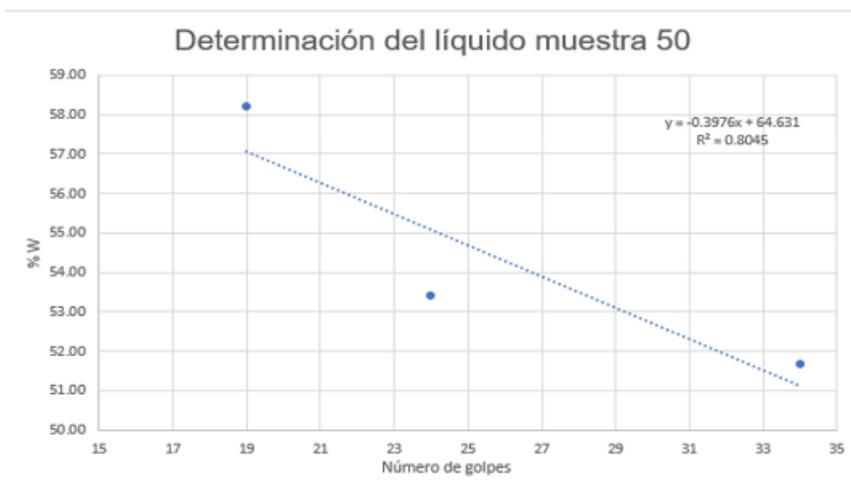
(d) Resultados muestra 47, estación 5+000

Fuente: Autoría Propia

Determinación del límite líquido y límite plástico muestra IMSB-20-50					
Ítem	Límite Líquido			Límite Plástico	
Cápsula	16	27	33	12	30
Pcont (g)	15.81	15.52	15.56	15.52	15.51
Pcont + Phum (g)	23.50	22.76	27.03	22.14	23.04
Pcont + Pseco1 (g)	20.88	20.24	22.81	20.17	20.74
Pseco 1 (g)	5.07	4.72	7.25	4.65	5.23
Pagua (g)	2.62	2.52	4.22	1.97	2.30
Número de Golpes	34	24	19	-	-
%W	51.68	53.39	58.21	42.37	43.98

LL	54.69
LP	43.17
IP	12



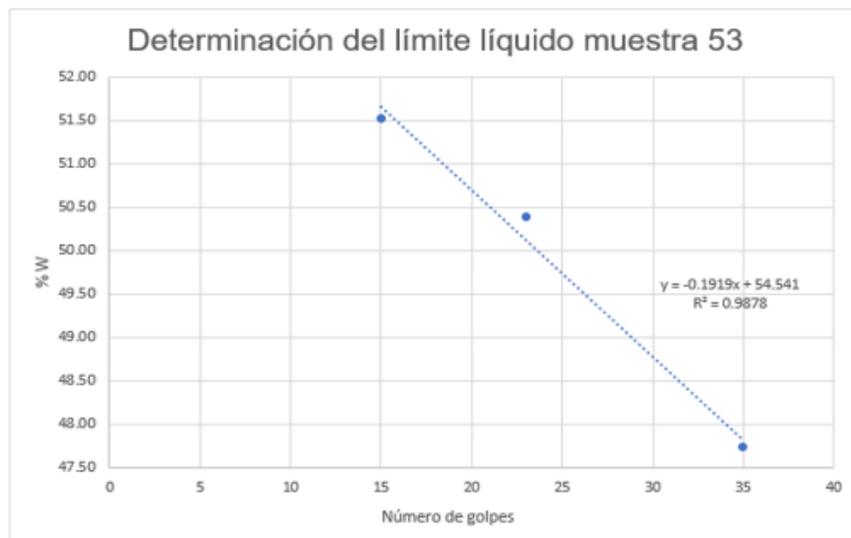
Granulometría muestra IMSB-20-50					
Masa inicial (g)	500.00				
Masa seca (g)	500.00	Masa seca lavada (g)	80.00		
Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando
4	4.750	0.00	0.00%	0.00%	100%
10	2.000	19.60	3.92%	3.92%	96%
40	0.425	32.70	6.54%	10.46%	90%
200	0.075	27.70	5.54%	16.00%	84%
CH	0	0.00	0.00%	16.00%	

(e) Resultados muestra 50, estación 6+500

Fuente: Autoría Propia

Determinación del límite líquido y límite plástico muestra IMSB-20-53					
Item	Límite Líquido			Límite Plástico	
Cápsula	7	18	20	2	15
Pcont (g)	15.66	15.36	15.38	15.50	15.57
Pcont + Phum (g)	22.81	23.39	20.88	21.32	20.58
Pcont + Pseco1 (g)	20.50	20.70	19.01	19.66	19.13
Pseco 1 (g)	4.84	5.34	3.63	4.16	3.56
Pagua (g)	2.31	2.69	1.87	1.66	1.45
Número de Golpes	35	23	15	-	-
%W	47.73	50.37	51.52	39.90	40.73

LL	49.74
LP	40.32
IP	9



Granulometría muestra IMSB-20-53					
Masa inicial (g)	500.00				
Masa seca (g)	500.00	Masa seca lavada (g)	170.00		
Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando
4	4.750	0.00	0.00%	0.00%	100%
10	2.000	2.00	0.40%	0.40%	100%
40	0.425	114.30	22.86%	23.26%	77%
200	0.075	52.80	10.56%	33.82%	66%
CH	0	0.10	0.02%	33.84%	

**(f) Resultados muestra 53, estación 8+000**  
Fuente: Autoría Propia

De lo anterior se puede establecer la clasificación AASHTO del material. Además, de la relación con el anexo 5 se tiene la siguiente tabla que sintetiza los tipos de suelos presentes:

Muestra	%Pasando 200	%Pasando 40	%Pasando 10	Límite Líquido	Índice Plasticidad	Índice Grupo	Clasificación
IMSB-20-38	61%	88%	98%	32.08	5	2	A-4 (2)
IMSB-20-45	89%	94%	100%	57.59	18	21	A-7-5 (21)
IMSB-20-47	34%	59%	89%	33.53	10	0	A-2-4 (0)
IMSB-20-50	84%	90%	96%	54.69	12	14	A-7- 5 (14)
IMSB-20-53	66%	77%	100%	49.74	9	7	A-5 (7)

Punto	Est Proyecto	Código(MOPT) IMSB-20-	Clasificación AASHTO
1	0+110	38	A-4 (2)
2	0+500	39	-
3	1+000	40	-
4	1+500	NR	-
5	2+000	41	A-6 (6)
6	2+500	42	-
7	3+000	43	-
8	3+500	44	A-4 (2)
9	4+000	45	A-7-5 (21)
10	4+500	46	-
11	5+000	47	A-2-4 (0)
12	5+500	48	-
13	6+000	49	-
14	6+500	50	A-7- 5 (14)
15	7+000	51	-
16	7+500	52	A-7-5 (12)
17	8+000	53	A-5 (7)
18	8+500	NR	-
19	9+000	54	-

(g) Clasificación AASHTO en función de estacionamiento y número de muestra  
Fuente: Autoría Propia

**Apéndice 29.** Ilustración de estructura en sitio (Infraworks Autodesk)



**(a)** Cuesta de Nuevo-Colón, estación 4+500.  
Fuente: Autoría Propia, 2020.



**(b)** Estructura sobre estación 2+500.  
Fuente: Autoría Propia, 2020.

# Anexos

1.	Trabajos aplicados a la ruta según Documento Requerimientos de CONAVI (Licitación 2018LA-000011-0006000001) . . . . .	184
2.	Caracterización de material de subbase (Tajo los Maraños) utilizado en la Ruta 911, por trabajos de conservación (CONAVI) . . . . .	185
3.	Caracterización de material de base (Tajo Zapotal), fuente de materiales sobre Ruta Nacional 911 . . . . .	189
4.	Tránsito Promedio Diario Anual de Anuarios MOPT . . . . .	191
5.	Caracterización de laboratorio, subrasante Ruta Nacional 911 . . . . .	192
6.	Datos climáticos Estación Automática Aer. Liberia Oeste 07 (Instituto Meteorológico Nacional) . . . . .	196
7.	Costos de Conservación Licitación 2014LN-000017-0CV00 (zona 2-3)(CONAVI)	197
8.	Costos de Conservación Licitación 2014LN-000018-0CV00 (zona 2-3)(CONAVI)	198
9.	Costos de Conservación Licitación 2014LN-000018-0CV00 (zona 2-1)(CONAVI)	199
10.	Resumen de costos de conservación (Resumen anexos: 7, 8 y 9) . . . . .	199

**Anexo 1.** Trabajos aplicados a la ruta según Documento Requerimientos de CONAVI (Licitación 2018LA-000011-0006000001)

<b>Sumario de cantidades</b> Licitación Abreviada, proyecto: "Trabajos para la atención de la Ruta Nacional No. 911 (en lastre), secciones de control Nos.: 51170 y 50443 (Potrero (Entrada Principal)-Nuevo Colón (Escuela)), Zona 2-3"					
Renglón de pago	Descripción CR-2010	Unidad	Cantidad Total	Precio unitario	Precio Total
CR.110.06	Trabajo a costo más porcentaje	Global	1,00	19.500.000,00	
CR.204.03	Excavación en la vía	m3	300,00		
CR.204.08	Excavación de material de préstamo selecto (caso 2)	m3	2.000,00		
CR.209.01	Excavación estructural	m3	500,00		
CR.209.03	Relleno para fundación	m3	150,00		
CR.209.04	Relleno para estructuras	m3	350,00		
CR.301.01	Subbase granular, graduación especial (caso 2)	m3	12.000,00		
CR.413.03	Material de secado	m3	210,00		
CR.552.01	Concreto hidráulico estructural clase A (25MPa)	m3	100,00		
CV.102.01	Manejo de vegetación menor	m2	20.000,00		
CV.103.01	Descuaje de árboles por hora	h	400,00		
CV.106.07	Concreto ciclópeo	M3	15,00		
CV.108.01	Remoción de derrumbes	M3	300,00		
CV.206.01	Limpieza del sistema de alcantarilla en sitio	u	25,00		
CV.212.01	Reposición, sustitución, extensión o complementación de tubería de alcantarillas de concreto con diámetro 760mm (tubería de concreto C-76, Clase III con refuerzo)	m	60,00		
CV.212.01	Reposición, sustitución, extensión o complementación de tubería de alcantarillas de concreto con diámetro 910mm (tubería de concreto C-76, Clase III con refuerzo)	m	40,00		
CV.212.01	Reposición, sustitución, extensión o complementación de tubería de alcantarillas de concreto con diámetro 1030mm (tubería de concreto C-76, Clase III con refuerzo)	m	20,00		
CV.502.01	Reconformación de la Ruta de lastre (calzada, cunetas y espaldones)	m2	116.400,00		
CV.505.04	Suministro y mezclado de cemento portland en 15 cm de espesor	ton	473,00		
CV.505.05	Sello de cura de emulsión asfáltica	lt	51.000,00		

**Anexo 2.** Caracterización de material de subbase (Tajo los Maraños) utilizado en la Ruta 911, por trabajos de conservación (CONAVI)

Buenos Aires, Puntarenas, Costa Rica, 20 de Mayo de 2019.

**PROYECTO:** "Ruta 911 Potrero-Cuesta Nuevo Colón-Nuevo colón.

**INFORMACION DEL CLIENTE**

Cliente: [REDACTED]

Dirección del Cliente: [REDACTED]

Dirigido a: [REDACTED]

**INFORMACION DE LA MUESTRA**

Fecha de recepción de la muestra: 2019-05-11

Descripción de la muestra: Material de sub base. (3 sacos)

**MUESTREO (S):**

Cliente aporta la muestra: Sí ( ) No (x).

Personal del laboratorio realiza el muestreo: Sí (x) RC-LE-01 Consecutivo: 09-2019

Fecha de realización del muestreo: 2019-05-10

Lugar de muestreo: Tajo Maraño, Ruta 911- Potrero-Cuesta Nuevo Colón.

Fuente del material: Tajo Maraño.

Condiciones ambientales durante el muestreo: Soleado.

**ENSAYO**

El laboratorio realizó los ensayos de acuerdo con los procedimientos y registros que forman parte del sistema de gestión de calidad.

**INFORMACION EJECUCION DE LOS ENSAYOS**

Fecha de inicio: 2019-05-11

Fecha de Finalización: 2019-05-20

Lugar de ejecución de los ensayos: Laboratorio Central, ubicado en Buenos Aires, Puntarenas.



a) Número de muestra: 01-435-19

Resultado de Contenido de Humedad.			
Descripción de ensayo	Resultado en (%)	Especificación	Cumplimiento
Humedad	3.9	NA	NA

2. LE-I04: \* Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. INTE-C68.

b) Número de muestra: 01-435-19

Resultado de Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción de Agregado Grueso.			
Descripción del ensayo	Resultado (adimensional)	Especificación	Cumplimiento
GBS	2,53	NA	NA

3. LE-I06: \* Método de ensayo para análisis granulométrico en mallas para agregado fino y grueso INTE-C46.

c) Número de muestra: 01-435-19

Resultados: Análisis Granulométrico por tamizado					
Tamiz en (mm)	Tamiz en (in)	(% Pasando)	Especificación.		Cumplimiento
			Límite inferior	Límite superior	
37,5	1 1/2	100	100	100	SI
25,0	1	86	75	95	SI
19,0	3/4	79	NA	NA	NA
4,75	# 4	45	30	60	SI
0,425	# 40	15	10	35	SI
0,075	# 200	8,7	2	15	SI

\* Método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa por el tamiz N° 200 (75 µm) en agregados minerales. INTE-C49.

Resultado de pérdida de material lavado por tamiz # 200			
Especificación de 2 (%) a 15 (%)			
Tamiz en (mm)	# Tamiz	(%) pérdida)	Cumplimiento
0,075	200	8,7	SI

4. LE-I12: \*Método de ensayo para la determinación de Límite Líquido, límite Plástico e Índice de Plasticidad. AASHTO T 89 Y AASTHO T 90.

d) Número de muestra: 01-435-19

Resultado de Ensayo de Límites de Atterberg.			
Descripción de ensayo	Resultado (%)	Especificación	Cumplimiento
Límite Líquido	30	≤ 35	Si
Límite plástico	27	NA	NA
Índice de Plasticidad	3	≤ 4	Si

5. LE-I13: \*Método de Ensayo para la capacidad de soporte de california (CBR) de suelos compactados en laboratorio, método estándar. AASHTO T 193.

e) Número de muestra: 01-435-19

Resultados de Índice de Ensayo de Soporte de california. (CBR), Esfuerzo Modificado.					
(%) Compactación	91	95	98	Especificación	Cumple
CBR 2,54 mm (%)	47,0	72,0	94,0	≥ 30 (%)	Si
CBR 5,08 mm (%)	51,0	80,0	103,0		

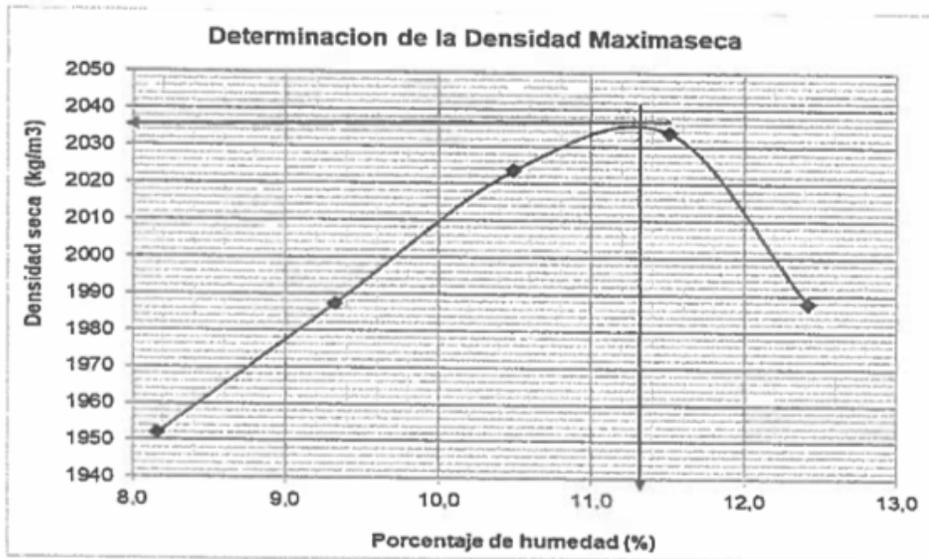
Compactación y Expansión			
Golpes	56	30	10
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	2034	1965	1806
Porcentaje de humedad (%)	11,2	11,2	11,3
Porcentaje de compactación (%)	99,9	96,5	88,7
Porcentaje de expansión (%)	0,063		

6. LE-I14: \*Método de Ensayo para la Relación Densidad-Humedad de Agregados y Suelos, método estándar. AASHTO T 99.

f) Número de muestra: 01-435-19

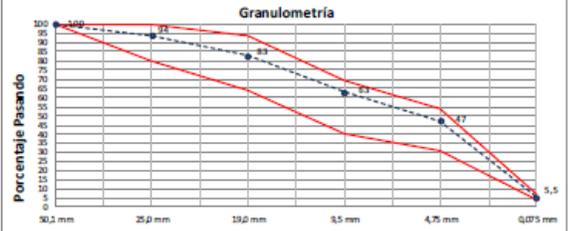
Resultado de Ensayo Relación Densidad-Humedad, Esfuerzo Modificado, Método D	
Resultados Corregidos	
Descripción	Resultado
Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )	2036
Contenido óptimo de humedad (%)	11,3

Grafica de ensayo Relación Densidad-Humedad.





Tipo de material analizado: Base

Aceptación de Material Granular	No. Muestra	Código de ensayo	Valor Obtenido		Especificaciones	
			Malla	% Pasando	Base "C" Según CR-2010	
	LB-377-20	Análisis Granulométrico (AG-02)	50,1 mm	2"	100	100
			25,0 mm	1"	94	80 a 100
			19,0 mm	3/4"	83	64 a 94
			9,5 mm	3/8"	63	40 a 69
			4,75 mm	Nº 4	47	31 a 54
			0,075 mm	Nº 200	5,5	4 a 7
						
	Proctor Modificado AASHTO T 180 (SU-04)	$\gamma_{max} =$	2122	kg/m <sup>3</sup>	N.A.	
	% Óptimo Humedad =	6,6	%			
Límite Líquido (SU-01)	N.P			Máximo 35		
Índice Plástico (SU-01)	N.P			Entre 4 y 9		
CBR (SU-06)	Al 95 %			Mínimo 80		
	2,54 mm	81,0				
	5,08 mm	80,0				

## Anexo 4. Tránsito Promedio Diario Anual de Anuarios MOPT



SECRETARÍA DE PLANIFICACIÓN SECTORIAL  
Planificación Estratégica Multimodal de Infraestructura y Servicios de Transporte

24/06/2020 - 11:38 am

### Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA) de una Estación de Conteo

**Estación:** 0      **Ruta:** 911      **Sección:** 51170  
**Tramo:** POTRERO(ENTRADA PRINCIPAL)-CUESTA NUEVO COLON (LIMITE CANTONAL)  
**Ubicación:** 500 M ANTES DE PLAYA POTRERO  
**Comentario:**

Año	TPDA	Liviano	Carga Liv.	Bus	C. 2 ejes	C. 3 ejes	C. 4 ejes	C. 5/6 ejes
2019	1426	56.78	30.8	2.53	4.14	5.75	0	0

**Nomenclatura:**

**Liviano:** Liviano (automóvil, 4x4 y microbuses familiares)  
**Carga Liv.:** Carga Liviana (pick up y camión pequeños de 2 ejes con eje trasero sencillo)  
**C. 2, 3, 4 ejes:** Camión No Articulado (de carga, vagoneta y trailer sin carreta)  
**C. 5/6 ejes:** Camión Articulado (trailer con carreta, equipo especial y vehículo de 6 o más ejes)

## Anexo 5. Caracterización de laboratorio, subrasante Ruta Nacional 911

Como parte de la información preliminar enunciada en la metodología, se cuentan con tres muestras de subrasante analizadas en el Laboratorio de Materiales del MOPT. Las tres cuentan con ensayos de granulometría, límites y CBR. Pero para ser utilizadas en el proyecto se deben identificar a qué sección o estacionamiento pertenecen; ya que ante lo indicado por el MOPT el proyecto es recorrido en sentido Nuevo Colón-Playa Potrero, mientras que en el presente estudio se recorrió al sentido contrario. Así que se trabaja con la premisa de que la estación 2+600 (indicada por el MOPT) pertenece a la sección 1 (del presente proyecto y definida en anexo 5); lo mismo para la estación 8+000 (indicada por el MOPT) que pertenecería a la sección 2 (del presente proyecto y definida en anexo 5). Que se comprueba con la siguiente figura, donde la sección 1 (roja) con un módulo de rigidez equivalente de 2978.71psi (CBR=2%) puede ser un suelo tipo A-6; mientras que la sección 2 (verde) con un módulo de rigidez equivalente de 4656.58 (CBR=3.6%), perfectamente puede ser un suelo tipo A-7-6, como lo indica la prueba de laboratorio. La tercera únicamente se evidencia para ser utilizada en la herramienta de georeferencia.

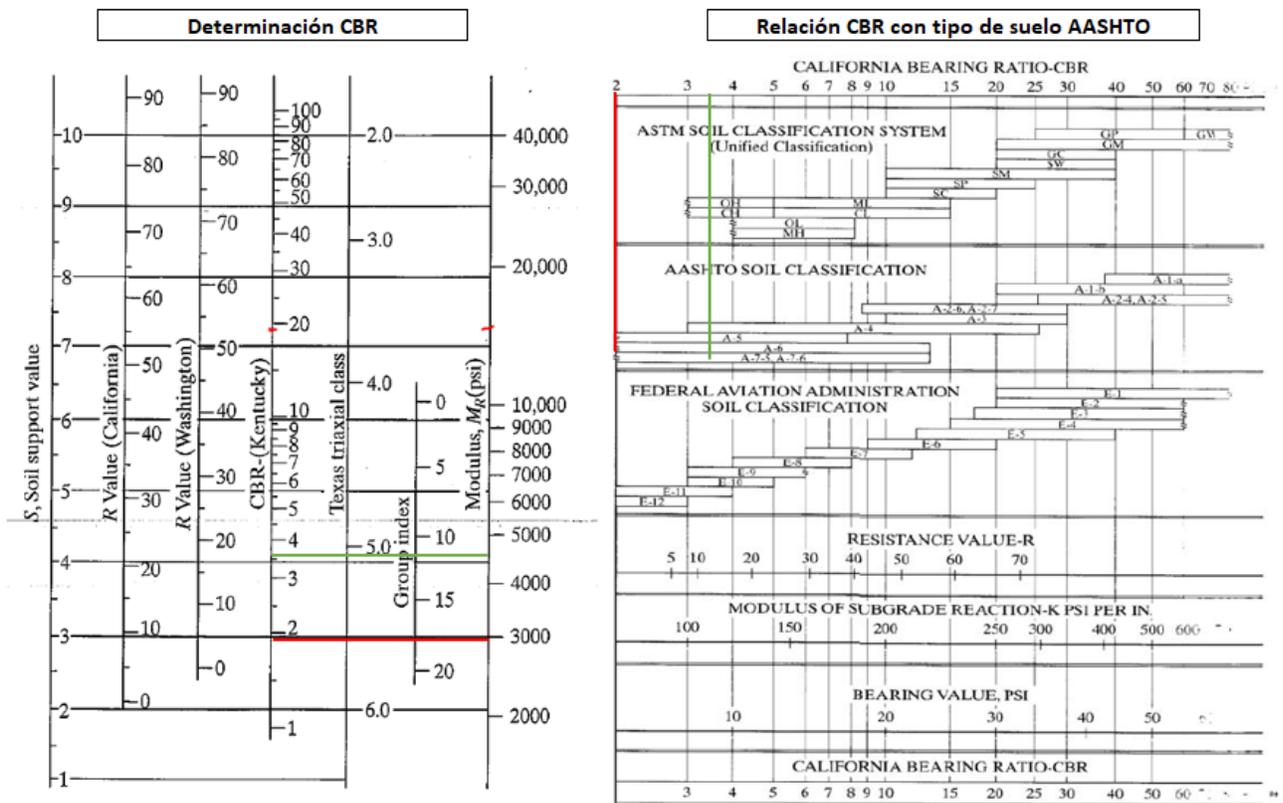


FIGURE 7.36

Approximate relationship between  $k$  values and other soil properties (1 psi = 6.9 kPa; 1 kPa = 271.3 kN/m<sup>2</sup>). (After PCA (1966).)

(a) Comprobación de muestras pertenecientes a sección

Fuente: Huang, 2004

mopt		DIRECCIÓN DE INGENIERÍA SUB-DIRECCIÓN DE GEOTECNIA Y MATERIALES DEPARTAMENTO LABORATORIO DE MATERIALES Costado Oeste del Liceo de Costa Rica Tél. (506) 2-623-2000 Ext. 2279 ó 2481 Fax. (506) 2-623-2143			<input checked="" type="checkbox"/> Original <input type="checkbox"/> Corrección
<b>Reporte de Resultados de Ensayos en Subrasante</b>					
<b>Información General:</b>					
MOPT, Dirección Regional - VI Macro Región Guanacaste					
Proyecto:	Ruta Nacional N° 911 Nuevo Colón - Playa Potrero			Informe Número	MOPT-02-07-RPT-130-2019
Solicitado por:	Ing. Alonso Mora Arroyo			Fecha de Informe	18/9/2019
Oficio:	DVOP-DI-2019-177				
<b>Descripción de la muestra:</b>					
Fuente de Materiales:	No aplica			Muestra Número:	M-SBE-19-152
Ubicación de la Muestra:	Guanacaste			Fecha Muestreo:	13/8/2019
Punto de muestreo:	Estación 8+000 L.I			Hora Muestreo:	9:25 a.m
Responsable del Muestreo:	Ing. Mario Campos Vega			Fecha Recepción:	18/08/2019
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados	
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL					
76,2 mm (3")	T 27	03-09-19	-	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)			-	98	
No. 40 (425 µm)			-	87	
No. 200 (75 µm)			T 11		-
CONSTANTES DEL AGREGADO					
Límite Líquido, %	T 89		-	30	
Límite Plástico, %	T 90	30-08-19	-	16	
Índice de Plasticidad, %	-		-	14	
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	13-09-19	-	A-6 (6)	
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	CL	
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD					
Densidad Máxima (kg/m <sup>3</sup> )	T 199	03-09-19	-	1686	
Humedad Óptima, %	T 199		-	17	
CAPACIDAD DE SOPORTE					
C.B.R., %	al 91%	T 193	13-09-19	-	1
	al 95%	T 193		-	2
FRACCIÓN GRUESA					
Abrasión, %	T 96	-	-	ENS	
Caras Fracturadas, 1 o más caras	ASTM D-5821	-	-	ENS	
Caras Fracturadas, 2 o más caras			-	ENS	
<b>COMENTARIOS:</b>					
Los resultados deberán compararse con las especificaciones del proyecto.					
El valor reportado en el paréntesis en la Clasificación AASHTO, corresponde al índice de grupo.					
Muestra entregada por el Ing. Campos Vega					
ENS = Ensayo No Solicitado					
			<b>MARCIA YANAI DURAN VILLALOBOS (FIRMA)</b> Firmado digitalmente por MARCIA YANAI DURAN VILLALOBOS (FIRMA) Fecha: 2019.09.19 09:44:20 -06'00'		
Pag 1 de 1.					

La reproducción parcial o total de este informe no podrá realizarse sin la aprobación escrita del Departamento de Materiales (Laboratorio). Los resultados incluidos en este informe se refieren únicamente a la muestra ensayada.

(b) Información para sección homogénea 1

mopt		DIRECCIÓN DE INGENIERÍA SUB-DIRECCIÓN DE GEOTECNIA Y MATERIALES DEPARTAMENTO LABORATORIO DE MATERIALES Costado Oeste del Liceo de Costa Rica Tél. (506) 2-523-2000 Ext. 2279 ó 2481 Fax. (506) 2-523-2143			<input checked="" type="checkbox"/> Original <input type="checkbox"/> Corrección
<b>Reporte de Resultados de Ensayos en Subrasante</b>					
<b>Información General:</b>					
MOPT, Dirección Regional - VI Macro Región Guanacaste					
Proyecto:	Ruta Nacional N° 911 Nuevo Colón - Playa Potrero	Informe Número	MOPT-02-07-RPT-132-2019		
Solicitado por:	Ing. Alonso Mora Arroyo	Fecha de Informe	18/9/2019		
Oficio:	DVOP-DI-2019-177				
<b>Descripción de la muestra:</b>					
Fuente de Materiales:	No aplica	Muestra Número:	IM-SBE-19-154		
Ubicación de la Muestra:	Guanacaste	Fecha Muestreo:	13/8/2019		
Punto de muestreo	Estación 2+600 L.I	Hora Muestreo:	10:06 a.m		
Responsable del Muestreo:	Ing. Mario Campos Vega	Fecha Recepción:	18/08/2019		
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados	
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL					
76,2 mm (3")	T 27	03-09-19	-	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)			-	92	
No. 40 (425 µm)			-	79	
No. 200 (75 µm)	T 11	-	-	71	
CONSTANTES DEL AGREGADO					
Límite Líquido, %	T 89	06-09-19	-	49	
Límite Plástico, %	T 90		-	34	
Índice de Plasticidad, %	-		-	15	
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	13-09-19	-	A-7-5 (12)	
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	OL o ML	
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD					
Densidad Máxima (kg/m <sup>3</sup> )	T 199	05-09-19	-	1453	
Humedad Óptima, %	T 199		-	19	
CAPACIDAD DE SOPORTE					
C.B.R., %	al 91%	12-09-19	-	2	
	al 95%		-	2	
FRACCIÓN GRUESA					
Abrasión, %	T 96	-	-	ENS	
Caras Fracturadas, 1 o más caras	ASTM D-5821	-	-	ENS	
Caras Fracturadas, 2 o más caras			-	ENS	
<b>COMENTARIOS:</b>					
Los resultados deberán compararse con las especificaciones del proyecto.					
El valor reportado en el paréntesis en la Clasificación AASHTO, corresponde al índice de grupo.					
Muestra entregada por el Ing. Campos Vega					
ENS = Ensayo No Solicitado					
			<b>MARCIA YANAI DURAN VILLALOBOS (FIRMA)</b> Firmado digitalmente por MARCIA YANAI DURAN VILLALOBOS (FIRMA) Fecha: 2019.09.19 09:46:12 -06'00'		
Pag 1 de 1.					

La reproducción parcial o total de este informe no podrá realizarse sin la aprobación escrita del Departamento de Materiales (Laboratorio). Los resultados incluidos en este informe se refieren únicamente a la muestra ensayada.

(c) Información para sección homogénea 2

DIRECCIÓN DE INGENIERÍA SUB-DIRECCIÓN DE GEOTECNIA Y MATERIALES DEPARTAMENTO LABORATORIO DE MATERIALES Costado Oeste del Liceo de Costa Rica Tél. (506) 2-523-2000 Ext. 2279 ó 2481 Fax. (506) 2-523-2143				
				<input checked="" type="checkbox"/> Original <input type="checkbox"/> Corrección
Reporte de Resultados de Ensayos en Subrasante				
<b>Información General:</b> MOPT, Dirección Regional - VI Macro Región Guanacaste				
Proyecto:	Ruta Nacional N° 911 Nuevo Colón - Playa Potrero	Informe Número	MOPT-02-07-RPT-128-2019	
Solicitado por:	Ing. Alonso Mora Arroyo	Fecha de Informe	18/9/2019	
Oficio:	DVOP-DI-2019-177			
<b>Descripción de la muestra:</b>				
Fuente de Materiales:	No aplica	Muestra Número:	M-SBE-19-150	
Ubicación de la Muestra:	Guanacaste	Fecha Muestreo:	13/8/2019	
Punto de muestreo	Estación 6+100 L.D	Hora Muestreo:	9:05 a.m	
Responsable del Muestreo:	Ing. Mario Campos Vega	Fecha Recepción:	18/08/2019	
Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados
GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL				
76,2 mm (3")	T 27	03-09-19	-	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)			-	96
No. 40 (425 µm)			-	82
No. 200 (75 µm)	T 11	-	-	55
CONSTANTES DEL AGREGADO				
Límite Líquido, %	T 89	29-08-19	-	27
Límite Plástico, %	T 90		-	19
Índice de Plasticidad, %	-		-	8
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	13-09-19	-	A-4 (2)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	CL
RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD				
Densidad Máxima (kg/m <sup>3</sup> )	T 199	05-09-19	-	1563
Humedad Óptima, %	T 199		-	20
CAPACIDAD DE SOPORTE				
C.B.R., %	al 91%	09-09-19	-	1
	al 95%		-	
FRACCIÓN GRUESA				
Abrasión, %	T 96	-	-	ENS
Caras Fracturadas, 1 o más caras	ASTM D-5821	-	-	ENS
Caras Fracturadas, 2 o más caras			-	ENS
<b>COMENTARIOS:</b> Los resultados deberán compararse con las especificaciones del proyecto. El valor reportado en el paréntesis en la Clasificación AASHTO, corresponde al índice de grupo. Muestra entregada por el Ing. Campos Vega ENS = Ensayo No Solicitado				
		<b>MARCIA YANAI DURAN VILLALOBOS (FIRMA)</b> Firmado digitalmente por MARCIA YANAI DURAN VILLALOBOS (FIRMA) Fecha: 2019.09.19 09:42:22 -06'00'		

Pag 1 de 1.

La reproducción parcial o total de este informe no podrá realizarse sin la aprobación escrita del Departamento de Materiales (Laboratorio). Los resultados incluidos en este informe se refieren únicamente a la muestra ensayada.

### (d) Información complementaria

**Anexo 6.** Datos climáticos Estación Automática Aer. Liberia Oeste 07 (Instituto Meteorológico Nacional)

**Aer. Liberia Oeste 07**

Ubicación: Liberia

Lat: 10° 35' 59" Norte Lon: 85° 31' 59" Oeste Altitud: 70 m.s.n.m.

Tipo: Automatica

Período: 1999 - 2018

**Promedios mensuales**

Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa(%)	Lluvia (mm)	Días con lluvia (mm)
	Max.	Min.	Med.			
ENE	33.4	20.9	27.2	60	2.2	1
FEB	34.4	21.2	27.8	56	3.2	2
MAR	35.3	21.5	28.4	54	3.5	1
ABR	35.9	22.5	29.2	57	40.0	3
MAY	34.0	23.2	28.6	73	210.3	15
JUN	32.0	23.1	27.5	81	184.1	16
JUL	32.4	22.8	27.6	77	114.7	13
AGO	32.6	22.6	27.6	80	193.5	18
SEP	31.5	22.4	26.9	86	340.3	23
OCT	30.7	22.3	26.5	87	362.4	22
NOV	31.5	21.4	26.5	79	96.8	11
DIC	32.4	21.0	26.7	68	10.4	3

Anexo 7. Costos de Conservación Licitación 2014LN-000017-0CV00 (zona 2-3)(CONAVI)

Formulario No. 5				
Sumario de cantidades				
Proyecto Estimado				
Constructora Hernan Solis S.R.L.				
Línea 12: Zonas 2-3 Santa Cruz				
A continuación se incluye la lista de precios unitarios por renglón de pago				
Renglón de pago	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (€)
M21(A)	Limpieza de canales	m3	2.482,21	€ 9.136,24
M22(A)	Remoción de derrumbes	m3	11.909,01	€ 2.332,96
M41(A)	Bacheo con mezcla asfáltica en caliente	t	1.787,49	€ 74.633,75
M41(D)	Bacheo de urgencia	t	1.488,31	€ 78.491,84
CR.617.01	Suministro e instalación de viga galvanizada para guardacaminos	m	1.985,26	€ 26.955,56
CR.617.05	Suministro e instalación de postes para guardacaminos	u	991,36	€ 55.859,57
CR.617.03	Sustitución de viga galvanizada para guardacaminos	m	88,74	€ 29.680,45
CR.617.05	Sustitución de postes para guardacaminos	u	25,35	€ 56.057,01
M21(G)	Conformación de cunetas y espaldones	m2	843.531,54	€ 169,35
CR.301.03	Suministro, colocación y compactación de base granular	m3	8.432,91	€ 17.757,04
CR.204.01	Excavación en la vía	m3	21.163,40	€ 2.236,99
CR.208.01	Excavación para estructuras	m3	4.961,88	€ 8.509,40
CR.301.06	Suministro, colocación y compactación sub base granular	m3	1.092,78	€ 17.418,24
CR.204.05	Material de préstamo clasificado.	m3	22.824,12	€ 11.882,72
CR.209.03	Relleno para fundación	m3	1.518,73	€ 23.147,81
CR.614.01	Hormigón ciclópeo	m3	644,00	€ 126.379,51
CR.552.01(a)	Hormigón estructural clase A de 225 kg/cm2	m3	844,30	€ 181.851,22
CR.552.02	Hormigón estructural clase x de 180 kg/cm2	m3	644,00	€ 167.377,19
CR.602.01 (A)	Tubería de concreto reforzado Clase III - C 76, diámetro 600 mm	m	98,88	€ 114.357,40
CR.602.01 (C)	Tubería de concreto reforzado Clase III - C 76, diámetro 800 mm	m	119,17	€ 168.380,92
CR.602.01 (E)	Tubería de concreto reforzado Clase III - C 76, diámetro 1000 mm	m	119,17	€ 229.345,62
CR.602.01 (F)	Tubería de concreto reforzado Clase III - C 76, diámetro 1200 mm	m	119,17	€ 357.059,27
CR.602.01 (G)	Tubería de concreto reforzado Clase III - C 76, diámetro 1500 mm	m	88,74	€ 519.182,41
CR.602.01 (H)	Tubería de concreto reforzado Clase III - C 76, diámetro 2130 mm	m	68,46	€ 917.440,14
CR.605.08	Relleno granular filtrante para sub drenaje francés	m3	337,21	€ 24.544,16
CR.714.01	Tela de fibra sintética para sub drenaje francés	m2	793,60	€ 1.386,66
CR.659	Canal Revestido Tipo IV, Concreto Hidráulico	m2	44.656,88	€ 18.076,57
CR.709.01	Acero estructural grado 60	kg	2.431,50	€ 2.211,41
CR.633.01 (A)	Instalación de señal (Chevron)	u	139,45	€ 66.482,77
CR.633.01 (B)	Instalación de señal (Ceda)	u	25,35	€ 87.946,22
CR.633.01 (C)	Instalación de señal (Alto)	u	25,35	€ 95.878,52
CR.633.01 (D)	Instalación de señal (Espacio)	u	25,35	€ 86.128,40
CR.633.01 (E)	Instalación de señal (Vía Cerrada Adelante)	u	25,35	€ 84.035,16
CR.633.01 (F)	Instalación de señal (Emergencia Delineador)	u	25,35	€ 85.225,70
CR.633.01 (G)	Instalación de señal (Peligro)	u	25,35	€ 87.064,85
CR.633.03	Remoción de señal	u	25,35	€ 6.912,35
CR.253.04	Gaviones revestidos con PVC	m3	10.915,11	€ 43.716,05
CR.253.05	Colchones de revestimiento, revestidos con PVC	m3	1.985,26	€ 57.264,93
CR.253.04 (a1)	Gaviones, tipo terramesh 4 m de cola	m3	1.886,37	€ 58.291,35
CR.253.04 (a2)	Gaviones, tipo terramesh 5 m de cola	m3	1.886,37	€ 62.275,38
CR.253.04 (a3)	Gaviones, tipo terramesh 6 m de cola	m3	1.886,37	€ 67.319,21
CR.615.01	Construcción de aceras	m2	1.886,37	€ 18.320,37
CR.556.01 (A)	Construcción de Baranda para puentes	m	119,17	€ 82.189,91
CR.556.01 (B)	Reparación de Baranda para puentes	m	0,00	
CR.609.01	Cordón de concreto de cemento hidráulico	m	664,29	€ 10.596,41
CR.609.02	Cordón y cuneta de cemento hidráulico	m	664,29	€ 23.217,02
CR.609.05	Cordón de concreto asfáltico, 150 mm de altura	m	664,29	€ 8.339,99
CR.554.01	Acero de refuerzo Grado 40	kg	54.580,63	€ 1.372,46
CR.202.04 (A)	Remoción individual de árboles (150 mm hasta 400 mm de diámetro)	u	40,57	€ 40.531,07
CR.202.04 (B)	Remoción individual de árboles (400 mm hasta 1000 mm de diámetro)	u	40,57	€ 57.281,85
CR.201.03	Remoción de árboles de gran tamaño (mayor a 1000 mm de diámetro)	u	40,57	€ 91.494,91
M634(1)1	Diseño de muros de retención, tipos I,II,III, IV, V y VI	u	1,00	€ 3.748.010,62
M634(1)2	Diseño de muros de retención, tipos VII, VIII, IX, X, XI y XII	u	6,00	€ 4.640.394,10
M634(1)3	Diseño de muros de retención, tipo XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX y XX	u	3,00	€ 9.518.757,12
M634(1)4	Diseño de muros de retención, tipo XXI, XXII, XXIII y XIV	u	5,00	€ 11.303.524,08
MP-50 (B)	Pintura para estructuras de acero	m2	84,00	€ 23.791,40
<b>Total expresado en números</b>				

**Anexo 8.** Costos de Conservación Licitación 2014LN-000018-0CV00 (zona 2-3)(CONAVI)

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO	MONTO
<b>CONTRATO MP Y R: "MANTENIMIENTO PERIODICO Y REHABILITACION DEL PAVIMENTO DE LA RED VIAL NACIONAL PAVIMENTADA" LICITACION PUBLICA N°2014LN-000018-0CV00</b>			
Línea 5 Zona 2-3, Santa Cruz y Zona 2-4, Nicoya			
CUENTA BANCARIA DONDE SE DEBE REALIZAR EL DEPOSITO: N°22422000403 DEL BANCO DAVIVIENDA A NOMBRE DE CONSTRUCTORA MECO S.A. C.C. 10402242200040314			
Estimación descriptiva N° 19.1 Fondo Vial			
	CANTIDAD	UNITARIO	MONTO
M41 (A2) Bacheo a profundidad parcial con mezcla asfáltica en caliente	385,759 t	\$71,081,887	\$28,366,268,775
M45(A) Pavimento bituminoso en caliente	5,111,838 t	\$5,247,307	\$26,920,583,772
MCR408(5) Material de escudo	146,680 m <sup>2</sup>	\$30,544,287	\$4,477,189,042
M50(A) Reconcondicionamiento de la calzada	30,903,400 m <sup>2</sup>	\$1,178,668	\$36,421,886,798
CR302.03 Cemento Portland	280,500 t	\$184,788,602	\$54,455,328,677
MCR702.03 Emulsión asfáltica para imprimación	37,441,739 l	\$368,707	\$13,450,829,588
CR.834.02 A-1 Señalamiento tipo A (Línea continua negra)	1,540,000 m <sup>2</sup>	\$5,246,024	\$8,078,877,576
CR.834.04 A-3 Señalamiento tipo A (Línea continua amarilla)	34,200 km	\$58,788,775	\$19,110,507,737
CR.834.04 A-4 Señalamiento tipo A (Línea continua blanca)	34,248 km	\$572,285,120	\$19,880,181,928
CR.834.04 A-5 Señalamiento tipo A (Línea intermitente blanca)	0,028 km	\$355,058,208	\$9,876,490
CR.834.04 A-6 Señalamiento tipo A (Línea intermitente blanca corta)	0,172 km	\$348,994,548	\$59,872,742
CR.834.02 A-7 Señalamiento tipo A (Letreros de Ceda)	0,890 m <sup>2</sup>	\$13,275,744	\$128,841,381
CR.834.02 A-8 Señalamiento tipo A (Letreros de Ceda)	18,150 m <sup>2</sup>	\$12,288,808	\$205,888,488
CR.834.02 A-9 Señalamiento tipo A (Letreros de Velocidad de KPH)	48,800 m <sup>2</sup>	\$11,890,324	\$542,169,760
CR.834.02 A-10 Señalamiento tipo A (Letreros de Escuela)	39,800 m <sup>2</sup>	\$10,119,220	\$340,108,197
CR.834.02 A-14 Señalamiento tipo A (Flechas)	32,480 m <sup>2</sup>	\$11,827,396	\$1,088,053,838
CR.834.02 A-15 Señalamiento tipo A (Isle de Canalización Amarilla)	89,730 m <sup>2</sup>	\$12,323,446	\$1,229,017,644
CR.834.02 A-18 Señalamiento tipo A (Isle de Canalización Blanca)	88,490 m <sup>2</sup>	\$12,402,660	\$2,48,451,310
CR.834.05 A Señales rígidas sobre pavimento (Capitales 2 Cara Roja)	174,000 u	\$3,105,089	\$540,286,808
CR.834.05 B Señales rígidas sobre pavimento (Capitales 2 Cara Amarilla)	800,000 u	\$3,105,089	\$2,484,071,280
CR.834.05 C Señales rígidas sobre pavimento (Capitales 1 Cara blanca)	3,499,000 u	\$2,897,490	\$9,534,231,254

Continua en la factura 00270



## Anexo 9. Costos de Conservación Licitación 2014LN-000018-0CV00 (zona 2-1)(CONAVI)

CONSEJO NACIONAL DE VIALIDAD CONSERVACION VIAL LICITACIÓN PÚBLICA 2014LN-000018-0CV00				CONTRATO MP Y R: MANTENIMIENTO PERIÓDICO Y R CHOROTEGA CONTRATISTA: CONSTRUCTORA HERNÁN SOLÍS S.R.L		
I T E M						
ITEM	DESCRIPCION	UNID	PRECIO UNIT. \$	ORIGINALES	APROBADAS OM N°7	VARIACION AUMENTO
M403(1) A	Diseño de rehabilitaciones y sobre capas asfálticas	km	737 984,155	51,000	60,000	15,000
M41(A2)	Bacheo a profundidad parcial con mezcla asfáltica en caliente	t	85 504,214	3 028,000	-	-
M42(B)	Perfilado de pavimento	m2	803,287	350 288,000	148 322,850	-
M45(A)	Pavimento bituminoso en caliente	t	56 730,254	22 000,000	210 708,679	3 582,922
M45(E)	Pavimento bituminoso en caliente con polímeros	t	62 904,853	60 567,000	-	-
M40(A)	Levantamiento de tapas de pozos	u	46 975,402	15,000	-	-
M43(C)	Ruteo y sellado de grietas	m	2 667,944	40 913,000	-	-
M47(B)	Tratamiento bituminoso de preservación tipo S-2	m2	2 123,362	1 000,000	-	-
CR.301.03	Suministro, colocación y compactación de base granular	m3	16 614,769	15 937,000	-	-
CF .06	Suministro, colocación y compactación sub base granular	m3	14 631,520	1 000,000	-	-
MCR.408(5)	Material de secado	m3	28 417,949	797,000	4 451,921	-
M30(A)	Reacondicionamiento de la calzada	m2	1 193,971	159 363,000	960 432,006	-
CR.502.01	Bacheo del pavimento de concreto	m2	24 818,834	2 000,000	-	-
CR.502.02	Sellado de juntas y grietas	m	3 553,316	59 578,000	-	-
CR.502.03	Lechada	m3	289 078,088	50,000	-	-
CR.502.04	Orificios para el sello	und	7 935,400	25,000	-	-
CR.502.05	Fresado de la Superficie (diamante)	m2	735,852	2 000,000	-	-
CR.502.06	Quebrado y asiento del pavimento de concreto	m2	3 031,856	1 000,000	-	-
CR.502.07	Fracturación y asiento del Pavimento de Concreto	m2	3 031,856	1 000,000	-	-
CR.502.08	Encasotado y compactado del pavimento de concreto	m2	10 655,819	1 000,000	-	-
CR.503.01	Sobrecapa de concreto hidráulico	m2	34 986,327	2 500,000	-	-
CR.501.01	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo	m2	35 732,459	1 000,000	-	-
CR.501.02	Pavimento de concreto hidráulico sin refuerzo	m2	34 305,014	2 000,000	-	-

## Anexo 10. Resumen de costos de conservación (Resumen anexos: 7, 8 y 9)

Item	Descripción	Unidad	Precio unitario	Zona de Conservación
M403(1) A	Diseño de rehabilitaciones y sobrecapas asfálticas	km	₡ 737,984.16	Zona 2-1
M41 (A2)	Bacheo a profundidad parcial con MAC	ton	₡ 71,592.00	Zona 2-3
M41 (D)	Bacheo de urgencia con MAC	ton	₡ 78,491.84	Zona 2-3
M42(B)	Perfilado de pavimento	m <sup>2</sup>	₡ 803.21	Zona 2-1
M 40 (A)	Levantamiento de tapas de pozos	u	₡ 46,975.40	Zona 2-1
M43 ( C )	Ruteo y sellado de grietas	m	₡ 2,667.94	Zona 2-1
M45 (A)	Pavimento bituminoso en caliente	ton	₡ 55,247.51	Zona 2-2
M47 (B)	Tratamiento Bituminoso de Preservación TS2	m <sup>2</sup>	₡ 2,123.36	Zona 2-1
CR.502.01	Bacheo del pavimento de concreto	m <sup>2</sup>	₡ 24,818.83	Zona 2-1
CR.502.02	Sellado de juntas y grietas	m	₡ 3,553.32	Zona 2-1
CR.502.06	Quebrado y asiento del pavimento de concreto	m <sup>2</sup>	₡ 3,031.86	Zona 2-1
CR.502.07	Fracturación y asiento del pavimento de concreto	m <sup>2</sup>	₡ 3,031.86	Zona 2-1