

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Pedro Castro Fernández, Ing. Israel Monge Leiva, 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: 2020.05.13
08:17:34 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

SERGIO
FERNANDEZ
CERDAS

Digitally signed by
SERGIO FERNANDEZ
CERDAS
Date: 2020.05.14
11:33:52 -06'00'

Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Guía

PEDRO LUIS CASTRO
FERNANDEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por
PEDRO LUIS CASTRO
FERNANDEZ (FIRMA)
Fecha: 2020.05.14 15:35:42
-06'00'

Ing. Pedro Castro Fernández.
Profesor Lector

ISRAEL EDUARDO
MONGE LEIVA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
ISRAEL EDUARDO
MONGE LEIVA (FIRMA)
Fecha: 2020.05.18
09:43:16 -06'00'

Ing. Israel Monge Leiva.
Profesor Observador

Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba.

Abstract

The following project seeks to develop the dimensioning of the pavement structure for three routes of the canton of Turrialba, for each section the design of flexible, semi-rigid and rigid pavements will be proposed. These were designed for two design periods of 10 and 15 years, both were designed using the AASHTO 93 guide in order to determine the thicknesses of the layers that compose the pavement, at the same time, the Mechanic- methodology was used to check that the proposed dimensions are ideal, this was done with the use of CR-ME ®, PITRA PAVE ® and ApRIGID ® programs from LanammeUCR.

Of the three sections to design two of them they did not have laboratory tests that allowed classifying existing soils, so CIVCO realized the corresponding tests to obtain the necessary parameters for the design of the pavement structure, they were also developed the tests of daily average transit.

There was a detailed analysis of the costs involve the construction of each of the pavements and damage that may be exposed, maintenance costs will have the pavement during the select design period.

The semi-rigid pavements of the 15-year period are the most suitable structures to invest by the Municipality of Turrialba in the three roads, because these are the ones that give the best conditions to meet the immediate needs of the community.

Keywords: *design, pavement, cost, AASHTO-93, Mechanistic-Empirical.*

Resumen

El siguiente proyecto busca desarrollar el dimensionamiento de la estructura de pavimento para tres rutas del cantón de Turrialba, para cada tramo se propondrá el diseño de pavimentos flexible, semi-rígido y rígido. Estos se diseñaron para dos periodos de diseño de 10 y 15 años, ambos se diseñaron mediante el uso de la guía AASHTO 93 con el propósito de determinar los espesores de las capas que componen el pavimento; a su vez se usó la metodología Mecánica-Empírica para revisar que las dimensiones propuestas sean las idóneas, se hizo con el uso de los programas CR-ME ®, PITRA PAVE ® y ApRIGID ® del LanammeUCR.

De las tres secciones para diseñar dos de ellas no contaban con pruebas de laboratorio que permitieran clasificar los suelos existentes, por lo que el CIVCO realizó las pruebas correspondientes para obtener los parámetros necesarios para el diseño de la estructura del pavimento, también se hicieron los conteos de tránsito diario promedio.

Se hizo un análisis detallado de los costos que conlleva la construcción de cada uno de los pavimentos, así como deterioros a los que podría estar expuesto y el costo de mantenimiento que tendrá el pavimento durante el periodo de diseño seleccionado.

Los pavimentos semi-rígidos del periodo de 15 años son las estructuras más adecuadas para invertir por parte de la Municipalidad de Turrialba en las tres rutas, porque estas son las que dan las mejores condiciones para solventar las necesidades inmediatas de la comunidad.

Palabras claves: *diseño, pavimento, costos, AASHTO-93, Mecánica - Empírica.*

Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba.

Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba.

GABRIEL ALONSO MOLINA LÓPEZ

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

Abril del 2020

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCIÓN.....	4
MARCO TEÓRICO	6
METODOLOGÍA.....	25
RESULTADOS	47
ANÁLISIS DE RESULTADOS	98
CONCLUSIONES.....	109
RECOMENDACIONES.....	110
APÉNDICES.....	111
ANEXOS.....	203
REFERENCIAS	209

Prefacio

Costa Rica es el país con la red vial más densa de Centroamérica, sin embargo, muchos de estos caminos no se encuentran en las mejores condiciones funcionales y estructurales. La Red Vial de Costa Rica se divide en dos: Red Vial Nacional la cual está encargada por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) por medio del Consejo Nacional de Viabilidad (CONAVI) y la Red Vial Cantonal, de la cual se encargan los gobiernos locales de cada cantón.

Un país el cual no cuente con buenas carreteras difícilmente tendrá un desarrollo adecuado, ya que la red vial es importante para el crecimiento y progreso de un país pues permite la movilización de las personas, turismo y comercio a lo largo y ancho de la nación.

Ante tal situación el Gobierno de Costa Rica y el MOPT han destinado fondos para el mejoramiento de las carreteras y han desarrollado iniciativas como el Programa de Red Vial Cantonal PRVC-1 para que las municipalidades se encarguen de los caminos cantonales, este es el caso de la Municipalidad de Turrialba la cual está a cargo de una amplia red de caminos, pero algunos de estos no han sido tratados de la mejor manera, el proyecto a desarrollar pretende mejorar tres vías para el desarrollo de la comunidad de Turrialba, ya que es importante que los caminos del cantón se encuentren en buenas condiciones para el beneficio del pueblo.

El proyecto tiene como finalidad el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de tres rutas, además de determinar si el diseño es viable tanto a nivel estructural como económico, mediante las metodologías AASHTO-93 y verificación de los diseños mediante la metodología Mecánica-Empírica, estas rutas se encuentran únicamente lastreadas y los trabajos que se han realizado por parte de la Municipalidad han sido únicamente de mantenimiento para que no alcancen un deterioro mayor.

Lo fundamental de intervenir estas rutas por parte de la Municipalidad es que dan acceso a lugares de suma importancia para la comunidad

como lo son el Liceo Experimental Bilingüe de Turrialba, Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), relleno sanitario del cantón y a los hogares de los vecinos, además de que una de estas rutas será uno de los caminos de acceso alterno al nuevo hospital que se construirá pronto en la comunidad. La importancia de este proyecto es desarrollar un diseño de pavimento que logre generar una estructura de pavimento duradera, funcional y económica que permita solventar las necesidades viales de la comunidad, contemplando cada uno de los aspectos que sean necesarios para el diseño estructural.

Agradezco primero a Dios y a la Virgen de los Ángeles por haberme dado las fuerzas necesarias y la capacidad para salir adelante y llegar a donde estoy en mi formación como profesional, a mi madre, Cecilia y a mi padre, Cristóbal, quienes me han ayudado mucho en este largo camino, gracias por estar conmigo en los momentos más difíciles e impulsarme a ser una mejor persona cada día.

Agradezco a los profesores que he tenido durante la carrera; logré aprender de cada uno de ellos, agradezco especialmente a mi profesor guía al Ing. Sergio Fernández por todos los consejos y ayuda durante el desarrollo de este proyecto, a mis compañeros de estudio los cuales siempre les agradeceré las jornadas de estudio y los trabajos realizados en estos seis años de carrera. Por último, agradezco al Tecnológico de Costa Rica y a la Escuela de Ingeniería en Construcción por haberme formado como profesional.

Resumen ejecutivo

El país crece cada día más en materia de obras viales, son cada vez más los proyectos que el Gobierno ha intervenido tanto a nivel nacional como cantonal para el mejoramiento del mapa vial del Costa Rica. El Ministerio de Obras Públicas y Transporte se ha encargado de capacitar a las municipalidades con sus programas de ayuda como el Programa Red Vial Cantonal-II (CR-L1065) entre el MOPT y el BID para el mejoramiento o rehabilitación de la red vial cantonal a cargo de cada institución.

En la comunidad de Turrialba han aprovechado este tipo de programas y los fondos obtenidos del impuesto único sobre los combustibles de conformidad según la Ley N° 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias para intervenir rutas del cantón importantes para su crecimiento y bienestar de los vecinos, por lo cual el proyecto desarrollado tiene como objetivo principal el diseño de tres estructuras de pavimento (flexible, semi-rígido y rígido) de tres distintas rutas turrialbeñas a fin de determinar cuál de estas estructuras se adapta mejor a las necesidades de la comunidad; esto se diseñó mediante el uso de la guía de diseño de la AASHTO-93 y se verificó con la ayuda de la metodología Mecánica-Empírica, además de esto se determinó el costo de construcción y mantenimiento que conllevaría cada pavimento.

Los diseños realizados corresponden a tres rutas ubicadas cerca del centro de Turrialba y se denominaron para el desarrollo del proyecto como La Cecilia con una extensión de 1.200,00 m, Parque el Silencio con un largo de 532,30 m, esta se divide en dos secciones la primera que da acceso al el Parque el Silencio y la segunda da acceso al Liceo Bilingüe Experimental de Turrialba y por último la más extensa de las tres rutas, INA, con 3.187,00 m de largo.

Como parte del diseño fue imprescindible la recopilación de los parámetros de diseños que permitieron la realización de dichos diseños, se hicieron conteos de Tránsito Promedio Diario (TPD), estas se realizaron por tres días seguidos

en un horario de 6:00 am a 6:00 pm en las tres vías, la Unidad Técnica de Gestión Vial (U.T.G.V) conservaba un estudio de laboratorio que correspondía a los suelos de la ruta La Cecilia, por su parte para las otras dos rutas se realizaron extracciones de suelos con el equipo técnico del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) para que los mismos ejecutaran las pruebas correspondientes y obtener las características de la sub-rasante presente, dichas pruebas solo se realizaron para las sub-rasantes y no para los materiales existentes que funcionan como capa de ruedo, los datos climáticos del cantón de Turrialba se obtuvieron de la estación meteorológica del CATIE, era la única que tenía la información necesaria para el diseño estructural, ya que las estaciones del IMN no tenían la información completa. Con respecto a los datos de la base granular, sub-base granular y mezcla asfáltica fueron brindados por proveedores de confianza por parte de la institución turrialbeña.

Se diseñaron tres distintas estructuras de pavimentos para cada una de las rutas y además se proyectó para un periodo de diseño de 10 años y de 15 años con el fin de determinar cuál periodo brinda las mejores características tanto funcionalmente como económicamente, los espesores calculados se basan en los espesores mínimos del Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos (2002) y en la relación indicada por la AASHTO-93 la cual indica que los espesores mínimos deben de ser al menos tres veces el tamaño nominal máximo del agregado.

Para la ruta La Cecilia en el periodo de 10 años para el pavimento flexible se obtuvo un paquete estructural de 6,00 cm de capa asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular con un costo de construcción de que ronda los ₡ 143.082.144,28, por su parte el pavimento semi-rígido se compone de 6,00 cm de capa asfáltica, 20,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y 20,00 cm de sub-base granular, con un costo de ₡ 185.820.187,75 y el pavimento rígido lo compone una losa de

concreto de 15,00 cm y 15,00 de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) siendo el más costoso de los tres pavimentos con un costo de construcción total de ₡ 247.832.881,28; para el periodo de 15 años los pavimentos semi-rígidos y rígidos poseen la misma estructura y costo del periodo anterior, el pavimento flexible posee 7,00 cm de mezcla asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular con un costo de ₡ 155.820.685,17.

En la ruta Parque el Silencio el pavimento flexible que corresponde al periodo de 10 años está compuesto por de 8,00 cm de mezcla asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular y para un costo de construcción de ₡ 76.403.167,11, el semi-rígido se compone de 7,00 cm de capa asfáltica, 20,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y 20,00 cm de sub-base granular, con un costo de construcción de ₡ 89.284.061,47 y el pavimento rígido posee losa de concreto y una base estabilizada con concreto hidráulico (BE-25) de 15,00 cm con un costo de ₡ 110.564.107,17, para el periodo de 15 años el pavimento flexible posee 9,00 cm de capa asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular con un costo inicial de ₡ 81.871.405,35, el pavimento semi-rígido y rígido tienen poseen la misma estructura y costo del periodo de 10 años.

La ruta INA los resultados de las estructuras para el periodo de 10 años son: pavimento flexible compuesto por 9,00 cm de carpeta asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular y un costo de inversión ₡ 454.836.946,57, el semi-rígido se compone de 7,00 cm de capa asfáltica, 20,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y 20,00 cm de sub-base granular, su costo de construcción es de ₡ 499.213.709,19 y el pavimento rígido posee una losa de concreto de 15,00 cm y una base estabilizada de 15,00 cm para un total de ₡ 626.434.198,47; para el periodo de 15 años el pavimento flexible posee 10,00 cm de capa asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular y un costo de construcción de ₡ 487.576.747,71, el pavimento semi-rígido y rígido tienen poseen la misma estructura y costo del periodo de 10 años.

Los pavimentos tienen sus ventajas y desventajas siendo el pavimento flexible el más sencillo de construir y el que menor tiempo toma para construirse provocando un menor impacto en las actividades de los usuarios, pero el semi-rígido

puede dar mejores beneficios de resistencia que un flexible y eso lo hace adecuado, pero el problema está en el tiempo que conlleva el proceso constructivo porque es mayor en el pavimento semi-rígido generando mayores atrasos en las actividades diarias de las personas, por su parte el rígido da mayor durabilidad y resistencia que los otros dos pavimentos, sin embargo al igual que el semi-rígido su problema se concentra en los procesos usados para la construcción, el tiempo de construcción y en el costo inicial.

Se desarrolló un plan de conservación el cual indica los deterioros a los cuales podría estar propenso los pavimentos, las posibles intervenciones y el costo de mantenimiento esto con el fin de que los representantes de la Municipalidad de Turrialba puedan conocer más del comportamiento al cual podría estar expuesta cada estructura en la comunidad, también se adjuntó un formulario para poder agilizar y mejorar el proceso de inspección de las obras, estas inspecciones deben de hacerse de manera periódica no mayor a un año para determinar los deterioros de la estructuras y generar una curva de comportamiento de los mismos.

Cualquiera de las tres alternativas de pavimentos diseñadas que se escoja va a mejorar las actuales condiciones en las que se encuentra las rutas y la decisión que se tomen no solo debe hacerse con base en los costos de inversión, de intervención y CAUE sino que hay que tomar en cuenta los impactos a la sociedad y las ventajas técnicas de construir uno u otro pavimento.

Teniendo en cuenta los paquetes estructurales diseñados, el costo de cada una y algunas de las características técnicas de los pavimentos se concluye que los pavimentos semi-rígidos del periodo de 15 años son las estructuras más adecuadas para invertir en las tres rutas, porque estas son las que dan las mejores condiciones para solventar las necesidades inmediatas de la comunidad, porque se garantizan una estructura resistente y con una vida funcional por más años.

Introducción

La Red Vial de Costa Rica es muy amplia a nivel de la región centroamericana a pesar del tamaño que del país, aproximadamente la nación cuenta con 76,00 km de vías por cada 100,00 km² de superficie (MOPT, 2011), al ser una red muy densa las municipalidades están a cargo de los caminos cantonales, sin embargo, la calidad de las carreteras no es de las mejores en el área.

El Ministerio de Obras Públicas y Transporte ha fortalecido a las municipalidades mediante programas viales como el Programa de Red Vial Cantonal-II (CR-L1065) el cual se ejecuta por etapas y es financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), este programa tiene el fin de ayudar a los gobiernos locales para que aumenten el número de vías a un mejor estado mediante un mantenimiento y rehabilitación adecuado o construcción vial, además programas como este permiten la reducción de costos de operación y tiempos de viaje.

La Red Vial Nacional posee un poco más de 7.976,74 km de los cuales 4.117,81 km se encuentran pavimentados ya sea con mezcla asfáltica o concreto y más de 3.858,93 km están en lastre, tierra o tratamiento superficial, la Red Vial Cantonal tiene de longitud 36.712,62 km, donde 5.307,41 km están pavimentados el resto se encuentra en lastre u otro tipo de material, a la red vial se le suma los cuadrantes urbanos que son aproximadamente 12.000,00 km (MOPT, 2019).

En la comunidad de Turrialba existen 321,00 caminos con una longitud total de 653,68 km, distribuidos de la siguiente manera 31,47 km de carpeta asfáltica, 11,50 km de concreto, 0,20 km de tratamiento superficial, 586,08 km de lastre y 24,60 km de tierra de la longitud total el 334,97 km posee una condición regular y tan solo el 16,00 km tiene una condición excelente según los estudios (MOPT, 2019).

CUADRO 1. CONDICIÓN DE LA RED VIAL CANTONAL DE TURRIALBA (km)						
Tipo de Superficie	Excelente	Bueno	Regular	Malo	Muy Malo	Total
Carpeta Asfáltica	12,80	17,50	0,40	0,60	0,00	31,30
Concreto	0,00	0,00	11,50	0,00	0,00	11,50
Tratamiento superficial	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,20
Lastre	3,20	105,96	323,07	105,25	48,60	586,08
Tierra	0,00	0,00	0,00	6,70	17,90	24,60
Total	16,00	123,66	334,97	112,55	66,50	653,68

Fuente: MOPT (2019).

Gran parte de las rutas cantonales de Turrialba no han sido intervenidas debido a la extensión del cantón y también a que muchas de estas rutas sirven de vías a lugares de difícil acceso de la comunidad por lo que se encuentran en un estado regular, es por ello que el siguiente proyecto se planteó como objetivo principal el diseñar la estructura de pavimento y obtención de la viabilidad económica de tres rutas cantonales de Turrialba mediante la metodología AASHTO 1993 y metodología Mecánica-Empírica para la

intervención a corto tiempo de los tramos en estudio.

Se plantearon los siguientes objetivos específicos para una mejor facilidad para el cumplimiento del objetivo general

- Realizar estudios preliminares que permitan identificar las variables esenciales para el diseño de la estructura de pavimento de los tramos a intervenir.
- Diseñar tres tipos de pavimentos (flexible, semi-rígido y rígido) por ruta con la Guía

para el Diseño de Pavimentos AASHTO 1993 y metodología Mecánica-Empírica.

- Calcular los costos necesarios para la construcción de las estructuras de pavimento diseñadas.
- Analizar cuál de los pavimentos diseñado se adapta mejor a las necesidades de la Municipalidad de Turrialba tomando en cuenta el diseño y el costo establecido previamente.
- Realizar un plan de conservación para maximizar la vida de los pavimentos diseñados y el costo de mantenimiento que conlleva dicho plan.

El diseño de la estructura de pavimento se optó por realizarlo con la metodología AASHTO-93, ya que es la más usada en Costa Rica, pero esta se desarrolló para las condiciones del estado de Illinois de los Estados Unidos por lo que se decide verificar el diseño mediante la Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica con el método más cercano de calibración por parte del LanammeUCR para Costa Rica mediante el uso de los programas CR-ME ®, PITRA PAVE ® y ApRIGID ®.

Con el diseño elaborado se realizan los cálculos de los costos de construcción y de mantenimiento específicos de cada una de las estructuras de pavimentos diseñadas para realizar una comparación entre las estructuras y así determinar cuál es la mejor opción que se acopla a las necesidades y presupuesto de la Municipalidad de Turrialba pensando en el beneficio de los usuarios.

Alcances y Limitaciones

La finalidad de este proyecto es el desarrollo del diseño estructural de tres tipos de pavimento para tres rutas cantonales de Turrialba con el fin de que el gobierno local pueda determinar cuál de estas estructuras es la mejor opción para construir.

En este trabajo se determinaron los costos de construcción que conlleva cada uno de los pavimentos, así como un plan de conservación el cual se indica los posibles deterioros a los que puede estar expuesta la estructura según su periodo de vida, así como los costos de intervención o mantenimiento para la solución de los deterioros.

Tomando en cuenta estos aspectos, así como aspectos técnicos y funcionales de cada pavimento y las condiciones económicas de la Municipalidad se puede tomar una decisión de cual pavimento es el mejor para su construcción y solventar las necesidades de los vecinos.

Dentro de las limitaciones de este proyecto destacan los atrasos en los trámites por parte de la Municipalidad por contratar los servicios del CIVCO para la extracción de los suelos y realizar los ensayos de laboratorio respectivos.

Otra limitación se da en el diseño de las estructuras, ya que los materiales expuestos de las rutas no fueron usados en el diseño, el material expuesto de la ruta La Cecilia no cumplía con los requerimientos mínimos del CR-2010 para usarse como sub-base tipo B y los materiales expuestos de las restantes rutas no fueron extraídos para su estudio en el laboratorio.

El diseño de las estructuras está limitado en el tema de los materiales debido al uso únicamente de la materia prima de los proveedores de la Municipalidad de Turrialba, fue una gran limitante porque algunos quebradores cerca de Turrialba y algunas empresas encargadas en la producción de mezcla asfáltica proporcionaban materiales de mejor calidad y en algunos casos hasta de un menor costo en comparación a los materiales que usa la Municipalidad turrialbeña.

Otra limitación fue a la hora de requerir cotizaciones de venta de materiales y alquiler de equipo de construcción porque se atrasaban en enviar la cotización o simplemente no la enviaban, por lo que se tuvieron que calcular algunos costos de materiales y equipo con información de los informes de costos del MOPT para la construcción de carreteras.

Marco Teórico

En el siguiente apartado se explicarán diferentes temas para que el lector pueda entender de una mejor manera aspectos relevantes sobre las estructuras de pavimentos, las metodologías de diseño, su conservación entre otros conceptos de gran importancia.

Pavimento

Un pavimento es una estructura compuesta por distintas capas o un sistema multicapas, cuya funcionalidad es como la de un cimientado, puesto que transfiere los esfuerzos generados por las cargas de tránsito y ambiente al terreno natural (Castro, 2019), en otras palabras, su función es amortiguar el esfuerzo en el suelo para que este lo pueda soportar sin que se exceda su capacidad de soporte.

Los pavimentos deben de proporcionar una superficie de ruedo que sea cómoda, segura, económica y durable, para cumplir esto es importante que se haga un buen diseño de la estructura, una buena construcción y una constante evaluación de los pavimentos durante su vida útil, a esto se le conoce como el ciclo de diseño de un pavimento (Ver figura 1).

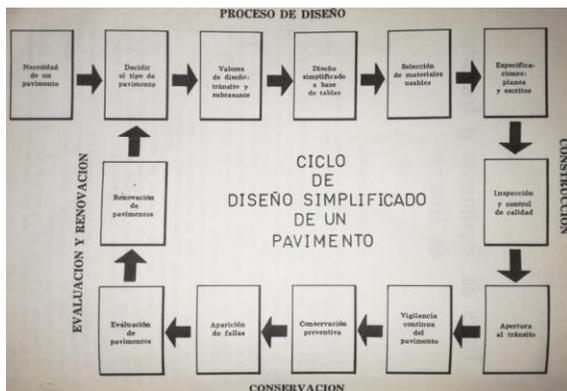


Figura 1. Ciclo de diseño de un pavimento.
Fuente: Moncayo (1987).

Según Moncayo (1987), el ciclo de diseño del pavimento consta de cuatro principales actividades, la primera el proceso de diseño donde se necesita recolectar la información o parámetros iniciales de diseño y aplicar los métodos adecuados para la solución del problema, la segunda corresponde a la construcción donde destacan los controles de calidad de los materiales, la tercera pertenece a la conservación donde se realizan las actividades de mantenimiento y la última es la evaluación y renovación esto se realiza una vez que el pavimento haya cumplido su funcionalidad y deba de ser sustituido por una nueva estructura de pavimento.

Las características o atributos principales que debe de tener todo tipo de pavimento según Padilla (2004) son las siguientes:

- Resistente a soportar las cargas.
- Resistencia al derrape adaptada a la velocidad de diseño de la carretera.
- Resistente a los cambios de temperatura y humedad.
- Regularidad superficial, longitudinal y transversal.
- Rápida eliminación del agua superficial por lo que debe de presentar buenos drenajes.
- Bajo nivel de ruido.
- Bajo nivel de desgaste de las llantas.
- Propiedades de reflexión luminosa que permita una seguridad de tránsito.
- Apariencia agradable.

Tipos de Pavimentos

Existen tres tipos de pavimentos cuyas diferencias radica en las rigideces que pueden tener sus capas, así como los espesores de estas:

Pavimento Flexible

Este tipo de pavimento está constituido por una superficie de rodamiento cuyo material de construcción es el concreto asfáltico o mezcla asfáltica (4,00-20,00 cm), esta se encuentra

apoyada sobre una base (10,00-40,00 cm), una sub-base (15,00-100,00 cm) y una sub-rasante como se puede observar en la figura 2.

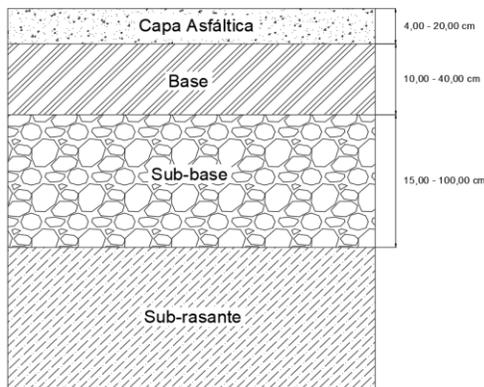


Figura 2. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

La transmisión de las cargas es más concentrada debido a que los materiales son más deformables, por lo que la distribución de las cargas se da en menos área de apoyo, de ahí que los espesores de carga sean mayores esto para resistir la transmisión de cargas.

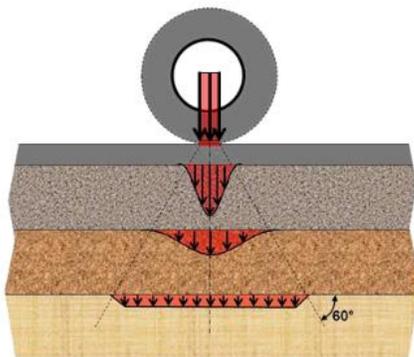


Figura 3. Transmisión de cargas pavimento flexible.
Fuente: InterCement (2012)

Una de las ventajas de este pavimento es que los costos de inversión son menores, pero los costos de mantenimiento y rehabilitación son más elevados, además este tipo de pavimentos es menos factible desde el punto de vista económico para los tránsitos altos debido a las características de los materiales.

Pavimento Semi-rígido

Los pavimentos semi-rígidos (Ver figura 4). están compuestos al igual que los pavimentos flexibles por una capa asfáltica (5,00-10,00 cm), de una base, pero en este caso se encuentra estabilizada ya sea con cemento (10,00-25,00 cm), una sub-base (15,00-60,00 cm) y una sub-rasante. Este pavimento posee menores espesores que un pavimento flexible en las capas de soporte, además es resistente al agrietamiento por fatiga en la capa asfáltica, pero puede fallar por deformación plástica por la compresión en la base estabilizada (Castro, 2019).

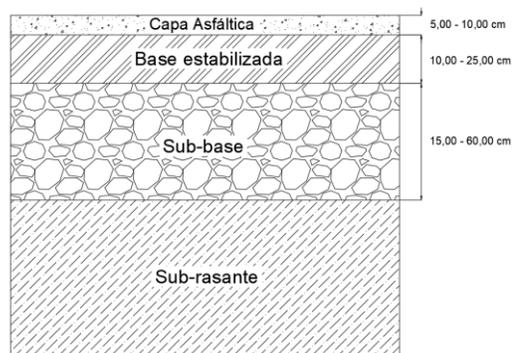


Figura 4. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

Pavimento Rígido

Los pavimentos rígidos utilizan como superficie de rodadura una losa de concreto hidráulico (12,50-30,00 cm), una base que puede ser estabilizada con cemento o emulsión asfáltica (10,00-20,00 cm) o sub-base (15,00-40,00 cm) y una sub-rasante, generalmente una de las capas base o sub-base puede ser indispensable, muy comúnmente es la sub-base (Ver figura 5).

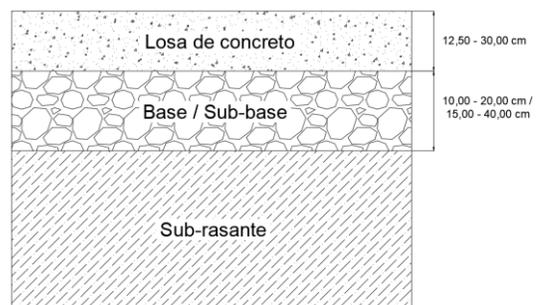


Figura 5. Estructura pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

La losa de concreto al ser bastante rígida permite una distribución de carga en una mayor área, transmitiendo presiones bajas a las capas inferiores, aportando la losa la mayor capacidad estructural de este pavimento (Montejo, 2002).

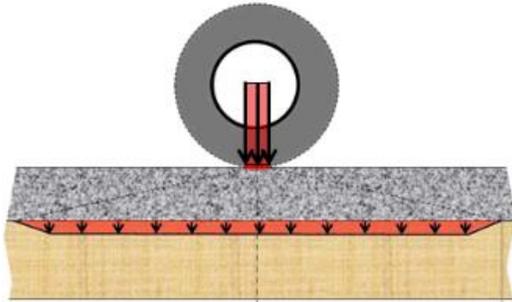


Figura 6. Transmisión de cargas pavimento rígido.
Fuente: InterCement (2012)

Entre las ventajas que presentan estos pavimentos están: un menor costo de mantenimiento y espesores de menor dimensión en las capas de soporte, sus desventajas radican en mayor costo de inversión y mayor dificultad de reconstrucción (Castro, 2019). Existen tres tipos de pavimentos rígidos los cuales son:

Pavimento de concreto con juntas (JPCP)

El pavimento JPCP (por su nombre en inglés Jointed Plain Concrete Pavements) es el más común de los pavimentos rígidos se caracteriza porque está constituido por juntas de contracción para evitar el agrietamiento por la tensión o temperatura, las juntas transversales de este tipo poseen un ancho máximo de 1,00" (25,00 mm), pueden llegar a tener una separación entre 3,00-8,00 m, pero depende del espesor que vaya a tener la losa de concreto, las juntas longitudinales son usadas para definir el ancho y dividir los carriles de la carretera, su espesor ronda entre 1/8 -3/8" (3,00-9,00 mm) según la FHWA (2019).

Las juntas transversales pueden conectarse mediante unas barras de unión llamadas dovelas cuya funcionalidad es mantener unidas las losas y mejorar la transferencia de carga entre las mismas, se ubican paralelamente a la dirección del tránsito, en las juntas longitudinales se colocan barras de amarre longitudinal esto para evitar los esfuerzos de fricción, el pavimento JPCP no posee ningún tipo

de acero de refuerzo, las dovelas y las barras de amarre se colocan a la mitad del espesor de la losa (ACPA, 2014).

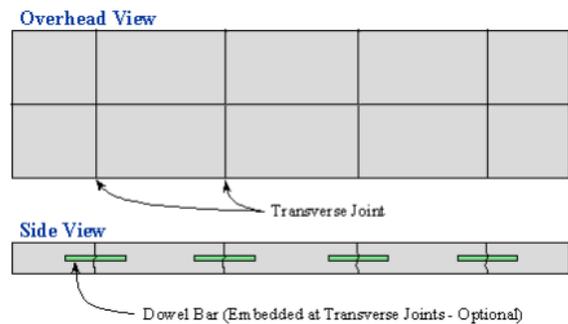


Figura 7. Detalle de pavimento JPCP.
Fuente: ACPA (2014)

Pavimento reforzado con juntas (JRCP)

Los pavimentos JRCP (Jointed Reinforced Concrete Pavements) poseen una malla de acero de refuerzo, dicho acero no aumenta la capacidad de soporte de la losa, ni tiene la función de tomar los esfuerzos que se producen por las cargas de tránsito, pero si aumenta el espacio entre juntas transversales podría llegar a ser más de 9,00 m, al igual que el pavimento JPCP usa dovelas para poder transferir de mejor manera las cargas de tránsito entre losas (ACPA, 2014).

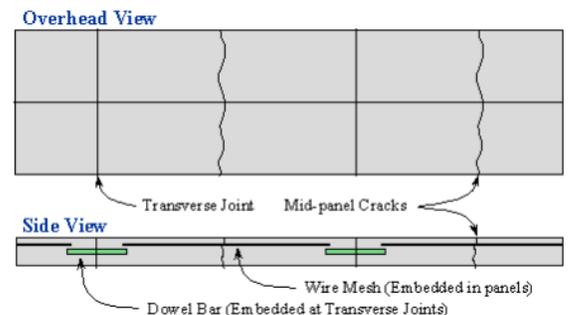


Figura 8. Detalle de pavimento JRCP.
Fuente: ACPA (2014)

Pavimento continuo reforzado (CRCP)

El CRCP (Continuously Reinforced Concrete Pavements) no necesita de ningún tipo de junta, ni de dovelas, ni de acero de amarre longitudinal, utiliza acero estructural, la malla es muy tupida por

lo que impide un menor agrietamiento, también el acero permite que las grietas existentes se mantengan juntas, la desventaja que presenta este pavimento es el costo debido a la cantidad de acero que usa, ya que es el pavimento rígido que más acero consume, una de las ventajas es que es un pavimento muy eficiente para el caso de los tráficos altos (ACPA, 2014).

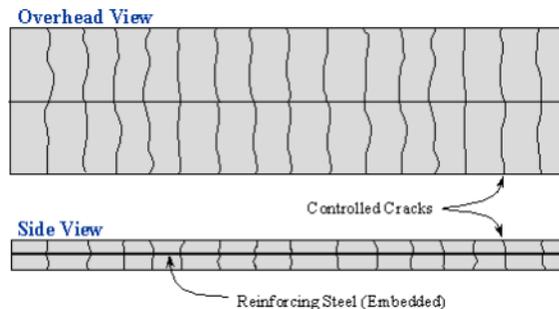


Figura 9. Detalle de pavimento CRCP.
Fuente: ACPA (2014)

Materiales para pavimento

Los tres tipos de pavimentos están compuestos por diferentes capas las cuales le dan la resistencia a la estructura de pavimento para soportar las cargas impuestas.

Concreto Asfáltico

Para los pavimentos flexibles y semi-rígidos usan como carpeta de rueda una mezcla asfáltica cuya funcionalidad es brindar una superficie de rueda cómoda, segura, estable, durable, resistente a las cargas de tráfico, además debe de ser impermeable para impedir el paso del agua a las capas inferiores, así como trabajable para su fácil colocación y compactación. La mezcla asfáltica o concreto asfáltico es un producto terminado, está compuesto por agregados pétreos del tipo grueso y fino, (80,00-85,00 %), ligante asfáltico (8,00-12,00 %), aire (3,00-9,00 %) y otros como polvo mineral (Castro, 2019).

El ligante asfáltico tiene la funcionalidad de aglutinar los agregados de manera que es el responsable de brindarle a la mezcla asfáltica las características de impermeabilidad, durabilidad y cohesión. A bajas temperaturas puede actuar como emulsión asfáltica (ligante asfáltico más agua) y a temperaturas altas actúa como cemento asfáltico (Castro, 2019). Existen gran variedad de

cementos asfálticos el AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30, AC-40, entre mayor sea el grado mayor será la rigidez y viscosidad. En Costa Rica el usado es el AC-30 y es distribuido por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

Los agregados son los encargados de darle a la mezcla asfáltica la estabilidad, por su parte el contenido de aire debe ser intermedio (4.00 % es lo ideal) para desarrollar una resistencia al cortante adecuada (Castro, 2019). Las características que tengan los elementos que componen la mezcla asfáltica determinan las propiedades tanto físicas como volumétricas de la misma, una falta de calidad en estos puede llegar a afectar el rendimiento de la mezcla.

Concreto Hidráulico

Este material es usado en los pavimentos rígidos como superficie de rueda, está compuesto por agregado grueso (piedra), agregado fino (arena), cemento y agua, la rigidez depende de las reacciones entre estos elementos. Aproximadamente su módulo de rigidez es 10 veces mayor que el módulo de rigidez del concreto asfáltico, sin embargo, es propenso a que sufra de agrietamiento por contracción y cambios volumétricos (Castro, 2019).

Como el concreto hidráulico es muy rígido las cargas se reparten uniformemente en grandes áreas, por lo que las capas inferiores no necesariamente deben de ser tan rígidas, pero si son blandos o débiles puede ocurrir una consolidación del terreno debido a la constante repetición de cargas fuertes sobre la losa de concreto hidráulico.

Base

Esta capa se encuentra ubicada debajo de la capa de rueda del pavimento, por ser muy próxima a la superficie debe de tener una alta rigidez para poder tolerar las cargas que esta recibe y poder distribuir en menor intensidad las cargas a las capas inferiores, además las bases sirven como un medio de drenaje y pueden controlar el bombeo de finos según del tipo de agregado.

Generalmente las bases están compuestas por agregados granulares y asimismo pueden ser estabilizados con cemento o emulsión asfáltica esto depende del tipo de pavimento a diseñar. El CR-2010 del Ministerio de Obras y Transporte (MOPT)

indica que las características mínimas que debe de poseer una base granular son: 80,00 % del ensayo CBR, una compactación al 95,00% y un índice de plasticidad entre 4,00-9,00.

Sub-base

Es la carpeta que se encuentra en medio de la base y de la sub-rasante, el módulo de rigidez de las sub-bases es menor que el de las bases. Una de las funciones de la sub-base es disminuir el espesor de la base y capa asfáltica, a su vez sirve también como capa de drenaje, controla los posibles cambios volumétricos que puede llegar a tener la sub-rasante, y al igual que la base controla el bombeo de finos. El material más común y que se usa como sub-base es el lastre.

En los pavimentos rígidos tiende a excluirse del diseño esto cuando la sub-rasante de terreno presenta muy buenas características permitiendo un ahorro de gastos. Según el CR-2010 el ensayo de CBR es de 30,00 % como mínimo, un índice de plasticidad entre 4,00-10,00 y una compactación al 95,00 %.

Sub-rasante

Es el suelo natural que sirve como cimiento de la estructura de pavimento, se puede hacer una sustitución de material cuando el existente no cumpla con las funciones de diseño o hacer una estabilización según la naturaleza del suelo, se pueden realizar estabilizaciones mecánicas, químicas, estabilización con geosintéticos u otros.

El objetivo de la sub-rasante es permitir el soporte de las cargas de tránsito y ambiente que son transmitidas en menor intensidad por las capas superiores sin exceder la capacidad de soporte del suelo. Para determinar la capacidad de soporte de la sub-rasante se deben de hacer pruebas de CBR o pruebas como el SPT o DCP.

Ensayos capacidad de soporte

Índice Soporte de California (CBR)

El ensayo CBR (California Bearing Ratio su nombre en inglés) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo para evaluar la calidad del terreno para la base, sub-base y sub-rasante. En este ensayo se

mantienen controladas las condiciones de humedad y de densidad.

La prueba consiste en compactar una muestra de terreno en moldes normalizados, sumergirlos en agua por unos días, aplicar una carga sobre los moldes mediante un pistón y medir la penetración, esto se gráfica y se mide los valores de carga que soportaba el suelo cuando el pistón se hunde a diferentes profundidades. La norma que rige este ensayo es la ASTM D1883-16 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR).

Penetrómetro cono dinámico (DCP)

Es usado como ensayo de campo para determinar las propiedades estructurales de los materiales que componen un pavimento. Su principio se basa en dejar caer un peso de 8,00 kg sobre un cono el cual penetra el suelo hasta una profundidad máxima de 2,00 m. La duración de esta prueba es muy corta, el ensayo provee una herramienta eficaz para la obtención de información que normalmente requiere la excavación de pozos de sondeo.

Las gráficas de este ensayo permiten determinar el número y el espesor de capas existente de la estructura de pavimentos, y a partir de los resultados obtener el CBR "in situ" y se correlaciona con los CBR de laboratorio, además resulta un ensayo más económico en comparación al ensayo CBR. Este ensayo se encuentra regulado por la norma ASTM D6951M-18 Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications.

Diseño de Pavimentos

El diseño de pavimentos ha ido evolucionando con el pasar de los años simplificando cada día el método a usar; según Corredor (2008) el desarrollo de los métodos de diseño se divide en tres etapas:

- Primera etapa: antes de la II Guerra Mundial.
- Segunda etapa: después de la II Guerra Mundial hasta 1988.
- Tercera etapa: a partir de 1988 hasta la actualidad.

Fue en la segunda etapa donde se decidió usar los llamados Ensayos de Carreteras, los cuales eran modelos a escala natural que han servido como base para los métodos de diseño, el principal de estos es el experimento vial de la AASHO en

Estados Unidos, se construyó en 1956 cerca de Ottawa, Illinois seis tramos con el objetivo de obtener los parámetros necesarios referentes al comportamiento y deterioro de los pavimentos tanto flexibles como rígidos. En 1958 empezaron con las pruebas en los tramos construidos, en 1960 se analizan los datos obtenidos de todas las pruebas realizadas y en el año de 1962 se obtiene la primera guía provisional para el diseño de pavimentos Corredor (2008).

Fue revisada en el año de 1972 en función de la experiencia que fue acumulada tanto de éxitos como de fracasos, esta revisión dio origen a la Guía AASHTO-72 la cual consideraba el factor tránsito. En 1986 se revisa la guía formulada en 1972 para dar origen a la nueva versión del método AASHTO "Guías para el Diseño de Pavimentos", en esta nueva guía se ejecutan cambios sustanciales con respecto a la metodología.

Metodología AASHTO-93

Con el pasar de los años la AASHTO fue mejorando sus metodologías de diseño conforme al éxito y fallas que tenían sus guías al tal punto que en 1993 se revisó la guía de 1986 dando origen a la Guía AASHTO 1993 usada actualmente para el diseño de los pavimentos y en el año de 1998 se incorporan los conceptos mecánicos a la guía.

El objetivo principal de esta guía y las anteriores es calcular los espesores mínimos que deben de tener las capas que componen una estructura de pavimento conforme a los aspectos de diseño que esta toma en consideración, dichas variables son las siguientes:

Ejes equivalentes (W_{18})

Los ejes equivalentes se definen como el número de pasadas o repeticiones de ejes equivalentes simples / duales de 8.200,00 kg (18,00 kips) para un periodo de diseño, los ejes equivalentes se usan por efecto de cálculo, ya que el tránsito en las carreteras se compone de distintos tipos de vehículos con diferente peso y número de ejes.

En la ecuación de la metodología AASHTO-93 se simboliza como W_{18} ; para su cálculo se debe de determinar el tránsito promedio diario, utilizar factores de equivalencia, así como factores de crecimiento.

Tránsito promedio diario (TPD)

El tránsito promedio diario (TPD) corresponde a la cantidad promedio de vehículos que circulan por día en un tramo de carretera, esta cantidad aumenta dependiendo del crecimiento poblacional de la zona donde se realice el diseño, para poder determinar el TPD se puede hacer de dos maneras la primera es de forma manual y la segunda es usando equipo especializados que son colocados en carretera.

Factor Camión

Según Castro (2019) el término de factor camión se define como la cantidad de ejes equivalentes simples de 8.200,00 kg que representan en promedio una pasada de un tipo de vehículo particular. Existen un factor camión para cada uno de los diferentes tipos de vehículos si estos no se emplean no se estarían contemplando el daño que ocasiona cada uno de los vehículos a la estructura de pavimento.

Factor expansión

Es usado para aumentar el tránsito promedio diario considerando un aumento de este ya cuando las rutas se hayan intervenido.

Factor crecimiento

Este factor toma en consideración la tasa de crecimiento del lugar donde se realizan las proyecciones de TPD. En Costa Rica el MOPT ha formulado documentos los cuales permiten obtener las tasas de crecimiento de las rutas nacionales, esto con base en la información del tráfico vehicular de las estaciones de conteo vehicular que poseen en las vías. Para el cálculo del factor crecimiento se usa la siguiente ecuación:

$$F. Crec = \frac{(1 + g)^n - 1}{g} \quad (1)$$

Donde:

- g : tasa de crecimiento (%).
- n : periodo de diseño (años).

Factor carril

El factor carril toma en cuenta el número de carriles en el sentido del carril de diseño o crítico, el cual es el carril donde se espera la circulación de mayor número de cargas de diseño. Si el pavimento posee un carril por sentido el factor carril es de 1,00, si hay más de un carril por sentido el factor cambia, en el apartado 2.1.2 del capítulo II de la AASHTO-93 se encuentran los porcentajes de factor carril para diferentes casos.

Factor dirección

Este factor toma la distribución vehicular en cada carril, si los cálculos de los ejes equivalentes se basan en un único TPD es necesario determinar los ejes equivalentes por sentido, por su parte si no hay información de TPD y de la distribución vehicular se considera una distribución de 50,00 % / 50,00 %. (Castro, 2019).

Periodo de diseño

Tiempo que dura el pavimento en uso, durante ese tiempo se realizan trabajos de mantenimiento para que el pavimento no se vea afectado drásticamente, cuando se cumple este periodo de diseño se pueden realizar trabajos de rehabilitación para poder extender el mismo.

Índice de Servicialidad (PSI)

Coronado (2002) define el índice de servicio como “el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo” (p.43). El índice de servicio inicial representa la primera condición del pavimento, este mismo disminuye con el pasar del tiempo y se ve disminuido por las fallas y deterioros a las que estará sometida la estructura de pavimento llegando al índice de servicio final. La diferencia entre estos se conoce como el cambio de índice de servicio (Δ PSI).

Número estructural (SN)

Número que representa la capacidad que tiene la estructura de pavimento, para soportar las cargas impuestas durante el periodo de diseño. Existen un número estructural para las capas de la sub-base,

base y superficie de ruedo, para su cálculo dependen del coeficiente estructural y del coeficiente de drenaje.

Coeficiente estructural (a_i)

Se encuentra en función de la resistencia y rigidez del material, el objetivo de este es preservar la resistencia estructural conforme el pavimento es cargado para los pavimentos flexibles. Existe un coeficiente estructural para la capa asfáltica, base y sub-base y están en función de sus módulos de rigidez o de sus CBR para las bases y sub-bases.

En la guía de diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO-93 se obtiene los coeficientes estructurales a partir de nomogramas hechos con base en los resultados de las pruebas de la AASHTO de 1962.

Coeficiente de drenaje

Es la capacidad de drenaje que tiene una estructura de pavimento, únicamente las capas de la base y sub-base poseen coeficiente de drenaje. Depende de dos parámetros, la capacidad del drenaje (tiempo que tarda el agua en ser evacuada del pavimento) y el porcentaje de tiempo en el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.

La AASHTO-93 define cinco clasificaciones de drenaje: excelente, muy bueno, bueno, malo y muy malo, cada uno tiene diferentes coeficientes de drenaje según el porcentaje de tiempo. Este coeficiente se presenta con la letra “m” para los pavimentos flexibles y con “cd” para los pavimentos rígidos.

Nivel de confianza (R)

Probabilidad de que un pavimento pueda mantener un nivel de servicio óptimo sin que se vea excedido el número de aplicaciones de carga durante el periodo de diseño AASHTO (1993). Para el valor del nivel de confianza se toma en cuenta la importancia de la vía y el tipo de ruta (primaria, secundaria o terciaria).

En cierto modo el nivel de confianza es un factor de seguridad, ya que toma en cuenta que todos los elementos van a tener un nivel de dispersión y esto hace que aumente el valor de los elementos siguiendo conceptos estadísticos que

consideran una distribución normal de las variables involucradas (Duravía, 2012).

Desviación estándar (S_o)

La desviación estándar es la diferencia o dispersión que fue añadida por la AASHTO debido a las variaciones con el tránsito y otros factores que pueden afectar el desempeño de la estructura de pavimento. Para el caso de los pavimentos flexibles y semi-rígidos la desviación estándar es de 0,45 y para los pavimentos rígidos es de 0,35.

Desviación estándar normal (Z_r)

La desviación estándar normal o estadístico Z se refiere a la probabilidad que las cargas de diseño superen el PSI terminal (Castro, 2019).

Coefficiente transferencia de carga (J)

Es usado en los pavimentos rígidos y se usa con el fin de determinar la capacidad del pavimento para transferir cargas a través de juntas y fisuras. La transferencia de cargas depende de los tipos de juntas, el tipo de espaldón y el tipo de pavimento rígido.

Módulo resiliente (MR)

Es la magnitud o razón entre el esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable, para su cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}} \quad (2)$$

Donde:

σ_d : esfuerzo desviador (kg/cm² o psi).

ϵ_{axial} : deformación axial.

Para la obtención del módulo resiliente es bajo la acción de cargas cíclicas que después de un cierto número de ciclos de carga el módulo es casi constante y la respuesta del suelo es del tipo elástica, a ese módulo constante se le llama módulo resiliente (Garnica, Pérez & Gómez, 2001).

Es de suma importancia en el diseño de una estructura de pavimento, ya que permite

caracterizar las propiedades de resistencia de las capas que componen el pavimento. Existen diversas formas de obtener el MR de los suelos, ensayos de manera directa, pero en Costa Rica solo el LanammeUCR posee el equipo para realizar estos ensayos, otra manera es mediante correlaciones usando los datos del ensayo CBR, Triaxial y otros.

Módulo de reacción (k)

También conocido como coeficiente de balasto, para determinar su valor se realiza una prueba en campo donde se mide la deformación total de un material asociada con la aplicación de un esfuerzo de compresión, a esta prueba se le llama la prueba del plato de carga.

El módulo de reacción es la razón entre el esfuerzo aplicado por la placa y la deformación generada por dicho esfuerzo, en otras palabras, es la pendiente de la recta entre el origen de las coordenadas con el punto de la curva de la gráfica de esfuerzo vs deformación. Como el ensayo es en campo se hacen correcciones para considerar las condiciones más desfavorables de los suelos.

$$k = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

Donde:

σ : esfuerzo aplicado a la placa (kg/cm² o psi).

ϵ : deformación generada por el esfuerzo.

Este módulo depende del módulo de rigidez de la sub-rasante, del módulo de rigidez de la base o sub-base y del espesor de la base o sub-base.

Módulo de ruptura (S_c)

Es la tensión máxima que un espécimen como una viga puede soportar en una prueba de flexión en dos tercios de su largo hasta romperse, es muy común usar un módulo de ruptura mínimo porque se considera que el módulo va a ser excedido en al menos 90,00 % del tiempo (Castro, 2019).

Este módulo se puede calcular de dos maneras, la primera es la formulada por el ACI-230.1R-09 y es usada para las bases estabilizadas con cemento y la segunda es la relación entre el módulo resiliente y el módulo de ruptura esto por la compañía ERES Consultant en 1987, usado para el cálculo del S_c del concreto hidráulico:

$$S_c = 0,51 * f'c^{0,88} \quad (4)$$

$$S_c = \frac{43,5 * MR}{10^6} + 488,5 \quad (5)$$

Donde:

$f'c$: compresión del concreto 28 días (psi).

MR : módulo resiliente del concreto (psi).

Metodología Mecánica-Empírica

El diseño de la estructura de pavimentos fue realizado por muchos años por métodos empíricos como lo fue el desarrollado por la AASHTO basados en los resultados de la prueba de la AASHTO explicada anteriormente.

A pesar de que el uso de la metodología empírica demostró buenos resultados muchos diseñadores cuestionaron el método aplicado por la AASHTO 93, para Loria (2013) esto se debe a que muchos de los diseños realizados con la guía de 1993 no poseían una adecuada relación entre el desempeño posterior de los pavimentos en servicio, abonado a esto los cambios en las tecnologías de los materiales eran sumamente difícil de incorporar a la metodología tradicional en ese entonces. Ante esta situación la AASHTO se dedica a desarrollar un método mecánico en el cual el diseño de los pavimentos se basa en los principios fundamentales de esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones (Corredor, 2008).

En el 2008 la AASHTO publica la Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica, (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide MEPDG en inglés), permite utilizar las reacciones del pavimento para predecir la vida que este tendrá basado en las observaciones de campo.

Esta fue muy acertada en los Estados Unidos específicamente en el estado de Illinois, pero en otras partes del mundo las personas observaron diversos impedimentos de la nueva guía, uno de estos fue el costo que tenía el software desarrollado, además de las diferencias con respecto a las condiciones locales de otras regiones distintas al país de origen en factores como el clima, las propiedades de los materiales y tránsito, en este último la MEPDG usa 13 categorías de vehículos mientras que otros países como Brasil usan más de 30 tipos de vehículos para el diseño de pavimentos (Loria, 2013).

De esta forma el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) se dedicó a la calibración de la guía para su uso en Costa Rica según las condiciones y necesidades nacionales, para ello desarrolló el programa CR-ME®, el cual es un programa de análisis de pavimentos que permite calcular el desempeño del pavimento a las cargas aplicadas por los vehículos, basados en la teoría de multicapa elástica y en modelos de predicción del desempeño de pavimentos desarrollados por el mismo LanammeUCR (Trejos, Aguiar & Loria, 2016).

En este programa, así como los que aplican la Metodología Mecánica-Empírica incluyen una serie de aspectos generales que son importantes para el correcto análisis de las estructuras diseñadas. Los principales valores de entrada que debe de introducir el diseñador son el tránsito, en este se podría usar el cálculo de los ejes equivalentes o espectros de carga que permitan al programa realizar el cálculo de éstos.

El segundo valor es el clima, pues los pavimentos son muy afectados por las condiciones climatológicas. Costa Rica presenta variaciones en la temperatura y la humedad según la época del año y del lugar en estudio, la humedad afecta las capas como las base, sub-base y sub-rasante y la temperatura afecta la capa asfáltica, el CR-ME® usa el índice de Thornwaite para afectar el módulo resiliente de las capas no ligadas. El índice de Thornwaite permite clasificar los distintos tipos de climas teniendo en cuenta el clima que afecta el suelo y a la planta, es decir la evaporación, transpiración y el agua disponible en el suelo (Andrades, 2017).

El tercer valor son las características de los materiales como los espesores, porcentajes pasando, la relación de Poisson, gravedad específica, humedad, densidad, entre otros. Uno de los parámetros más importante en este aspecto de los materiales es el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, el cual se define según Leiva (2004) como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, depende de la temperatura y la velocidad de aplicación, se puede determinar gracias a ensayos de laboratorio como el ensayo de módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente o el ensayo del módulo resiliente de mezcla asfálticas a tensión indirecta.

Se pueden emplear correlaciones también para poder determinarlo como la de Bonnaure, la de Heukelom y Klomp y la de Witczak. Los ensayos

permiten considerar todas las características del sitio para el cual se diseña la mezcla, por su parte con el uso de las correlaciones los resultados pueden variar, ya que no son consideradas todas las características, pero el proceso es más sencillo y corto.

En el LanammeUCR formularon una correlación a partir de la ecuación de Witczak llamada Witczak-Lanamme, la cual toma en cuenta las cargas, el contenido de vacío de la mezcla, así como los porcentajes pasando de los tamices 3/4", 3/8", N° 4 y N° 200, así como la viscosidad, actualmente el CR-ME ® usa tres modelos para el cálculo del módulo dinámico Witczak, ANN-Lanamme y Witczak-Lanamme, dicha ecuación es la siguiente:

$$\frac{\log(E^*)}{\alpha} = \delta + \frac{\log(f) - 0,691856 \log(\eta)}{1 + e^{0,052941 - 0,498163 \log(f) - 0,691856 \log(\eta)}} \quad (6)$$

Donde:

$$\alpha = 2,399557 + 0,00820\rho_4 - 0,013420\rho_{3/8} + 0,000261(\rho_{3/8})^2 + 0,005470\rho_{3/4} \quad (7)$$

$$\delta = 5,535833 + 0,002087\rho_{200} - 0,000566(\rho_{200})^2 - 0,002590\rho_4 - 0,078763V_a - 1,865947 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \quad (8)$$

E^* = módulo dinámico (psi).

f = frecuencia de carga (Hz).

V_a = contenido de vacíos de aire (%).

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

ρ_4 = retenido acumulado en el tamiz N° 4 (%).

$\rho_{3/8}$ = retenido acumulado en el tamiz 3/8" (%).

$\rho_{3/4}$ = retenido acumulado en el tamiz 3/4" (%).

ρ_{200} = retenido acumulado en el tamiz N° 200 (%).

η = viscosidad del asfalto.

$$\eta = \frac{G}{10} * \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4,8628} \quad (9)$$

Modelos de desempeño para pavimentos

Para Leiva (s.f) los modelos de desempeño permiten conocer el comportamiento de la estructura de pavimento debido a la aplicación de cargas de tránsito y ambientales. Los modelos de la MEPDG y programas como el CR-ME ® brindan parámetros de respuestas con relación a los

esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos dentro de las capas.

El CR-ME ® permite calcular los modelos de desempeño según la MEPDG o que el usuario los pueda definir para el caso de los pavimentos flexibles y semi-rígidos los modelos de desempeños según la MEPDG son:

Capa Asfáltica

Se mide el agrietamiento tanto de arriba hacia abajo, como de abajo hacia arriba, según Arias (2014) la ecuación del agrietamiento permite estimar la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar un 100,00 % de daño en un pavimento asfáltico, considerando el factor de ajuste de laboratorio a campo:

$$N_f = 0,0432 * k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{CA})^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (10)$$

Donde:

$$C = 10^{4,84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right]} \quad (11)$$

Abajo hacia arriba

$$C_H = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * h_{ac})}}} \quad (12)$$

Arriba hacia abajo

$$C_H = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 * h_{ac})}}} \quad (13)$$

N_f = repeticiones de agrietamiento.

ε_t = deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (in/in).

E = módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).

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

V_a = porcentaje de vacíos (%).

V_b = contenido de asfalto efectivo (%).

$k_{f1} = 0,007566$

$k_{f2} = -3,9492$.

$k_{f3} = -1,281$.

$\beta_{f1} = \beta_{f2} = \beta_{f3} =$ constantes de calibración = 1,00.

También es usada la ecuación del oficio DVOP-5170-07 del Ing. Pedro Castro para obtener las repeticiones de carga en la capa asfáltica de los pavimentos semi-rígidos.

$$N_f = 1,0266 \times 10^{25} * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{6,308} * \left(\frac{1}{MR}\right)^{0,810} \quad (14)$$

Donde:

N_f = repeticiones de agrietamiento.

ε_t = deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica ($\times 10^6$ mm / mm).

MR = módulo resiliente concreto asfáltico (kPa)

Para poder estimar el daño por fatiga a través del tiempo es necesario usar la ley de Miner, esta permite determinar el daño de las cargas en cada año del periodo de diseño.

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (15)$$

Donde:

T = periodo (años).

n_i = tráfico actual del periodo i .

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

El ahuellamiento en la capa asfáltica se calcula de la siguiente manera según la MEPDG

$$\Delta_{P(CA)} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_r(CA) * 10^{K_{1r}} * n^{K_{2r} \beta_{2r}} * T^{K_{3r} \beta_{3r}} * h_{ac} \quad (16)$$

Donde:

$$k_1 = (C_1 + C_2 d) - 0,328196^d \quad (17)$$

$$C_1 = -0,1039(h_{ac})^2 + 2,4868h_{ac} - 17,342 \quad (18)$$

$$C_2 = 0,0172(h_{ac})^2 - 1,7331h_{ac} + 27,428 \quad (19)$$

n = número de repeticiones de carga.

T = temperatura de capa (°F).

d = profundidad media de la capa (in).

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

ε_r = deformación elástica (in/in).

$k_{1r} = -3,35412$. $k_{2r} = 0,4791$. $k_{3r} = 1,5606$.

$\beta_{1r} = \beta_{2r} = \beta_{3r} =$ constantes de calibración = 1,00.

El MEPDG permite el cálculo del porcentaje de fatiga que puede sufrir la capa asfáltica:

$$FC_{abajo-arriba} = \frac{1}{60} * \left(\frac{C_3}{1+e^{(-C_1 2C_2' + C_2 C_2' \log(D))}}\right) \quad (20)$$

Donde:

$$C_1=1. \quad C_2=1. \quad C_3=6000.$$

$$FC_{arriba-abajo} = 10,56 * \left(\frac{C_3}{1+e^{(C_1 - C_2 \log(D))}}\right) \quad (21)$$

Donde:

$$C_1=7,00. \quad C_2=3,50. \quad C_3=1000,00.$$

Base y Sub-base

Para la base y sub-base la ecuación para el cálculo del ahuellamiento es el mismo sin importar si el material es granular o granular fino.

$$\Delta_{P(suelo)} = \frac{\beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{suelo} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right)}{e^{\left(\frac{\rho}{n}\right)^\beta} \quad (22)$$

Donde:

ε_v = deformación unitaria vertical promedio (in/in).

ε_0 = deformación permanente de carga laboratorio (in/in).

ε_r = tensión elástica en pruebas (in/in).

n = número de repeticiones de carga.

h = espesor de subcapa (in).

$k_{s1} = 1,673$ (suelo granular).

$k_{s1} = 1,35$ (suelo fino).

β_{s1} = constante de calibración = 1.

En caso de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) el CR-ME ® usa el modelo de la PCA que brinda las repeticiones necesarias para alcanzar el daño por fatiga:

$$N_f = 10^{\left[\frac{k_{c1} \beta_{c1} - \frac{\sigma_s}{M_r}}{k_{c2} \beta_{c2}} \right]} \quad (23)$$

Donde:

N_f = repeticiones a la falla por fatiga.

σ_s = esfuerzo por tensión en la parte inferior de la capa estabilizada (psi).

M_r = módulo de ruptura a los 28 días (psi)

$k_1 = 0,972$.

$k_2 = 0,0825$.

$\beta_{c1} = \beta_{c2} =$ constantes de calibración = 1,00.

Sub-rasante

Para la sub-rasante la ecuación para el cálculo del ahuellamiento es el mismo sin importar si el material es granular o granular fino.

$$\delta = \left(\frac{1 - e^{-k * h_{roca}}}{k}\right) * \varepsilon_{p,z=0} \quad (24)$$

Donde:

$$k = \frac{1}{6} \ln \left(\frac{\varepsilon_{P,Z=0}}{\varepsilon_{P,Z=6}} \right) \quad (25)$$

$\varepsilon_{P,Z}$ = deformación unitaria permanente a la profundidad z (in/in).

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

$k_{s1} = 1,673$ (suelo granular).

$k_{s1} = 1,350$ (suelo fino).

β_{s1} = constante de calibración = 1,00.

Para el caso de los pavimentos rígidos existen muchos modelos que permiten estudiar el comportamiento de la estructura, para este trabajo se analizan los resultados de los esfuerzos y deformaciones de las estructuras rígidas mediante los modelos de bombeo y erosión y el modelo de escalonamiento de Yang Huang, así como el modelo de fatiga del Ingeniero Sukti Monge Morales.

Modelo de escalonamiento

El escalonamiento es el desnivel que existen entre dos superficies de pavimento rígidos separados por una junta del tipo transversal o una grieta, se da debido a una excesiva deflexión en los bordes de las losas debido a la erosión y bombeo de material granular de las capas inferiores de la estructura de pavimento, por las repetidas aplicaciones de cargas pesadas y una mala transferencia de estas entre las losas (Navarro, 2017).

El máximo escalonamiento según las AASHTO (2008) es de 0,12 in (0,30 cm). Yang Huang (2004) en su libro Pavement Analysis and Design define una ecuación para el cálculo de escalonamiento:

$$F = (N_{18})^{0,5377} [2,2073 + 0,002171(S)^{0,4918} + 0,0003292(JS)^{1,0793} - 2,1397(k)^{0,01305}] \quad (26)$$

Donde:

F = escalonamiento (in).

N_{18} = ejes equivalentes simples de 18.000,00 lb (millones).

S = esfuerzo máximo (psi).

JS = espaciamiento entre juntas transversales (ft).

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

Modelo de bombeo y erosión

El fenómeno de bombeo y erosión es el movimiento del agua que se encuentra por debajo de la losa de concreto o su eyección hacia la superficie debido a la presión de las cargas de tránsito.

La presencia de agua, la velocidad a la que se expulsa el agua debajo de la losa, la capacidad de erosión del material de la subbase, la magnitud y el número de cargas repetidas y la cantidad de desviación, son algunas de las causas más frecuentes de este fenómeno (Huang, 2004). La escala del índice de bombeo es 0,00 – 1,00 representa que no hay bombeo, 1,00 – 2,00 representa severidad baja, 2,00 – 3,00 severidad media y más de 3,00 severidad alta. Las ecuaciones para calcular este fenómeno en los pavimentos rígidos JPCP y JRCP respectivamente son:

$$PI = (N_{18})^{0,443} [-1,479 + 0,255(1 - S) + 0,0605(P)^{0,5} + 52,65(H)^{-1,747} + 0,0002269(FI)^{1,205}] \quad (27)$$

$$PI = (N_{18})^{0,670} [-22,82 + 26102,2(H)^{-5} - 0,129(D) - 0,118(S) + 13,224(P)^{0,0395} + 6,834(FI)^{0,00805}] \quad (28)$$

Donde:

PI = índice de bombeo (in).

N_{18} = ejes equivalentes simples de 18.000,00 lb (millones).

S = tipo de suelo según la AASHTO: 0 para suelos gruesos (A-1 / A-3) y 1 para suelos finos (A-4 / A-7).

P = precipitación anual (cm).

H = espesor de losa (in).

FI = índice de congelación.

Modelo de fatiga

La fatiga es el fenómeno que ocurre cuando el material falla por la repetición de las cargas de tránsito, puede provocar un daño estructural. Existen muchos modelos para calcular la fatiga en los pavimentos rígidos, uno de los más usados es el modelo propuesto por el Ingeniero Sukti Monge Morales de la Universidad de Costa Rica, él propuso la siguiente ecuación para calcular dicho fenómeno:

$$\log(N) = \log(5,451) - 24,6 \log(SR) \quad (29)$$

Donde:

N = número de repeticiones de carga hasta la fatiga.

SR = relación de esfuerzo.

$$SR = \frac{\sigma}{MR} \quad (30)$$

σ = esfuerzo máximo en la losa (psi).

MR = módulo de ruptura del concreto a los 28 días (psi).

Conservación de la estructura de pavimentos

Los caminos y la red vial son fundamentales para el funcionamiento de la economía del país, la preservación de estos permite mantener y aumentar los beneficios a lo largo y ancho de Costa Rica.

Las entidades responsables de los caminos carreteras y calles deben reconocer que la conservación es importante, el financiamiento y la administración juegan un papel primordial, hoy en día la conservación no es la adecuada debido a problemas de organización, la falta recursos y de cultura en el mantenimiento de los pavimentos por parte de la ciudadanía.

Existen diversos tipos de mantenimientos para la estructura de pavimentos, esto con el fin de mantener la vida útil de los mismos, a su vez existen los trabajos de rehabilitación como los de reconstrucción dependiendo del grado de daño que tenga un pavimento.

En la siguiente figura se muestra en qué momento del periodo de diseño es conveniente realizar un mantenimiento, una rehabilitación o una reconstrucción según el nivel del PSI y los años de vida de la estructura.

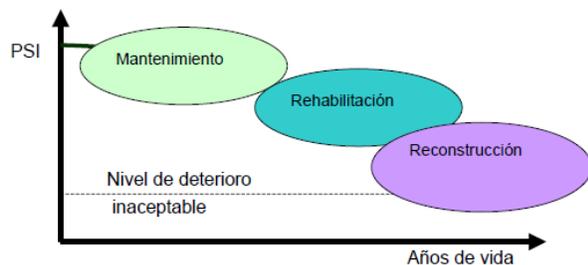


Figura 10. Tipo de intervención según el nivel de PSI y años de vida de la estructura de pavimento.

Fuente: Castro (2019).

Mantenimiento rutinario

Este tipo de mantenimiento comprende aquellas obras que se realizan para conservar la estructura en buen estado, estas obras se ejecutan varias veces al año, como la limpieza de alcantarillas, cunetas, limpieza de zonas verdes, además de aquellas labores para la recuperación de daños menores como lo son barandales de puentes, señalización vertical y horizontal, muros de retención entre otras.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo considera aquellas acciones para proteger y corregir fallas sin ningún aporte estructural al pavimento, consiste en actividades y obras de mantenimiento destinadas a prevenir fallas defectuosas o de alto riesgo antes de que estas sucedan a mayor escala.

Dentro de las acciones que se aplican en este tipo de mantenimiento destacan sellado, bacheo, nivelación en áreas pequeñas del pavimento, debe de iniciarse apenas el pavimento presente síntomas de falla.

Mantenimiento correctivo

Como su nombre lo dice es un tipo de mantenimiento para corregir aquellas fallas que ya tiene un grado de deterioro considerable en el pavimento y afectan de una manera más directa al usuario, ya que se ve disminuido el servicio, esto con el fin de evitar que aumenta aún más el deterioro detectado.

El mantenimiento correctivo se aplica en un tramo de vía o en una sección importante y se emplean acciones como tratamientos superficiales, colocación de capa asfáltica, remoción, nivelación entre otros, a diferencia del mantenimiento preventivo las acciones en este mantenimiento si pueden llegar a aportar en la parte estructural del pavimento.

Rehabilitación

También es conocido en otras partes del mundo como reforzamiento, se da cuando en la estructura de pavimento empieza el deterioro estructural y se requiere ampliar el periodo de diseño, es muy común que la rehabilitación se de en tramos cortos.

El objetivo primordial de la rehabilitación es la ejecución de actividades constructivas y necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a como fue construida originalmente. Por lo general se realizan pruebas para establecer el estado, la capacidad estructural y las deformaciones que presenta el pavimento para determinar si es necesario una rehabilitación o algo mayor; la rehabilitación puede ser temprana cuando se colocan sobrecapas de 5,00-10,00 cm y es tardía cuando se realizan trabajos de sustitución o estabilización de base o sub-base más una sobrecapa de 10,00 cm.

Reconstrucción

La reconstrucción se define como la renovación completa de la estructura de pavimento con previa demolición o parcial del mismo, se puede recuperar parte de los materiales de las capas o eliminar el material por completo. Se intervienen todas las capas del pavimento para reproducir la capacidad de carga original, se presenta cuando existe una falla estructural o cuando el pavimento ha alcanzado un índice de servicio menor a dos.

Fallas en un pavimento

Existen dos tipos de fallas para cualquier tipo de pavimento, estas se clasifican en fallas estructurales y fallas funcionales.

Falla funcional

Es cuando el pavimento deja de ser cómodo y seguro para los usuarios, abonado a esto los costos de transporte y de operación son excesivos (Castro, 2019).

Falla Estructural

En este tipo de falla los esfuerzos o cargas generadas por el tránsito y ambiente sobre el suelo exceden la capacidad de soporte, se da un deterioro significativo en todas las capas del pavimento en especial en las capas superiores (Castro, 2019).

Deterioros en un pavimento

Los deterioros que pueden afectar el uso de pavimento son muy variados, estos se clasifican

según el tipo de pavimento, un mismo deterioro puede presentarse en diferentes tipos de pavimentos, los más comunes en los pavimentos flexibles y semi-rígidos según el MOPT (2016) son:

Cuero de lagarto

Son grietas que se encuentran conectadas debido a la fatiga, inician en el fondo de la capa asfáltica hacia la superficie, se da únicamente en áreas donde el tránsito es muy repetitivo como las huellas de estos.



Figura 11. Cuero de lagarto.
Fuente: MOPT (2016).

Grietas longitudinal y transversal

Las longitudinales son paralelas a la línea de centro del pavimento y las transversales se encuentran en la dirección del tránsito.



Figura 12. Agrietamiento longitudinal.
Fuente: MOPT (2016).

Roderas o Ahuellamiento

Depresión en las huellas del vehículo, por una deformación permanente de cualquier capa, generalmente su causa es debido a la consolidación o movimiento lateral de los materiales.



Figura 13. Ahuellamiento.
Fuente: MOPT (2016).



Figura 16. Hinchamiento.
Fuente: MOPT (2016).

Abultamientos y hundimientos

Los abultamientos son desplazamientos pequeños hacia arriba de la capa asfáltica, los hundimientos son desplazamientos abruptos hacia abajo.



Figura 14. Hundimiento.
Fuente: MOPT (2016).

Depresiones

Son áreas localizadas ligeramente más bajas que la superficie del pavimento.



Figura 15. Depresión.
Fuente: MOPT (2016).

Hinchamiento

Los hinchamientos son un tipo de abultamiento de la superficie del pavimento creando una onda larga de más de 3,00 m, una causa de esto pueden ser los suelos expansivos.

Exudación

Película delgada de ligante asfáltico en la superficie, crea un pequeño reflejo, suele ser pegajosa.



Figura 17. Exudación.
Fuente: MOPT 2016

Pulimiento de agregados

Está presente si al ejecutar una inspección visual se pueden observar agregados por encima de la capa asfáltica o no son suficientemente angulares ásperos.



Figura 18. Pulimiento de agregados.
Fuente: MOPT (2016).

Baches

Área de pavimento que ha sido reemplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente, siempre es considerado un defecto no importa su desempeño y estado.



Figura 19. Bacheo.
Fuente: MOPT (2016).



Figura 22. Agrietamiento lineal.
Fuente: MOPT (2016).

Huecos

Son depresiones en la superficie, poseen forma de tazón, usualmente el diámetro es menor a 75,00 cm.



Figura 20. Hueco.
Fuente: MOPT (2016).

Grieta por contracción

Son grietas finas que no se extienden en toda la losa, ni en todo el espesor, menores a 2,00 m.



Figura 23. Grieta por contracción.
Fuente: MOPT (2016).

Desgaste Superficial

Desgaste de la matriz de agregado fino y ligante asfáltico.



Figura 21. Desgaste superficial.
Fuente: MOPT (2016).

Losa dividida

Son aquellas grietas que dividen la losa en 4 o más partes.



Figura 24. Losa dividida.
Fuente: MOPT (2016).

Para los pavimentos rígidos el MOPT (2016) determinó los siguientes deterioros como los más comunes para un pavimento de este tipo:

Agrietamiento Lineal

Grietas que dividen la losa en 2 o 3 piezas.

Daño en el sello de junta

Aquellas condiciones en el sello que permita la acumulación de material en las juntas y que permita el paso del agua a las capas inferiores.



Figura 25. Daño en el sello de junta.
Fuente: MOPT (2016).

Fracturas de esquina

Fractura de la losa a 0,50 m de la esquina de la losa, se alinean para intersecar la junta.



Figura 26. Fractura de esquina.
Fuente: MOPT (2016).

Fracturas de juntas

Fractura en los bordes de la losa de 5,00 cm aproximadamente de grosor.

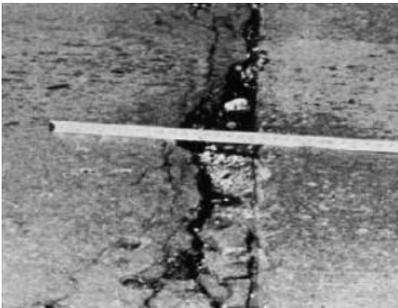


Figura 27. Fractura de junta.
Fuente: MOPT (2016).

Desprendimientos de agregados

Desprendimiento de algunas piezas de agregado grueso, dejan un hueco con diámetros de

generalmente entre 25,00 – 100,00 mm y profundidades entre 13,00 – 50,00 mm.



Figura 28. Desprendimiento de agregado.
Fuente: MOPT (2016).

Escalonamiento Calzada-Junta

Diferencia que hay entre la elevación de una junta y la losa.



Figura 29. Escalonamiento entre calzada y junta.
Fuente: MOPT (2016).

Bombeo

Salida del material de fundación que se encuentra en la base a través de juntas o grietas.



Figura 30. Bombeo.
Fuente: MOPT (2016).

Estado de los pavimentos

Para determinar el estado de los pavimentos es muy común que se usen índices, estos son usados para estudiar la condición visual, estructural y de servicio que presenta cada tramo del pavimento.

Índice de servicialidad (PSI)

Fue determinado durante las pruebas en el tramo experimental de la AASHO, a partir de un panel de individuos los cuales clasificaron el índice de servicialidad en una escala del 0,00 a 5,00, siendo 5,00 para los pavimentos en perfecto estado y 0,00 para aquellos pavimentos que se encuentren en pésimas condiciones. Éste ha sido correlacionado con mediciones de aspecto en el mismo pavimento como menciona Castro (2019):

- Agrietamiento: área cubierta por grietas medido en ft² por cada 1000,00 ft² de área.
- Baches: área cubierta por baches, medido en ft² por cada 1000,00 ft² de área.
- Roderas: se selecciona la mayor de las roderas por sección transversal y se promedia los valores en el sentido longitudinal.
- Rugosidad: desviación de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana.

$$SV = s^2 \quad (31)$$

Existen dos ecuaciones para medir el PSI para pavimentos flexibles y para pavimentos rígidos respectivamente:

$$PSI = 5,03 - 1,91 * \log(1 + SV) - 1,38 * \frac{1}{(\overline{RD})^2 - 0,01 * (C + P)^{0,5}} \quad (32)$$

$$PSI = 5,41 - 1,78 * \log(1 + SV) - 0,09 * \frac{1}{(C + P)^{0,5}} \quad (33)$$

Donde:

SV = rugosidad.

\overline{RD} = roderas.

C = área agrietada.

P = área con baches.

El índice de servicio inicial (PSI Inicial) en pavimentos flexibles es de 4,20, para rígidos es de 4,50 y para semi-rígidos ronda entre 4,30 y 4,40, el índice de servicio final (PSI final) ronda entre 2,00 y 3,00.

Índice de condición de pavimento (PCI)

Para Robles (2015) el índice de condición de pavimento es un índice que permite clasificar la superficie del pavimento, se clasifica en una escala del 0,00 al 100,00, siendo el 0,00 un pavimento en mal estado y el 100,00 un pavimento en óptimas condiciones.

Este índice se basa en la observación de la capa de ruedo, en las condiciones de funcionamiento y la integridad superficial. El PCI es usado para determinar el deterioro del pavimento, esto con el fin de identificar las causas principales de mantenimiento, reparación y cuáles son las prioridades para una posterior rehabilitación o una reconstrucción, cabe resaltar que este índice no es usado para medir la capacidad estructural de un pavimento.

Índice de regularidad internacional (IRI)

El índice de regularidad internacional según Badilla (s.f) se define como “un modelo matemático, el cual calcula el movimiento acumulado en la suspensión de un vehículo de pasajeros típico, al recorrer una superficie del camino a una velocidad de 80,00 km/h” (p.3). Para su cálculo se miden las cotas del terreno las cuales representarán el perfil real de trayecto en estudio, el IRI es independiente de la técnica o equipo a usar, depende de la calidad del perfil.

El IRI se mide con una escala estándar generada por el Banco Mundial para la cuantificación de este índice para las diferentes vías, esta escala va de los 0,00 m/km hasta los 20,00 m/km, el alcanzar un IRI igual a 0,00 m/km es muy difícil desde el punto vista constructivo. Conocer el IRI de la superficie de pavimento es importante, ya que permite detectar las acciones de conservación ya sea de mantenimiento, rehabilitación o de reconstrucción necesarias para el buen funcionamiento de la estructura de pavimento.

Costos de construcción

Los costos de construcción de pavimentos es uno de los aspectos más importantes al momento de seleccionar la estructura que se adapte a las necesidades de un proyecto.

Para determinar el costo de una obra de infraestructura vial es importante contar con el alcance y las restricciones que puede tener el proyecto a realizar, también es importante tener actualizado bases de datos de precios de materiales, mano de obra, equipo y maquinaria, rendimientos, recursos disponibles, planos, estudios básicos, entre otros, pues, esto permite obtener un costo de construcción más preciso, si lo que se desea es una estimación inicial no tan precisa es viable usar juicio de expertos y costos de proyectos similares que permitan obtener un costo global.

Comúnmente los precios de los pavimentos varían según el tipo de estructura, por ejemplo los pavimentos flexibles tienen un menor costo inicial, pero el costo del mantenimiento es mayor si se compara con los pavimentos semi-rígidos y rígidos, por su parte, los pavimentos rígidos tienen un costo de inversión mayor, pero un costo de mantenimiento menor, los pavimentos semi-rígidos desde un punto de vista de costos son más factibles para tránsitos pesados que un pavimento flexible, también es importante mencionar que los costos de pavimentos varían por aspectos como los espesores de capa, materiales, equipo, TPD, periodo de diseño entre otros aspectos.

Una diferencia entre los costos de construcción de los pavimentos flexibles y rígidos se encuentra en el material a usar como capa de ruedo, el precio del concreto que es usado como superficie de rodamiento en los pavimentos rígidos es muy estable con el tiempo, la mezcla asfáltica de los pavimentos flexibles por el contrario suele variar de precio según los precios del petróleo a nivel mundial, todas estas diferencias y otras deben de ser tomadas en cuenta a la hora de decidir qué tipo de pavimento usar porque un proyecto se podría encarecer si no se toma en consideración lo mencionado anteriormente.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

Cuando la construcción de una estructura de pavimento se finaliza, esta empieza a sufrir de envejecimiento y a deteriorarse con el pasar del tiempo, ya que la misma se encuentra expuestas a diferentes condiciones climatológicas, cambios de humedad y temperatura, interacción de las cargas de tránsito, debido a estas causas y otras es

importante que en todo proyecto vial exista un plan de conservación de pavimentos,

Un plan de conservación se define como un programa en el cual se detallan las medidas necesarias para la preservación de los pavimentos, así como los recursos y costos para llevar a cabo las medidas respectivas. Si una estructura de pavimento no recibe el tipo de mantenimiento respectivo se encontrará más propenso a sufrir de las fallas y deterioros explicadas anteriormente en esta sección y además de esto no cumpliría con el periodo de diseño establecido.

Determinar si un pavimento se encuentra en buen o mal estado no es una tarea con tanta complejidad, se puede realizar con los índices de conservación o manuales de auscultación, uno de los elementos más difíciles en un proyecto carretero es el desarrollo de un plan de conservación y que este se cumpla por parte de las autoridades respectivas, porque muchas de las medidas y costos de mantenimiento propuestos en el plan van a depender de aspectos como el tipo de pavimento, los vehículos que transitan, el clima, el lugar de ubicación de la vía, así como aspectos administrativos.

Establecer las medidas de conservación y los costos de mantenimiento o rehabilitación en muchas ocasiones no es un proceso sencillo pues depende de criterios de experiencia para determinar qué intervenciones necesita una estructura.

Según el tipo de pavimento a construir las medidas de conservación y costos de mantenimiento son distintos, por ejemplo el costo de mantenimiento de un pavimento flexible es mucho mayor al de un pavimento rígido debido a los materiales que se usan durante su construcción, pues los materiales del pavimento rígido proveen mejores características de resistencia las cuales producen un menor mantenimiento a estas estructuras.

Metodología

El presente proyecto se desarrolló en torno al diseño de tres tipos de estructuras de pavimentos para tres rutas del cantón de Turrialba con el fin de obtener la estructura que mejor se adecúe a las necesidades de la comunidad, para ello se realizaron una serie de pasos los cuales son explicados a continuación:

Visita a campo

Para la realización de dicho proyecto fue necesario la visita a campo a cada una de las rutas con el fin de determinar ciertas características como el largo de la ruta, el ancho del carril, además se realizaron conteos vehiculares y extracción de material para la obtención de los parámetros de diseño, así como el reconocimiento visual del estado actual de

las rutas con respecto a fallas y deterioros presentes en cada una de las secciones.

El primer tramo visitado fue el sector de La Cecilia, este posee un largo de 1.240,00 m, de los cuales 566,00 m corresponden a la carretera principal y los restantes 674,00 m pertenecen a ramificaciones que dan acceso a múltiples hogares (Ver figura 31). El ancho del carril, medido con cinta métrica, en este sector es de tres metros (seis metros ambos carriles), es una carretera que posee una sub-base de lastre en muy malas condiciones y no presenta ninguna capa asfáltica a lo largo de la sección.

La sub-base expuesta se encuentra un poco contaminada por vegetación, escombros de concreto, pedazos de cerámica que los vecinos de la comunidad han colocado para rellenar los huecos presentes en la capa (Ver Apéndice P).



Figura 31. Ruta # 1 "La Cecilia"
Fuente: Google Earth © (2020).

El segundo tramo que se visitó fue el sector del Parque del Silencio, éste se encuentra dividido en dos secciones como se muestra en la figura 32, la primera sección diseñada corresponde a la estructura de pavimento del Parque el Silencio la cual es la que tiene forma de "Y" con un largo de 255,30 m, por su parte la otra sección diseñada es la que da acceso al Liceo Bilingüe Experimental de Turrialba con un largo de

277,00 m, por lo que este segundo tramo da un total de 532,30 m, el ancho de carril en este sector es de tres metros igual que el sector anterior.

Al igual que el tramo anterior la sub-base se encuentra contaminada por vegetación, algunos de los huecos presentes en este tramo están tapados por desechos de concreto como bloques de mampostería, de las dos secciones de esta ruta la sección del centro educativo es la que

se encuentra con un mayor deterioro siendo un poco difícil el tránsito vehicular por la misma (Ver Apéndice P).



Figura 32. Ruta # 2 "Parque el Silencio".
Fuente: Google Earth © (2020).

La tercera ruta visitada es la que pasa frente al Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), esta es la más larga de las tres rutas con un total de 3.187,00 m, el ancho de carril en este sector es de tres metros igual que los dos sectores anteriores, únicamente los primeros 427,00 m de

la ruta se encuentran pavimentados, pero estos se encuentran en muy mal estado, en esta ruta se puede observar fallas o deterioros como huecos, pulimiento de agregados, así como grietas longitudinales, cuero de lagarto o grieta por fatiga, entre otras. (Ver Apéndice P).



Figura 33. Ruta # 3 "INA".
Fuente: Google Earth © (2020).

Estudios preliminares

Sondeos a cielo abierto y análisis de materiales existentes

Como parte del diseño según la AASHTO-93 es imprescindible obtener los parámetros de diseño de los materiales que componen la estructura de

pavimento, en el caso de los suelos se realizaron sondeos a cielo abierto para la extracción de materiales para su posterior estudio en laboratorio.

Entre los ensayos realizados para obtener las características de los materiales destaca la clasificación de los suelos (ASTM-D2487) con el fin de obtener que tipo de suelo se tiene presente en las rutas, el análisis granulométrico de los suelos (ASTM-D6913) para conocer la

granulometría del suelo y obtener indicadores de las propiedades ingenieriles del mismo, los ensayos para determinar el límite líquido y plástico (AASHTO-T89 y AASHTO-T90) son importantes para decretar el comportamiento del suelo según el uso que se le vaya a dar, ensayo Proctor Estándar (ASSHTO-T99) con el fin de determinar la relación de densidad y humedad de un suelo compactado, el ensayo CBR (ASTM-D1883) el cual determina la capacidad de soporte de materiales utilizados como base, sub base o sub rasante y por último se realizó el ensayo de Gravedad Específica (ASTM-D854).

Las características de los materiales presentes en la ruta La Cecilia fueron estudiadas por una empresa externa contratada por la Unidad Técnica de Gestión Vial (U.T.G.V) de la Municipalidad de Turrialba, el informe fue facilitado por los mismos, para conocer las características de los suelos presentes (sub-base y sub-rasante), en éste se especifica la realización de seis calicatas en la ruta La Cecilia, en el Anexo A-1 se detalla los parámetros de diseño de la sub-rasante obtenidas de los seis sondeos hechos para esta ruta.

Se estudió la posibilidad de usar el material de la sub-base expuesto como material de base para el diseño de la estructura de pavimento, sin embargo el mismo no cumple con los requisitos del CR-2010 para clasificarlo como una base, también se analizó usar el material como una sub-base tipo B, pero esta no cumple con la mayoría de los requerimientos granulométricos (Ver Anexo A-2), por lo que se decide no usar el material expuesto por esta razón además de que encuentra en muy mal estado y contaminado, por lo que este material debe de ser extraído por completo durante la construcción del pavimento.

Para la ruta Parque el Silencio se realizaron tres sondeos a cielo abierto para la extracción del material únicamente de la sub-rasante, solo se extrajo material de la sub-rasante porque el material expuesto lo usarán como material de lastre en otras obras, dos de los sondeos se realizaron en la sección Parque el Silencio y uno frente al Liceo Bilingüe, fueron realizados por el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), además dicha entidad fue la encargada de realizar las pruebas y ensayos para caracterizar la sub-rasante presente en estos sectores, en el Anexo A-3 se muestran las características de los sondeos realizados en estos dos sectores.

En la ruta INA al ser esta ruta la más larga se decidió realizar seis sondeos a cada 500.00 m de distancia, los sondeos se realizaron a distancias aleatorias a partir de su respectivo punto de inicio, por lo que en ninguno de los seis sondeos realizados se repitió la distancia de ejecución del sondeo desde su punto de partida correspondiente. Al igual que el segundo tramo los sondeos son realizados por el CIVCO y son también caracterizados por este ente, en el Anexo A-4 se detallan las características principales únicamente de la sub-rasante presente en la vía por la disposición anteriormente explicada.

Conteo Vehicular

Con respecto al conteo vehicular o tránsito promedio diario (TPD) se realizó en un periodo de tres días en un lapso de 12 horas (6:00 am - 6:00 pm) por día, de manera manual, dichos conteos fueron realizados en setiembre 2019 gracias a la ayuda de dos personas externas a este proyecto las cuales fueron ubicadas en puntos estratégicos de cada ruta. En el conteo se tomaron en cuenta los vehículos livianos, carga liviana, C2, C3, T3-S2 y buses (este mismo procedimiento se hizo para los tres tramos diseñados). Para el cálculo de los ejes equivalentes se tomó en cuenta el TPD mayor de los tres días de estudio, en la sección de Apéndice se encuentran los resultados obtenidos de los TDP contabilizados.

Para el sector de La Cecilia (Ver Apéndice A-1) el TPD corresponde a 361,00 vehículos esto en el día número tres, en la figura 31 se muestra el lugar específico donde fue realizado el conteo. El TPD de la ruta Parque el Silencio fue de 344,00 vehículos en total (Ver Apéndice A-2), fue realizado únicamente con los vehículos que circulaban en la sección del Parque del Silencio debido a que en la otra sección la cantidad de vehículos que transitaban era muy baja debido a las malas condiciones de la vía, por lo que se decidió realizar un único diseño para ambos sectores con el mismo TPD del primer sector (Ver figura 32).

En el Apéndice A-3 se detalla el TPD para los tres días de estudio de la ruta INA, dando el primer día el mayor conteo vehicular con un total de 427,00, dicho conteo se realizó en una de las calles aledañas a la ruta a intervenir debido a las malas condiciones en la que se encuentra el camino (Ver figura 33).

Diseño de Pavimentos

Para el diseño de las estructuras de pavimentos, primeramente, se realizó un diseño preliminar para determinar los espesores de las capas del pavimento mediante la metodología AASHTO-93, posterior a esto se realizó una verificación de la estructura de pavimento con la metodología Mecanística-Empírica, para este caso se usó el programa CR-ME ® para el diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos, para el caso de los pavimentos rígidos fue utilizado el programa ApRIGID ®, también fue usado el programa PITRA PAVE ® para comprobar los máximos esfuerzos y las deformaciones para los pavimentos semi-rígidos, los tres programas fueron desarrollados por el LanammeUCR.

Se aplicaron los modelos de desempeño explicados en la sección de marco teórico para cada tipo de pavimento para establecer si el diseño de los pavimentos es el óptimo, en el caso de los pavimentos flexibles se usó los modelos de la MEPDG que trae el CR-ME ®, para los semi-rígidos se usó el modelo de desempeño por fatiga de la PCA y el Oficio DVOP-5170-07 y para los pavimentos rígidos fueron usados los modelos de desempeño de escalonamiento y bombero de Yang Huang junto con el modelo de fatiga del Ing. Sukti Monge.

Datos de diseño

Para el desarrollo del diseño de la estructura de pavimentos es necesario tener todos los parámetros necesarios por capa, obtenidos estos se procede al respectivo diseño:

Mezcla asfáltica

Los parámetros de la mezcla asfáltica se obtuvieron de uno de los proveedores de la Municipalidad de Turrialba en este caso de la empresa Asfaltos CBZ, los cuales facilitaron un diseño de mezcla el cual poseía los parámetros de diseño.

CUADRO 2. CARACTERÍSTICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	
Acumulado ret. Tamiz 3/4 (%)	0,00
Acumulado ret. Tamiz 3/8 (%)	17,00
Acumulado ret. Tamiz N° 4 (%)	49,00

Pasando N° 200 (%)	5,60
Densidad (kg/m ³)	2350,00
Contenido de vacíos de aire (%)	5,50
Contenido de asfalto efectivo (%)	4,50
Gravedad específica máxima	2,459
Relación de Poisson	0,35

Fuente: Asfaltos CBZ (2019), Microsoft Excel ®.

Concreto Hidráulico

Éste es usado como el principal material para las losas de rodamiento de los pavimentos rígidos, la resistencia a usar es de 255,00 kg/cm² a los 28 días según el CR-2010, debido a que este es el mínimo que se permite en Costa Rica según este documento, además el mínimo de módulo de ruptura es de 45,00 kg/cm² (640,00 psi).

En el siguiente cuadro se detallan las características principales del concreto hidráulico para el diseño de pavimentos.

CUADRO 3. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO HIDRÁULICO	
Resistencia compresión (kg/cm ²)	255,00
Resistencia compresión (psi)	3626,94
Módulo de elasticidad (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura (psi)	640,00

Fuente: MOPT (2010), Microsoft Excel ®.

Base Granular

Las características principales de la base al igual que la mezcla fueron determinadas por un proveedor, en este caso el Quebrador Atirro Tracmory, el cual queda cercano a la comunidad de Turrialba.

CUADRO 4. CARACTERÍSTICAS DE LA BASE GRANULAR	
Pasando N° 200 (%)	4,70
Humedad Óptima (%)	7,60
Índice de Plasticidad	NP
Gravedad específica	2,660
Densidad seca máxima (kg/m ³)	2158,00
CBR (%)	82,00
Módulo resiliente (psi)	28000,00
Relación de Poisson	0,40

Fuente: Quebrador Atirro Tracmory (2019), Microsoft Excel ®.

Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25).

Este tipo de base es usada en los pavimentos semi-rígidos, se determinó el uso de una base tipo BE-25, la cual según el CR-2010 posee una resistencia a la compresión de 30,00 kg/cm² (435,00 psi) a los siete días. El módulo de ruptura se calculó con la ecuación 4, en el siguiente cuadro se resumen los datos usados para este tipo de base.

CUADRO 5. CARACTERÍSTICAS DE LA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO (BE-25)	
Resistencia compresión (kg/cm ²)	30,00
Resistencia compresión (psi)	435,00
Módulo de ruptura (psi)	107,00
Relación de Poisson	0,25

Fuente: MOPT (2010), Microsoft Excel ®.

Sub-base Granular

Al igual que la base granular los rasgos de diseño de mayor importancia para esta capa fueron facilitados por el mismo Quebrador Atirro Tracmory. En el cuadro 6 se detallan los parámetros de diseño de la sub-base.

CUADRO 6. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-BASE GRANULAR	
Pasando N° 200 (%)	6,30
Humedad Óptima (%)	8,20
Índice de Plasticidad	NP
Gravedad específica	2,630
Densidad seca máxima (kg/m ³)	2093,00
CBR (%)	58,00
Módulo resiliente (psi)	18400,00
Relación de Poisson	0,40

Fuente: Quebrador Atirro Tracmory (2019), Microsoft Excel ®.

Sub-rasante

Se determinaron las características principales de las sub-rasantes de dos de las vías mediante las pruebas ejecutadas en laboratorio por el CIVCO.

En el caso del tramo La Cecilia los datos de la sub-rasante ya los tenía caracterizados la U.T.G.V. En el Anexo A-1 se muestra un resumen

de las características principales para cada una de las seis calicatas, por su parte en el siguiente cuadro se detallan los datos a usar para la sub-rasante de este tramo aplicándole el un percentil 90 para una tener presente el 90,00 % de los escenarios evaluados que permiten un diseño que sea tan conservador y más adecuado a la realidad.

CUADRO 7. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-RASANTE “LA CECILIA”

Pasando N° 200 (%)	33,60
Humedad Óptima (%)	18,40
Índice de Plasticidad	14,50
Gravedad específica	2,508
Densidad seca máxima (kg/m ³)	1442,50
CBR (%)	5,95
Módulo resiliente (psi)	9750,00
Relación de Poisson	0,45
Tipo de Suelo (AASHTO)	A-2-6 (0)

Fuente: Vieto (2018), Microsoft Excel ®.

Para la sub-rasante del segundo tramo (Parque el Silencio), los datos fueron brindados por el CIVCO. En el Anexo A-3 se muestran los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio, y en el cuadro 8 se muestran los datos a usar en los programas aplicándoles el percentil-90 a los datos de dicho anexo.

CUADRO 8. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-RASANTE “PARQUE EL SILENCIO”

Pasando N° 200 (%)	13,10
Humedad Óptima (%)	34,78
Índice de Plasticidad	10,40
Gravedad específica	2,585
Densidad seca máxima (kg/m ³)	1102,00
CBR (%)	5,68
Módulo resiliente (psi)	9300,00
Relación de Poisson	0,45
Tipo de Suelo (AASHTO)	A-2-5 (0)

Fuente: CIVCO (2020), Microsoft Excel ®.

En el caso del tramo del INA, los resultados de los sondeos se detallan en la Anexo A-4 y también se les aplicó el percentil 90 de los tres sondeos y estas son las principales características.

CUADRO 9. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-RASANTE "INA"	
Pasando N° 200 (%)	34,00
Humedad Óptima (%)	28,65
Índice de Plasticidad	10,50
Gravedad específica	2,569
Densidad seca máxima (kg/m³)	1265,00
CBR (%)	7,85
Módulo resiliente (psi)	13000,00
Relación de Poisson	0,45
Tipo de Suelo (AASHTO)	A-2-5 (0)

Fuente: CIVCO (2020), Microsoft Excel ®.

Metodología AASHTO-93 para pavimentos flexibles y semi-rígidos

Para una mejor comprensión de la metodología de diseño AASHTO-93 se confeccionó una hoja en Microsoft Excel ® para el entendimiento del procedimiento a seguir y facilitar los cálculos respectivos. El procedimiento que se siguió se describe en seguida:

1. Determinación de los módulos resilientes

Se determinaron los módulos resilientes de cada una de las capas que conforman la estructura de pavimento, los módulos resilientes de la base granular, base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y sub-base granular, se establecieron a partir de los nomogramas de la AASHTO-93.

Para la mezcla asfáltica se usó un módulo resiliente de 450.000,00 psi, ya que es un dato muy común de las mezclas asfálticas. El módulo resiliente de la base granular es de 28.000,00 psi con base en el CBR de 82,00 % el cual es mayor al mínimo que indica el CR-2010 para este tipo de bases (Ver figura A-2).

El módulo resiliente inicial de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) se determinó según la resistencia a la compresión a los siete días, esta es de 615.000,00 psi (Ver figura A-4) y el módulo resiliente final es 307.500,00 psi, corresponde a un 50,00 % de la inicial debido a que pierde resistencia con el tiempo. El módulo resiliente de la sub-base granular es 18.400,00 psi, debido a que el CBR es de 58,00 % mayor al indicado en el CR-2010 (Ver figura A-3).

Para el caso del módulo resiliente de la sub-rasantes como la humedad es variable en el año en esta capa se realizó una variación del módulo resiliente para obtener el módulo resiliente promedio o efectivo de la misma.

El CBR obtenido del laboratorio se tomó como la condición más crítica la cual corresponde a los meses lluviosos, porque en laboratorio para la realización del ensayo del CBR la muestra se sumerge en agua por varios días, para los meses secos del año el CBR va a aumentar, ya que los suelos son más resistentes a las deformaciones, según el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos de Coronado (2002) aproximadamente los suelos en los meses secos aumentan su CBR entre un 10,00 o 20,00 % por lo que se tomó esto en cuenta para el cálculo del módulo resiliente.

Para determinar qué meses son secos y lluviosos se consultó en el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) como lo realizaban en dicha institución y la Sra. Keily Calderón Alfaro del Departamento de Información Meteorológica explicó que dependía de la precipitación del lugar en estudio, es fundamental conocer la precipitación anual aproximada y dividirla por los 12 meses del año dando una precipitación promedio. En el caso de Turrialba la precipitación ronda los 2.600,00 mm anuales según el IMN, dando un promedio por mes de 217,00 mm mensual, los meses igual a esta precipitación o mayor se consideraron lluviosos. Los datos de la precipitación por mes se obtuvieron de la estación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) (Ver Anexo B-1), pues se solicitó al IMN los datos de las estaciones de Turrialba y de Juan Viñas, pero la primera no tenía la información que se necesitaba y la segunda tenía la información incompleta.

Se determinó un módulo resiliente por mes con respecto al dato del CBR ya sea para mes seco o lluvioso, se usó la ecuación 34 si el CBR es menor a 10,00 %, esto es una correlación con el CBR según Heukelom y Klomp explicada en la Guía para el Diseño de Pavimentos AASHTO-93 (p.34), si el CBR es mayor a 10,00 % se usó la ecuación 35 la cual también corresponde a una correlación presente en la guía de la AASHTO para el cálculo del módulo resiliente.

$$MR = 1500 * CBR \quad (34)$$

$$MR = 3000 * CBR^{0,65} \quad (35)$$

Donde

MR = módulo resiliente (psi).

CBR = índice soporte de california.

Seguido a esto se calculó el daño relativo mensual con la ecuación:

$$u_r = 1,18 \times 10^8 * MR^{-2,32} \quad (36)$$

Donde

u_r = daño relativo.

MR = módulo resiliente (psi).

Se obtuvo un daño relativo promedio (Ver Apéndice B-1, Apéndice B-2, Apéndice B-3), es necesario para usar el nomograma de la AASHTO y obtener el módulo resiliente efectivo de la sub-rasante (Ver figura A-5). Esto se realizó para las tres rutas, para La Cecilia el MR fue de 9.750,00 psi, para el Parque el Silencio de 9.300,00 psi y para el tramo del INA es de 13.000,00 psi.

CUADRO 10. MÓDULOS RESILIENTES POR CAPA (psi)	
Mezcla Asfáltica	450000,00
Base granular	28000,00
Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	615000,00
Sub-base granular	18400,00
Sub-rasante (La Cecilia)	9750,00
Sub-rasante (Parque el Silencio)	9300,00
Sub-rasante (INA)	13000,00

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©.

2. Ejes equivalentes

Se hizo el conteo vehicular (TPD) durante tres días para cada una de las rutas a diseñar para realizar el cálculo de los ejes equivalentes. Se usó una tasa de crecimiento de 4,00 % esto es lo que recomienda el Ing. Fabricio Leiva en su informe sobre el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito cuando no se puede afirmar con seguridad que el cambio estándar del camino provocará un tránsito más significativo.

Se escogieron dos periodos de diseño 10 años y 15 años respectivamente, para determinar las diferencias que puede haber entre ambos y cual se adapta mejor a las necesidades de la comunidad, para la escogencia de estos se tomó en cuenta lo indicado por Coronado (2002) en el Manual Centroamericano para Diseño de

Pavimentos (Ver figura A-6), también se tomó en cuenta cuestiones de costo y mantenimiento para la misma Municipalidad y además de que las rutas son consideradas del tipo terciarias, ya que una ruta de este tipo constituyen las vías importantes para los trayectos dentro de un cantón, además de que sirve de conectores para las rutas primarias de la red nacional y comunitarias, es importante aclarar que una vez construido el nuevo hospital de Turrialba alguna de las rutas logré considerarse secundaria en especial la ruta INA, sin embargo esta dará acceso a una ruta terciaria nacional (RVN 411) por lo que al pasar de importancia tendrá los mismos parámetros de diseño que una ruta terciaria cantonal, no habrá un cambio significativo en el diseño.

El factor crecimiento se calcula aplicando la ecuación 1 que se muestra en el marco teórico y depende de la tasa de crecimiento y del periodo de diseño, el factor crecimiento es de 12,01 para el periodo de diseño de 10 años y de 20,02 para el periodo de diseño de 15 años. El factor dirección se considera una distribución de 50,00 % por sentido, por su parte el factor carril es igual a 100,00 % porque en el diseño solo se considera un carril por sentido.

El TPD se multiplica por un factor de expansión debido a que el tránsito está propenso a aumentar en el futuro sobre todo en la comunidad de Turrialba debido a la futura construcción del nuevo hospital el tránsito ira aumentando poco a poco, en este caso se usó un aumento del 20,00 %. Los factores camiones son obtenidos del Oficio DVOP-5170-07, estos son:

CUADRO 11. FACTOR CAMIÓN	
Liviano	0,001
CL	0,02
C2	0,63
C3	1,28
T3-S2	2,38
Buses	2,29

Fuente: Oficio DVOP-5170-07 (Castro, 2007).

Se calcula primero los ejes equivalentes diarios.

$$EEQ_{diario} = TPD * FC \quad (37)$$

Posterior a esto se calcula lo ejes equivalentes anuales.

$$EEQ_{anual} = EEQ_{diario} * 365 \quad (38)$$

Y por último se calcula los ejes equivalentes de diseño con la siguiente ecuación, esto se hace de manera individual por tipo de vehículo y al final se suman todos los ejes equivalentes de diseño.

$$EEQ_{diseño} = EEQ_{anual} * F.Crec * F.Dirección * F.Carril \quad (39)$$

Donde

TPD= tránsito promedio diario.

FC= factor camión.

F.Crec= factor crecimiento.

F.Dirección= factor dirección (%).

F.Carril= factor carril (%).

3. Nivel de confianza (R)

Para el nivel de confianza es de suma importancia tener en cuenta el TPD y el grado de importancia de la ruta a diseñar, en este caso lo que cambia es el TPD, ya que el grado de importancia es el mismo para las tres vías, para las tres rutas como el Tránsito Promedio Diario es menor a 500 el nivel de confianza es de 0,70, esto con base en los datos del Oficio DVOP-5170-07 (Ver figura A-7).

4. Desviación estándar normal (Z_r)

Según la AASHTO-93 el *Z_r* depende del valor del nivel de confianza, por lo que el *Z_r* es de -0,524 debido al *R*=0,70 (Ver figura A-8).

5. Desviación estándar (S₀)

La AASHTO-93 en su apartado 4.3 indica que en el caso de los pavimentos flexibles y semi-rígidos la desviación estándar es de 0,45, ya que el criterio se encuentra entre 0,40-0,50.

6. Coeficiente de drenaje (m_i)

Se utilizó la tabla 2.4 de la Guía para Diseño de Pavimentos de la AASHTO 93 (Ver figura A-9), al ser una estructura de pavimentos nueva se espera que su condición de drenaje sea buena y que esté expuesta a más de un 25,00 % de humedad, por lo tanto, los coeficientes de drenaje de la base granular o estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y el de la sub-base granular (*m₂* y *m₃* respectivamente) es de 1,00, para que este valor

se mantenga es importante mejorar los drenajes previo a la construcción de la estructura.

7. Índice de servicialidad (PSI)

Para pavimentos flexibles el índice de servicio inicial es de 4,20, mientras que para los pavimentos semi-rígidos este es de 4,30, por su parte para el índice de servicio final se basó en el TPD, el tipo de ruta y el *R* según lo indicado en el Oficio DVOP-5170-07 para los tres el PSI final es de 2,00.

8. Coeficiente estructural (a_i)

Para determinar el coeficiente estructural se utilizaron los nomogramas de las AASHTO-93, a su vez fue necesario el módulo resiliente de la mezcla asfáltica, el CBR de la base y sub-base y la resistencia a la compresión a los 7 días de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25).

El coeficiente de la mezcla asfáltica (*a₁*) es de 0,441, el de la base granular (*a₂*) es de 0,133, el de la sub-base granular (*a₃*) es de 0,128 y el de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (*a₂*) es de 0,158 (Ver figura A-1, figura A-2, figura A-3, figura A-4 respectivamente).

9. Número estructural (SN_i)

Se determinó el número estructural de cada capa mediante la ecuación de la Guía para Diseño de Pavimentos y el método de bisección la ecuación es:

$$\log(W_{18}) = Z_R * S_0 + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 * \log MR - 8,07 \quad (40)$$

Donde

W₁₈= repeticiones de eje dual.

Z_R= desviación estándar normal.

S₀= desviación estándar.

SN= número estructural.

ΔPSI= cambio de índice de servicio.

MR= módulo resiliente (psi).

Lo primero que se calculó es el primer término de la ecuación $\log W_{18}$ con base en los ejes equivalentes de las rutas diseñadas. Se procedió a establecer un *SN_{inicial}* y un *SN_{final}*, para definir un *SN_{promedio}*, esto con el fin de encontrar el valor de $\log W_{18}$ usando también la desviación

estándar normal, la desviación estándar, el cambio de índice de servicio y el módulo resiliente.

Se realizó una diferencia entre el primer término $\log W_{18}$ calculado con los ejes equivalentes y el segundo $\log W_{18}$ calculado con el $SN_{promedio}$, si la diferencia entre ambos es de 0,0009 se concluyen las iteraciones y el $SN_{promedio}$ se convierte en el SN de la capa. Si el resultado de la diferencia no cumple, se debe de elegir un nuevo intervalo SN, si el resultado de la diferencia es positivo el $SN_{promedio}$ del intervalo anterior pasa a ser el $SN_{inicial}$ y se mantiene el SN_{final} , en cambio si el resultado de la diferencia es negativo el $SN_{promedio}$ del intervalo anterior pasa a ser el SN_{final} y se mantiene el $SN_{inicial}$, esto se hace hasta que la diferencia se logre cumplir.

10. Espesores de capa (h_i)

Se calculó los espesores de cada una de las capas con las siguientes ecuaciones:

$$h_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad (41)$$

$$h_2 = \frac{[SN_2 - a_1 * h_1]}{a_2 * m_2} \quad (42)$$

$$h_3 = \frac{[SN_3 - a_1 * h_1 - a_2 * m_2 * h_2]}{a_3 * m_3} \quad (43)$$

Donde

- h_1 = espesor de la capa asfáltica (in).
- h_2 = espesor de la base (in).
- h_3 = espesor de la sub-base (in).
- a_1 = coeficiente estructural de la capa asfáltica.
- a_2 = coeficiente estructural de la base.
- a_3 = coeficiente estructural de la sub-base.
- SN_1 = número estructural de la capa asfáltica.
- SN_2 = número estructural de la base.
- SN_3 = número estructural de la sub-base.
- m_2 = coeficiente de drenaje de la base.
- m_3 = coeficiente de drenaje de la sub-base.

La ecuación 41 corresponde al cálculo de la capa asfáltica, con la ecuación 42 se calculó el espesor de la base y con la ecuación 43 se calculó el espesor de la sub-base, todos estos espesores se deben de redondear al entero mayor más cercano y deben de cumplir con los espesores mínimos según la AASHTO-93 como se muestran en la figura A-10 y cumplir con el criterio de la

AASHTO de que los espesores de cada capa deben de ser como mínimo tres veces el tamaño nominal máximo del agregado.

11. Número estructural teórico y requerido

Para que el diseño esté completamente satisfactorio se realizó un último cálculo el cual es que el SN total (espesores redondeados) debe de ser mayor al SN requerido (espesores sin redondear).

$$SN_i = h_i * a_i * m_i \quad (44)$$

Donde

- SN_i = número estructural.
- h_i = espesor de la capa (in).
- a_i = coeficiente estructural de la.
- m_i = coeficiente de drenaje.

Metodología AASHTO-93 para pavimentos rígidos

De la misma manera que para los pavimentos flexibles y semi-rígidos se realiza una hoja en Microsoft Excel ® la cual facilita los cálculos para el diseño para los pavimentos rígidos.

1. Determinación de los módulos resilientes y módulo de elasticidad

En los pavimentos rígidos se puede prescindir de alguna de las capas base o sub-base, se decidió usar en el diseño una base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) la cual disminuye el bombeo de finos, es más durable el módulo resiliente de este tipo de base es de 615.000,00 psi (Ver figura A-4).

Con respecto al concreto hidráulico su módulo de elasticidad o de rigidez se calculó de la siguiente manera:

$$MR = 57000 * (f'c)^{0,5} \quad (45)$$

Donde:

- $f'c$ = resistencia del concreto (psi).

La resistencia usada del concreto hidráulico es de 255,00 kg/cm² (3.626,94 psi), por su parte el módulo de ruptura usado para el concreto hidráulico es el mínimo solicitado por el CR-2010 es de 45,00 kg/cm² (640,00 psi).

2. Ejes equivalentes

En el apartado 5.2.3 de la guía AASHTO-93 existe una correlación entre los ejes equivalentes de un pavimento flexible y los ejes equivalentes de un pavimento rígido, esta correlación indica que los ejes equivalentes del pavimento rígido se obtienen al dividir por 0,67 los ejes equivalentes del pavimento flexible.

3. Nivel de confianza (R)

El nivel de confianza corresponde al mismo valor y condiciones explicadas en el punto 3 de la metodología AASHTO-93 para pavimentos flexibles y semi-rígidos, $R=0,70$ para los pavimentos rígidos.

4. Desviación estándar normal (Z_r)

La desviación estándar normal es la misma usada en el diseño para pavimentos flexibles y semi-rígidos, $Z_r = -0,524$.

5. Desviación estándar (S_o)

La desviación estándar para los pavimentos rígidos es de 0,35, ya que el criterio se encuentra entre 0,30-0,40 según el apartado 4.3 de la AASHTO-93.

6. Coeficiente de drenaje (Cd)

Al igual que los pavimentos flexibles al ser una nueva estructura de pavimento rígido la calidad del drenaje será buena y se encontrará expuesto a más de un 25,00 % de humedad, por lo tanto, el coeficiente de drenaje (Cd) tiene un valor de 1, esto según la tabla 2.5 de la guía AASHTO 93 (Ver figura A-11), para mantener este Cd es importante que se le de mantenimiento previo a los drenajes antes de la construcción de la estructura.

7. Coeficiente de transferencia de carga (J)

Se emplea la tabla 2.6 de la guía de diseño (Ver figura A-12), donde se debe de especificar que el espaldón es tipo asfalto, pavimento es JPCP y se diseñó con dovelas, por lo que el J es de 3,20.

8. Índice de servicialidad (PSI)

En pavimentos rígidos el índice de servicio inicial es de 4,50, el índice de servicio final es el mismo que en los pavimentos flexibles y semi-rígidos $PSI_{final} = 2,00$ para las tres rutas según lo indicado en el Oficio DVOP-5170-07.

9. Módulo de reacción compuesto (k_c)

Se determinó el módulo de reacción compuesto del pavimento mediante las correlaciones de la Federal Highway Administration (FHWA) para este procedimiento es necesario suponer un espesor de losa y de base preliminar.

$$\ln k_{\infty} = -2,807 + 0,1253(\ln D_{SB})^2 + 1,062(\ln M_R) + 0,1282(\ln D_{SB})(\ln E_{SB}) - 0,4114(\ln D_{SB}) - 0,0581(\ln E_{SB}) - 0,1317(\ln D_{SB})(\ln M_R) \quad (46)$$

Donde:

k_{∞} = módulo de reacción de la sub-rasante (pci).
 D_{SB} = espesor supuesto base o sub-base (in).
 E_{SB} = módulo resiliente base o sub-base (psi).
 M_R = módulo resiliente de la sub-rasante (psi).

10. Corrección de módulo de reacción compuesto (k_{cr})

En el caso de que existiera un estrato rígido a una profundidad menor a 3,00 m se debe de corregir el módulo de reacción compuesto.

Como no existe dato que indique algún estrato rígido en alguna de las tres rutas el módulo de reacción compuesto no es corregido. La FHWA propone la siguiente correlación para la corrección:

$$\ln k_{rf} = 5,303 + 0,0710(\ln D_{SB})(\ln M_R) + 1,366(\ln k_{\infty}) - 0,9187(D_{SG}) - 0,6837(\ln M_R) \quad (47)$$

Donde:

k_{rf} = módulo de reacción corregido de la sub-rasante (pci).
 k_{∞} = módulo de reacción de la sub-rasante (pci).
 D_{SB} = espesor supuesto base o sub-base (in).
 D_{SG} = profundidad del estrato rígido (in).
 M_R = módulo resiliente de la sub-rasante (psi).

11. Daño relativo (u_r)

Se determinó el daño relativo mediante una correlación de la FHWA:

$$u_{ri} = (D^{0,75} - 0,39k_i^{0,25})^{3,42} \quad (48)$$

Donde:

u_{ri} = daño relativo.

D = espesor de losa supuesto (in).

k_i = módulo de reacción corregido de la subrasante (pci).

12. Módulo de reacción efectivo (k_e)

Para determinar el módulo de reacción efectivo se usó el nomograma de la AASHTO-93, donde se necesitan los datos del daño relativo y el espesor de la losa supuesto (Ver figura A-13).

13. Pérdida potencial de soporte (LS)

Se determinó una pérdida de soporte en relación con el tipo de material de la base, para la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) el LS se encuentra en el rango de 0,00 – 1,00, por lo que se usó un LS de 1,00 (Ver figura A-14), debido a que un LS de 0.5 puede indefinir el cálculo del espesor de losa.

14. Módulo de reacción efectivo-correcto (k)

Para este caso es necesario el módulo de reacción efectivo y el LS, esto con el fin de usar el nomograma de la AASHTO-93 (Ver figura A-15).

15. Espesor de losa (h)

Se determinó el espesor de losa mediante el método de bisección y la ecuación de la guía de diseño:

$$\log W_{18} = Z_R * S_0 + 7,35 \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5}\right]}{1 + \frac{1,624x10^7}{(D+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32p_t) * \log\left[\frac{S'_c * Cd [D^{0,75} - 1,132]}{215,63 * J [D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}}]}\right] \quad (49)$$

Donde:

W_{18} = repeticiones de eje dual.

Z_R = desviación estándar normal.

S_0 = desviación estándar.

D = espesor de losa (in).

ΔPSI = Cambio de índice de servicio.

p_t = Índice de servicio final.

S'_c = Módulo de ruptura del concreto (psi).

Cd = coeficiente de drenaje.

J = coeficiente de transferencia de carga.

E_c = módulo de elasticidad del concreto hidráulico (psi).

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

Lo primero que se calculó es el primer término de la ecuación $\log W_{18}$ con base en los ejes equivalentes de las rutas diseñadas. Se procedió a establecer un $D_{inicial}$ y un D_{final} , para definir un $D_{promedio}$, esto con el fin de encontrar el valor de $\log W_{18}$ usando los restantes términos de la ecuación.

Se realizó una diferencia entre el primer término $\log W_{18}$ calculado con los ejes equivalentes y el segundo $\log W_{18}$ calculado con el $D_{promedio}$, si la diferencia entre ambos es de 0,0009 se concluyen las iteraciones y el $D_{promedio}$ se convierte en el espesor de la losa. Si el resultado de la diferencia no cumple, se debe de elegir un nuevo intervalo D , si el resultado de la diferencia es positivo el $D_{promedio}$ del intervalo anterior pasa a ser el $D_{inicial}$ y se mantiene el D_{final} , en cambio si el resultado de la diferencia es negativo el $D_{promedio}$ del intervalo anterior pasa a ser el D_{final} y se mantiene el $D_{inicial}$, esto se hace hasta que la diferencia se logre cumplir.

Según Huang (2004) el espesor de losa debe de ser entre 5,00 – 12,00 in, por su parte la guía de diseño de las AASHTO-93 menciona que el espesor de la losa debe de ser entre 6,00 – 14,00 in, por lo que para efectos del diseño de la losa del pavimento rígido se usó un mínimo de 6,00 in (15,00 cm).

16. Dovelas

Las dovelas son usadas para transmitir la carga entre losas de mejor manera de ahí que se usan varillas lisas de grado 60 según el CR-2010, las dimensiones de las dovelas dependen del espesor de la losa, también es importante establecer el diámetro correspondiente antes de empezar el diseño de estas. La PCA definió que el diámetro de las dovelas debe de ser al menos un octavo del espesor de la losa y que el largo de estas depende

del diámetro de la varilla seleccionada, en la figura A-16 se detallan los largos de las dovelas según Huang (2004).

Es conveniente definir previamente la separación entre dovelas, el ancho y recubrimiento de losa. Para el cálculo de estas se siguió el siguiente procedimiento: Se calculó la cantidad de dovelas que tendrá la losa de rodamiento, para este cálculo se asumió una separación de 30,00 cm entre dovelas el cual corresponde a la separación mínima según Huang (2004), además se determinó usar un recubrimiento de losa de 15,00 cm.

$$Cant. Dovelas = \frac{Anc.Losa - 2 Rec.Losa}{Sep.Dovelas} + 1 \quad (50)$$

Donde:

Cant. Dovelas = cantidad de dovelas en losa.

Anc. Losa = ancho de losa (cm).

Rec. Losa = recubrimiento de losa (cm).

Sep. Dovelas = separación de las dovelas (cm).

Se realizó el cálculo de la rigidez relativa para la losa de concreto, en este caso se usó un coeficiente de Poisson de 0,15.

$$l = \sqrt[4]{\frac{MR * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}} \quad (51)$$

Donde:

l = razón de rigidez (in).

MR = módulo de rigidez de la losa (psi).

h = espesor de la losa (in).

μ = coeficiente de Poisson.

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

Posterior a esto se calculó la contribución relativa de cada dovela, esto se refiere a la fracción de carga total que es tomada por cada dovela en función de su ubicación con respecto a la carga, disminuye conforme se aleja la dovela de la carga.

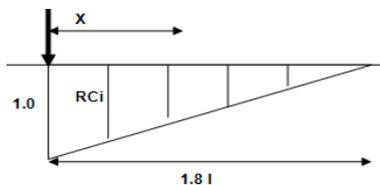


Figura 34. Contribución relativa de una dovela.
Fuente: Castro (2019).

$$\frac{RC}{1,8l - x} = \frac{1}{1,8l} \quad (52)$$

Donde:

RC = contribución relativa.

l = razón de rigidez (in).

x = distancia entre la dovela en estudio y la ubicación de la carga (in).

Se realizó una sumatoria de todas las contribuciones relativas, con esto se determinó el porcentaje de carga que es absorbido por dovela, cabe resaltar que se usó una carga de 18,000,00 lb (eje dual) y esta se dividió entre 4, pues es la carga que le corresponde a cada llanta, por lo que se usó una carga final de 4.500,00 lb.

$$P_i = \frac{P * RC}{ND} \quad (53)$$

Donde:

P_i = porcentaje de carga por dovela (lb).

P = carga aplicada (lb).

RC = contribución relativa.

ND = total de contribuciones relativas.

La anterior ecuación brinda a su vez la dovela más crítica, esto para determinar el esfuerzo aplicado en dicha dovela.

$$r_b = \frac{k_d * P_{critico}}{4 * \beta^3 * E * I} * [2 + \beta * z] \quad (54)$$

Donde:

r_b = esfuerzo aplicado (pci).

k_d = módulo de integración (pci).

P_{crítico} = carga crítica (lb).

z = ancho de junta (in).

E = módulo de rigidez del acero (psi).

I = inercia de la dovela (in⁴).

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} \quad (55)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_d * d}{4 * E * I}} \quad (56)$$

Por último, se calculó la resistencia a la falla por compresión.

$$f_b = \left(\frac{4-d}{3}\right) * f'_c \quad (57)$$

Donde:

f_b = resistencia a la falla por compresión (pci).

d = diámetro de la dovela (in).

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

Se calculó un criterio de cumplimiento, donde la resistencia de la dovela debe de ser mayor al esfuerzo, de no cumplirse debe de aumentarse el diámetro de las dovelas y disminuir la separación de estas.

$$f_b \geq r_b \quad (58)$$

17. Barras de amarre longitudinal.

Las barras de amarre son necesarias para mejorar y asegurar una mayor resistencia a los esfuerzos de fricción entre las losas y mejorar la transferencia de carga, estas barras son de varilla corrugada o deformada y de acero grado 40 según el CR-2010, se utilizó la expresión del libro de Yang Huang (2004) para su cálculo.

$$A_s = \frac{\gamma_c * h * L' * f_a}{f_s} \quad (59)$$

Donde:

A_s = área de acero sección transversal por 1,00 ft.

γ_c = peso unitario del concreto (0,0868 pci).

h = espesor de losa (in).

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

f_a = factor de fricción losa / capa soporte.

f_s = resistencia del acero (psi).

Se asume un número de varilla y una separación para calcular el área del acero propuesto por pie lineal, si este acero es mayor al requerido el diseño cumple con el requerimiento, se calculó la cantidad de barras de amarre con la siguiente ecuación.

$$Cant. Barras = \frac{Largo.Losa - 2 Rec.Losa}{Sep.Barras} + 1 \quad (60)$$

Donde:

$Cant. Barras$ = cantidad de barras de amarre en losa.

$Largo. Losa$ = largo de losa (cm).

$Rec. Losa$ = recubrimiento de losa (cm).

$Sep. Barras$ = separación de las barras (cm).

Según Huang (2004) para el largo de las barras de amarre se le debe de añadir 3,00 in (7,50 cm) al largo calculado debido a la desalineación que pueden sufrir las barras, el largo se determina de la siguiente manera.

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{f_s * d}{\mu} \right) \quad (61)$$

Donde:

t = largo de la barra de amarre (in).

f_s = resistencia del acero (psi).

d = diámetro de la barra (in).

μ = esfuerzo de adherencia permisible, típicamente 350,00 (psi).

Metodología Mecánica Empírica para pavimentos flexibles y semi-rígidos

Después de haber realizado el diseño mediante la metodología AASHTO-93, se procede a la aplicación de la metodología Mecánica-Empírica con el programa CR-ME ® del LanammeUCR, con este programa se logró adaptar las variables de la MEPDG a Costa Rica en dicho programa, para alcanzar mejores diseños que sean más eficientes, cómodos y seguros para los usuarios.

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el uso de la metodología Mecánica-Empírica para los pavimentos flexibles y semi-rígidos usando el CR-ME ®.

1. Datos del proyecto

Lo primero que se debe de ingresar en el programa son los datos básicos que identifiquen el proyecto en desarrollo, se ingresan datos como la ubicación, identificación del proyecto, y descripción, esta parte es opcional y el usuario es libre de llenarla, es recomendable hacerlo para identificar el diseño de una manera más fácil.

Es importante ingresar las características generales como la velocidad operacional, la cual se determinó usar 30,00 km/h porque al ser rutas cantonales dan acceso a principalmente a viviendas y el tránsito es lento, con respecto al periodo de diseño son de 10 y 15 años (para las tres rutas) el zigzag lateral no fue tomado en

cuenta para realizar los diseños más conservadores.

Figura 35 Interfaz principal.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

2. Interfaz Tránsito

El programa CR-ME ® permite ingresar la información necesaria para el cálculo de los ejes equivalentes, dependiendo del conocimiento de la variable tránsito, en el caso del diseño de las tres rutas el cálculo de los ejes equivalentes se hizo de manera manual por lo que se elige la opción nivel 3 “Básico” con series históricas.

Figura 36. Interfaz Tránsito.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

3. Interfaz Clima

Los materiales de una estructura de pavimento son afectados por las condiciones climáticas, es por lo que en el programa CR-ME ® es necesario realizar el cálculo de la temperatura media y del Índice de Thornwaite.

Para estos cálculos es necesario los datos de las temperaturas y precipitaciones de la comunidad de Turrialba, se utilizaron los datos de la estación meteorológica del CATIE, porque las estaciones meteorológicas del IMN no tenían la información completa (Ver Anexo B-1).

Mes	Índice de Thornwaite (TMI)	Temperatura promedio mensual (oC)
Enero	17.59	23.05
Febrero	276.06	22.25
Marzo	-25.7	23.95
Abril	-42.31	24.5
Mayo	16.97	25.35
Junio	146.12	24.6
Julio	116.46	23.95
Agosto	72.17	24.35
Setiembre	10.34	24.3
Octubre	186.59	24.5
Noviembre	261.13	23.65

Figura 37. Interfaz Clima.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

Para el cálculo del Índice de Thornwaite se sigue el siguiente procedimiento basado en el documento de Andrades (2017), ya que el programa no lo realiza. Se calculó el índice de calor mensual y posterior a eso se hace el cálculo del índice de calor anual.

$$h_i = (0,2 * t_i)^{1,514} \quad (62)$$

$$H_y = \sum_{i=1}^{12} h_i \quad (63)$$

Donde:

h_i = índice de calor mensual (°C).

t_i = temperatura media (°C).

H_y = índice de calor anual (°C).

Seguido a esto se calculó la evapotranspiración mensual.

$$PE_i = \frac{16 * 10 * t_i^a}{H_y} \quad (64)$$

Donde

PE_i = evapotranspiración mensual.

t_i = temperatura media (°C).

H_y = índice de calor anual (°C).

$$a = 6,75x10^{-7}H_y^3 + 7,71x10^{-5}H_y^2 + 0,017921H_y + 0,49239$$

Debe de corregirse la evapotranspiración mensual, pero para ello debe de conocerse el número máximo de horas con sol y los días de cada mes, como esta información no se tiene en

su totalidad la evapotranspiración corregida es la misma que la evapotranspiración.

$$PE'_i = PE_i * \frac{N}{12} * \frac{D}{30} \quad (65)$$

Donde:

- PE'_i = evapotranspiración mensual corregida.
- PE_i = evapotranspiración mensual.
- N = número máximo de horas con sol.
- D = número de días por mes.

Se calculó el almacenamiento, el mes de enero se toma como cero inicialmente y se corrige con el almacenamiento de diciembre, el almacenamiento máximo es 100,00 mm, si da mayor a esta cantidad se colocó 100,00 mm en los cálculos:

$$A_i = A_{i-1} + PE_i - PE'_i \quad (66)$$

Donde:

- A_i = almacenamiento del mes en estudio (mm).
- A_{i-1} = almacenamiento del mes anterior (mm).
- PE_i = evapotranspiración mensual.
- PE'_i = evapotranspiración mensual corregida.

Se determinó el exceso para cada mes, si el resultado es menor que cero se coloca cero, con esta misma ecuación se calculó el déficit, si el resultado era mayor a cero se pone cero.

$$R_y = DF_y = A_i + PE_i - PE'_i \quad (67)$$

Donde:

- R_y = exceso mensual (mm).
- DF_y = déficit mensual (mm).
- A_i = almacenamiento del mes en estudio (mm).
- PE'_i = evapotranspiración mensual corregida.
- PE_i = evapotranspiración mensual.

Por último, se calculó el Índice de Thornwaite con la siguiente ecuación.

$$TMI_y = \frac{100 * R_y - 60 * DF_y}{PE'_i} \quad (68)$$

Donde:

- TMI_y = Índice de Thornwaite (mm).
- R_y = exceso mensual (mm).
- DF_y = déficit mensual (mm).
- PE'_i = evapotranspiración mensual corregida.

En el Apéndice B-4 se detallan los resultados del procedimiento anterior, el siguiente cuadro detalla el Índice de Thornwaite usado por mes en el programa CR-ME ®.

CUADRO 12.ÍNDICE DE THORNWAITE		
Mes	Temperatura Media (°C)	TMI
Enero	23,05	17,59
Febrero	22,25	276,06
Marzo	23,95	-25,70
Abril	24,50	-42,31
Mayo	25,35	16,97
Junio	24,60	146,12
Julio	23,95	116,46
Agosto	24,35	72,17
Setiembre	24,30	10,34
Octubre	24,50	186,59
Noviembre	23,65	261,13
Diciembre	23,45	99,42

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

4. Interfaz Materiales

En esta sección el usuario tiene la disponibilidad de seleccionar las capas que sean necesarias para su diseño según la importancia del proyecto, en el caso de este proyecto se seleccionaron únicamente una capa asfáltica, una base granular (pavimento flexible), una base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (pavimento semi-rígido), una sub-base granular y una sub-rasante.



Figura 38. Selección de capas.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

Se debe de seleccionar la imagen de cada capa para ingresar las características necesarias para el diseño mecanístico-empírico, en cada capa se ingresa el espesor calculado con la metodología AASHTO.

La primera capa que se seleccionó fue la carpeta asfáltica, en este caso se escoge el nivel 3, porque no se cuenta con el nivel de conocimiento de los datos de la mezcla asfáltica, en esta sección se ingresan las correlaciones con la granulometría de la mezcla, el volumen de asfalto efectivo y el porcentaje de vacíos.

Se selecciona un modelo para el módulo dinámico, se optó por el modelo Witczak-Lanamme, ya que es la ecuación está calibrada para Costa Rica, esta se calcula con la ecuación 6 explicada en el marco teórico del presente documento.

Figura 39. Ingreso de las propiedades mezcla asfáltica. Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Figura 39. Ingreso de las propiedades mezcla asfáltica. Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

En la figura 40 se ingresaron las propiedades del ligante asfáltico, en este caso se selecciona un nivel 3 que corresponde al básico, con un grado de penetración convencional entre 60 - 70, los valores de A y VTS los calcula el programa automáticamente.

Figura 40. Ingreso de las propiedades del ligante asfáltico. Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Figura 40. Ingreso de las propiedades del ligante asfáltico. Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Seguido a esto se selecciona la base para cada uno de los pavimentos. En el caso de la base granular se define el nivel 3 que corresponde al nivel básico y se ingresan los datos del espesor, la relación de Poisson, así como el índice de plasticidad, pasando N° 200, gravedad específica, humedad óptima y el CBR, el programa calcula automáticamente el módulo resiliente.

Figura 41. Ingreso de las propiedades base granular. Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Figura 41. Ingreso de las propiedades base granular. Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Para el caso de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) se ingresaron los datos del espesor, relación de Poisson y el módulo resiliente inicial y final.

Figura 42. Ingreso de las propiedades de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25). Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Figura 42. Ingreso de las propiedades de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25). Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ©.

Para la sub-base granular se ingresaron los mismos parámetros que para la base granular (espesor, relación de Poisson, índice de

plasticidad, pasando N° 200, gravedad específica, humedad óptima y el CBR) y son definidos en el nivel 3 básico.

Figura 43. Ingreso de las propiedades de la sub-base.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

La última capa en seleccionar es la sub-rasante, en esta al igual que las dos anteriores se ingresó los mismos parámetros de diseño, como no se tiene una profundidad de estrato rígido se ingresa una profundidad alta de 25,00 m porque el programa no permite poner un valor de 0,00 m.

Figura 44. Ingreso de las propiedades de la sub-rasante.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

5. Interfaz Modelos de desempeño

Para pavimentos flexibles los modelos usados son los propuestos en la MEPDG, el CR-ME ®, realiza el cálculo de los modelos, se revisó el daño por fatiga, el porcentaje de área agrietada, el área longitudinal y el ahuellamiento del pavimento.

Los criterios de aceptación según Arias (2014) en su publicación (LM-PI-GM-INF-22-14) menciona que para pavimentos menores a 3 millones de ejes equivalentes el porcentaje de área agrietada es menor a 75,00 % y que el ahuellamiento total tiene un valor límite de 25,00 mm, para el agrietamiento longitudinal el valor máximo es de 2.000,00 pies/milla, por su parte el ahuellamiento de la carpeta asfáltica es de 25,00 mm como máximo.

	Valor límite	Confiabilidad (%)
Agrietamiento longitudinal (pies/milla)	2000	90
Área agrietada (%)	75	90
Ahuellamiento Carpeta asfáltica (mm)	25	90
Ahuellamiento total (mm)	25	90

Figura 45. Ingreso de los criterios de aceptación.
Fuente: LanammeUCR (2016), CR-ME ®.

Los modelos de desempeño son ejecutados para determinar si el diseño realizado es el óptimo únicamente a nivel del diseño estructural. Las ecuaciones que usa el CR-ME® para este tipo de modelos se explican en la parte del marco teórico de dicho informe.

En el caso de los pavimentos semi-rígidos únicamente se verificó con el CR-ME ® el ahuellamiento total, para la falla por fatiga se utilizó el modelo de la PCA (Ver ecuación 23) para la falla por fatiga en la base y también se verificó la falla por fatiga en la capa asfáltica con la ecuación 24 del Oficio DVOP-5170-07, para estos modelos es necesario el esfuerzo y deformación máxima a tensión en la parte inferior de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y en la capa asfáltica, ambos se obtuvieron del programa PITRA PAVE ® del LanammeUCR, este programa permite calcular las respuestas del pavimento a las cargas aplicadas por los vehículos.

A continuación, se explica el procedimiento seguido para la obtención del esfuerzo y deformación a tensión en el programa PITRA PAVE ®:

Lo primero a ingresar es el número de capas y sus características como el módulo resiliente, la relación de Poisson y el espesor.

#	Módulo E (psi)	Poisson v (1)	Espesor h (in)	Descripción
1	450000.0	0.35	2.0	Capa Asfáltica
2	615000.0	0.25	6.0	Base Est. con Cemen...
3	14800.0	0.4	6.0	Sub-base
4	9750.0	0.45		Sub-rasante

Figura 46. Ingreso de las características de las capas del pavimento.

Fuente: LanammeUCR (2015), PITRA PAVE ®.

El segundo paso es la introducción de las cargas, en este caso se especificaron dos cargas, pues se analizaron solo dos llantas, las cargas por llanta es de 4.500,00 lb porque se usa un eje dual de 18.000,00 lb como de referencia, también se ingresa la presión de las llantas la cual es de 120,00 psi según Castro (2019) y la ubicación de estas.

#	Carga P (lb)	Presión q (psi)	X (in)	Y (in)
1	4500.0	120.0	0.0	-36.0
2	4500.0	120.0	0.0	36.0

Figura 47. Ingreso de las cargas del pavimento.

Fuente: LanammeUCR (2015), PITRA PAVE ®.

El tercer paso es la especificación de los puntos a analizar en el programa, en este caso es de vital importancia conocer cuáles son exactamente los puntos de análisis, debido a que se necesitan las coordenadas de éstos en “x” (dirección de tránsito), “y” (transversal) y “z” (profundidad).

#	X (in)	Y (in)	Z (in)	Capa #
1	0.0	-36.0	0.0	1
2	0.0	0.0	0.0	1
3	0.0	-36.0	7.99	2
4	0.0	0.0	7.99	2
5	0.0	-36.0	14.001	4
6	0.0	0.0	14.001	4

Figura 48. Ingreso de las coordenadas para cada punto de análisis.

Fuente: LanammeUCR (2015), PITRA PAVE ®.

Por último, el programa realiza el cálculo de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones para cada uno de los puntos de análisis en la posición especificada, se escogió el esfuerzo y la deformación a tensión mayor en cada uno de los tres diseños para calcular la fatiga del pavimento semi-rígido, ambos se representan con un negativo según la convención de signos del programa.

Esfuerzos		Deformaciones		Deflexiones		
#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.7100e+02	1.6917e+02	1.2004e+02	-3.3465e-16	-4.6723e-32	-2.5435e-16
2	7.2169e+00	-8.9207e+00	2.1237e-01	-1.9763e-15	-6.1315e-33	0.0000e+00
3	-6.5020e+01	-6.3599e+01	5.1848e+00	2.6097e-16	-2.8552e-18	-1.5543e-02
4	-5.3271e+00	9.0439e+00	5.4482e-01	1.7599e-15	-2.7787e-17	0.0000e+00
5	3.1689e-01	3.8978e-01	2.6381e+00	1.3391e-17	-5.8436e-18	-3.1811e-02
6	2.3479e-01	7.5418e-01	6.3799e-01	6.3607e-17	-2.9784e-17	0.0000e+00

Figura 49. Resultado del PITRA PAVE ®.

Fuente: LanammeUCR (2015), PITRA PAVE ®.

Metodología Mecánica Empírica para pavimentos rígidos

Para los pavimentos rígidos el LanammeUCR desarrolló el programa ApRIGID ® para facilitar el cálculo de respuestas mecánicas como los esfuerzos y las deflexiones para el diseño de pavimentos rígidos bajo la metodología empírico mecanicista (Quirós, 2015).

El programa usa las técnicas de regresión lineal múltiple y de redes neurales artificiales para el uso de modelos regionales calibrados, en el caso del diseño de las tres rutas se decidió usar la regresión lineal múltiple y un análisis individual, ya que los resultados son más confiables.

El programa es de fácil uso, porque solo tiene una interfaz principal (Ver figura 50) en la cual se ingresan los datos básicos para la obtención de los esfuerzos y deflexiones, a continuación, se explica que parámetros son necesarios para el uso del ApRIGID ®.

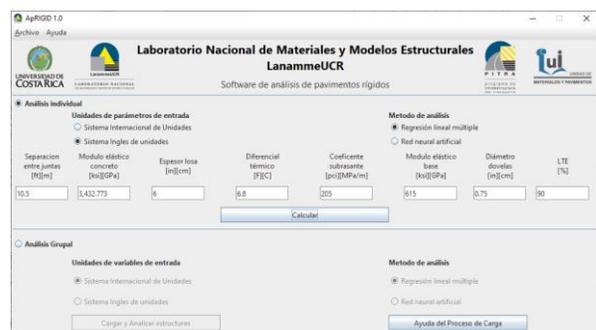


Figura 50. Interfaz principal del ApRIGID ®.

Fuente: LanammeUCR (2015), ApRIGID ®.

1. Separación de juntas

Según Castro (2019) el espaciamiento de juntas (también largo de losa) que debe de existir entre las juntas de un pavimento JPCP es de 18 a 21 veces el espesor de la losa, en los diseños realizados se determinó usar 21 veces el espesor de losa.

2. Módulo elástico del concreto hidráulico

El módulo de elasticidad se calculó con la ecuación 45, este tiene un valor de 3.432,77 ksi.

3. Espesor de losa

Para este caso se tomó el espesor de losa calculado con la metodología AASHTO-93 para determinar si este es correcto o debe de ser cambiado.

4. Diferencial térmico

Usualmente se usa un diferencial térmico de 6,8 °F o 14,1 C (Quirós, 2015).

5. Módulo de reacción de la sub-rasante

Es el valor k determinado con la metodología AASHTO-93, en el caso de la ruta La Cecilia es de 215,00 pci, para el Parque el Silencio 210,00 pci y para el tramo del INA es de 260,00 pci.

6. Módulo resiliente de la base

Para los pavimentos rígidos se usó un módulo resiliente de 615,00 ksi por ser la base estabilizada con cemento (BE-25).

7. Diámetro de las dovelas

Corresponde al diámetro de las dovelas propuesta según el diseño de la estructura de pavimento rígido, para las tres rutas el diámetro las varillas es de 0,75 in (varilla # 6) con base en el diseño realizado.

8. Porcentaje de transferencia de carga de las dovelas (LTE)

Usualmente el LTE es alto, pues es una estructura de pavimento nuevo, el porcentaje usado fue de 90,00 %.

Una vez ingresado estos datos se procedió a obtener los esfuerzos y deformaciones del pavimento rígido, así como se muestra en la figura siguiente:

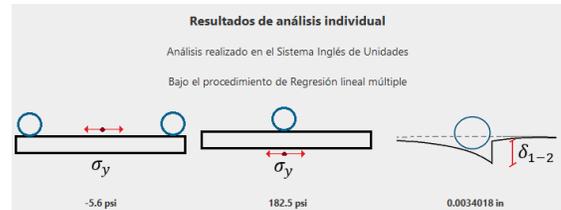


Figura 51. Resultados del ApRIGID ®.
Fuente: LanammeUCR (2015), ApRIGID ®.

9. Modelos de desempeño

Por último, se procede a verificar si el diseño de la estructura es el adecuado mediante los modelos de desempeño, en este caso al ser un pavimento rígido los modelos de desempeño usados son el modelo de escalonamiento y modelo de índice de bombeo y de erosión de Yang Huang, además del modelo de fatiga del Ing. Sukti Monge.

Los límites máximos para el modelo de escalonamiento son de 0,12 in (0,30 cm) con base en la AASHTO 2008 y para el índice de bombeo y erosión este debe de indicar una severidad nula (0,00 – 1,00) o baja (1,00 – 2,00).

Costo de construcción

Para determinar los costos que con lleva la construcción de las tres estructuras de pavimentos por ruta se elaboró una hoja en Microsoft Excel ®, en la cual se especifica las actividades necesarias para el proceso constructivo según el pavimento en estudio.

Las actividades propuestas para el proceso constructivo son en referencia a lo explicado en el CR-2010, en este documento se explica con detalle cada una de las actividades, la manera de construcción, los materiales a usar y las formas de pago para cada una de las estructuras de pavimento.

CUADRO 13. PROCESO CONSTRUCTIVO	
Actividad	Reglón de pago
Excavación de la vía (m³).	CR.203.03
Colocación sub-base granular (m³).	CR.301.06
Colocación base granular (m³).	CR.301.03
Colocación base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (m³).	CR.302.03

Colocación mezcla asfáltica en caliente (ton).	CR.401.01
Riego de imprimación (L).	CR.413.02
Colocación losa de concreto hidráulico con refuerzo (m ²).	CR.501.01

Fuente: MOPT (2010), Microsoft Excel ®.

En cada una de las actividades se detalló el equipo o maquinaria, la mano de obra, los materiales y para cada uno de estos aspectos se determinó la cantidad de horas que con llevaría la realización de la actividad respectiva. Los precios de los materiales fueron consultados a diferentes proveedores de la Municipalidad de Turrialba así como a diferentes negocios ferreteros.

CUADRO 14. MATERIALES	
Materiales	Costo
Sub-base granular (m ³)	₡ 8.500,00
Base granular (m ³)	₡ 8.500,00
Emulsión asfáltica (l)	₡ 200,00
Mezcla asfáltica (ton)	₡ 50.000,00
Saco cemento 50 kg (und)	₡ 6.000,00
Concreto hidráulico (m ³)	₡ 120.000,00
Backer road para juntas (m)	₡ 23.745,00
Sellador para juntas (cubeta)	₡ 107.708,00
Malla electrosoldada 2.20x6 m 3.80 mm (und)	₡ 11.300,00
Malla electrosoldada 2.20x6 m 4.80 mm (und)	₡ 19.000,00
Varilla lisa # 4 de 6 m (und)	₡ 3.920,00
Varilla lisa # 5 de 6 m (und)	₡ 5.400,00
Varilla lisa # 6 de 6 m (und)	₡ 7.800,00
Varilla corrugada # 4 de 6 m (und)	₡ 2.540,00
Varilla corrugada # 5 de 6 m (und)	₡ 4.220,00
Varilla corrugada # 6 de 6 m (und)	₡ 6.070,00

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Para el costo de mano de obra se basó en los salarios mínimos del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social publicados en el 2020, para el costo calculado se tomó una jornada laboral de 10 horas y una carga social de 50,00 %, en el siguiente cuadro se muestra el costo de la mano de obra por hora laborada sin las cargas sociales.

CUADRO 15. MANO DE OBRA	
Mano de obra	Costo
Ayudante de Operario	₡ 1.154,92
Ingeniero	₡ 3.402,83
Maestro de obras	₡ 1.387,27

Operador	₡ 1.176,18
Peón	₡ 1.062,06

Fuente: MTSS (2020), Microsoft Excel ®.

En el caso del equipo a usar destacan la motoniveladoras, vagonetas, compactadoras y pavimentadoras, el costo del equipo se determinó por hora según el documento tarifario del MOPT mayoritariamente y unos costos de algunas empresas cercanas a la comunidad de Turrialba que alquilan maquinaria pesada, en este cuadro se indica que los precios incluyen los aspectos de la utilidad, administración, así como el costo del operador, en el cuadro siguiente se detallan los costos por equipo.

CUADRO 16. EQUIPO Y MAQUINARIA	
Equipo	Costo
Excavadora	₡ 32.000,00
Back-Hoe	₡ 14.000,00
Vagoneta	₡ 23.000,00
Compactadora Neumáticos	₡ 22.000,00
Compactadora Vibratoria	₡ 31.000,00
Compactadora Estática	₡ 15.000,00
Motoniveladora	₡ 37.000,00
Distribuidor de asfalto	₡ 20.000,00
Pavimentadora	₡ 33.000,00
Tanque de agua	₡ 20.000,00
Bomba estacionaria	₡ 15.000,00
Barredora	₡ 14.000,00
Sierra de concreto	₡ 7.300,00

Fuente: MOPT (2016), Microsoft Excel ®.

Para cada una de las actividades se calculó el precio unitario donde aparte de la mano de obra, materiales y equipo se le añade 5,00 % de imprevistos, 5,00 % de gastos administrativos y 20,00 % de utilidad.

Al costo total se le agrega los aspectos de obras preliminares, pruebas de campo, planos y papelería, limpieza de terreno, pólizas de riesgo de trabajo y responsabilidad civil por daños a terceros, además de los costos por trámites del CFIA que corresponden a un 0,267 % del costo de la obra, más ₡ 20.000,00 por administración y ₡ 10.000,00 por la bitácora según los encargados del CFIA, estos aspectos se agregaron hasta al final del costo inicial porque su costo es el mismo para los tres tipos de pavimentos.

Plan de conservación y costos de mantenimiento

Para la elaboración del plan de conservación y costo de mantenimiento se confeccionó una hoja en Microsoft Excel®, donde se especifica el daño podría sufrir la estructura de pavimento, la medida o tipo de mantenimiento, el costo por unidad y el costo total del mantenimiento. Fue de vital importancia preguntar a algunas personas que tuvieran conocimiento y experiencia sobre el tema, ya que la elaboración del plan de conservación no es sencilla y requiere de experiencia.

En los apéndices como parte del plan de conservación se detalla un listado de los deterioros más comunes a los cuales puede estar expuesto cada uno de los tres pavimentos, además en esta misma sección se adjunta un formulario para que a los encargados de la Municipalidad de Turrialba se les agilice y facilite las inspecciones de las condiciones de las estructuras.

En el siguiente cuadro se especifican los mantenimientos más comunes según el tipo de pavimentos, el costo de cada actividad se obtuvo como guía de un proyecto de graduación, el cual los obtuvo de la licitación pública 2014 LN-000018-0CV00 "Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada" (Coto, 2016), estos valores se tuvieron que traer al valor actual porque son del 2015, por lo que se usó la fórmula de valor futuro con una tasa de interés compuesto de un 7,00 % y usando los costos de los mantenimientos del 2015 como valor presente en la ecuación:

$$V_f = V_p * (1 + i\%)^n \quad (69)$$

Donde:

V_f = valor futuro (₡).

V_p = valor presente (₡).

$i\%$ = tasa de interés compuesto (%).

n = tiempo (años)

CUADRO 17. MANTENIMIENTO PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMI-RÍGIDOS		
Mantenimiento	Costo	Unidad
Ruteo y sellado de grietas	₡ 2.800,90	m

Bacheo con mezcla asfáltica	₡ 85.628,59	ton
Perfilado de pavimento	₡ 1.380,11	m ²
Carpeta de mezcla asfáltica	₡ 75.819,07	ton
Recuperación de base granular	₡ 31.560,22	m ³
Mantenimiento rutinario	₡ 3.569,70	m

Fuente: LP 2014 LN-000018-0CV00, Microsoft Excel®.

CUADRO 18. MANTENIMIENTO PAVIMENTOS RÍGIDOS		
Mantenimiento	Costo	Unidad
Sellado de juntas y grietas	₡ 5.013,90	m
Sustitución de losa	₡ 63.441,90	m ²
Sobrecapa de concreto hidráulico	₡ 69.513,69	m ²
Perfilado de la superficie	₡ 1.328,40	m ²
Bacheo de la losa de concreto	₡ 28.070,55	m ²
Mantenimiento rutinario	₡ 3.435,95	m

Fuente: LP 2014 LN-000018-0CV00, Microsoft Excel®.

Para determinar la cantidad de materiales necesarios que se deben usar por deterioro se estimó un pequeño porcentaje de las cantidades obtenidas del costo de construcción esto según las a algunos expertos en el área del mantenimiento de pavimentos. Al obtener las cantidades estas se multiplican por el costo por mantenimiento el cual es transformado a valor futuro para uno de los años correspondientes según el deterioro y así se obtiene el costo total del mantenimiento por pavimento.

También se calculó el CAUE (Costo Anual Uniforme Equivalente), este se usa cuando el análisis sólo se pueden considerar datos de costos y permite el comprar proyectos con diferentes vidas útiles como los desarrollados con el fin de determinar cuál estructura de los dos periodos de diseño se adapta mejor a las necesidades de la Municipalidad de Turrialba, el criterio de escogencia de una u otra alternativa es la que menor CAUE, para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación

$$CAUE = VPN * \frac{(1 + i\%)^n * i}{(1 + i\%)^n - 1} \quad (70)$$

Donde:

CAUE= Costo Anual Uniforme Equivalente (€).

VPN= valor presente neto (€).

$$VPN = CI + CAO \quad (71)$$

CI= Costo inicial (€).

CAO= Costo anual de operación (€).

i%= tasa de interés compuesto (%).

n= tiempo (años)

Resultados

Para un mejor entendimiento de los resultados obtenidos se dividen éstos por ruta diseñada y por periodo de diseño, para cada una de las tres rutas se mostrarán los resultados alcanzados del diseño de los tres tipos de estructuras de pavimentos mediante las metodologías AASHTO-93 y Mecánica-Empírica además del costo que conlleva la construcción y el costo de mantenimiento de cada una de estas.

Ruta La Cecilia

Periodo de Diseño de 10 años

Diseño de Pavimentos

En el cuadro 19 se detalla los ejes equivalentes calculados para el periodo de diseño de 10 años usando un factor de expansión de 20,00 %.

CUADRO 19. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO										
Vehículo	TPD	F.C	EEQ /día	EEQ /anual	Crec. (%)	F. Crec (%)	EEQ Diseño	F. Dir (%)	F. Car (%)	EEQ Carril
Liviano	285,60	0,001	0,29	104,24	4,00	12,01	1251,56	50,00	100,00	625,78
CL	118,80	0,02	2,38	867,24	4,00	12,01	10412,18	50,00	100,00	5206,09
C2	25,20	0,63	15,88	5794,74	4,00	12,01	69572,27	50,00	100,00	34786,13
C3	3,60	1,28	4,61	1681,92	4,00	12,01	20193,31	50,00	100,00	10096,66
T3-S2	0,00	2,38	0,00	0,00	4,00	12,01	0,00	50,00	100,00	0,00
Buses	0,00	2,29	0,00	0,00	4,00	12,01	0,00	50,00	100,00	0,00
Σ										50714,66

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©

Los ejes equivalentes mostrados anteriormente fueron los obtenidos para el diseño de los pavimentos flexible y semi-rígido, para los pavimentos rígidos se utilizó la corrección explicada en la sección de metodología, según la guía de diseño de la AASHTO-93, para este tipo de pavimento se utilizó un total de 75.693,52 ejes equivalentes simples. En el Apéndice A-1 se detalla el TPD de esta ruta.

Para esta ruta como los ejes equivalentes no superan los 150.000,00 se tomó en consideración los espesores mínimos según el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, para la carpeta asfáltica el espesor mínimo es de 5,00 cm, para la base granular el mínimo espesor a usar es de 10,00 cm en el caso de la sub-base granular se decidió usar como mínimo un espesor de 15,00 cm, sin embargo se usa un espesor mínimo 6,00 cm para la capa

asfáltica (tamaño de grano de 12.5 mm) y de 15,00 cm para la base granular debido a que se debe de considerar el tamaño del agregado de la capa, con respecto a esto se debe cumplir con la relación que indica la AASHTO-93 donde el espesor debe de ser al menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado, además se toma en cuenta la compactación del material y al ser espesores bajos podría deteriorar el material

Pavimento Flexible

En el cuadro 20 se muestran los espesores determinados con la guía AASHTO-93 así como los números estructurales de cada capa, se utilizaron los espesores mínimos establecidos para cada capa que compone la estructura. En el Apéndice C-1 se muestra el diseño completo de este pavimento.

CUADRO 20. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	5,99	6,00	1,04	1,04
Base Granular	0,133	1,00	4,25	15,00	0,22	0,79
Sub-base Granular	0,128	1,00	-3,43	15,00	-0,17	0,76
			Σ	36,00	1,09	2,58

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En el siguiente cuadro se observa que la estructura propuesta con metodología AASHTO-93 cumple con los parámetros de aceptación del programa CR-ME ®.

CUADRO 21. PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE			
Parámetros	Límite	Valor	Condición
Ag. Longitudinal (pies/milla)	2000,00	222,62	Cumple
Área agrietada (%)	75,00	0,58	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	25,00	14,75	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

A continuación, se muestra el comportamiento de la estructura de pavimento flexible para el periodo de diseño de 10 años.

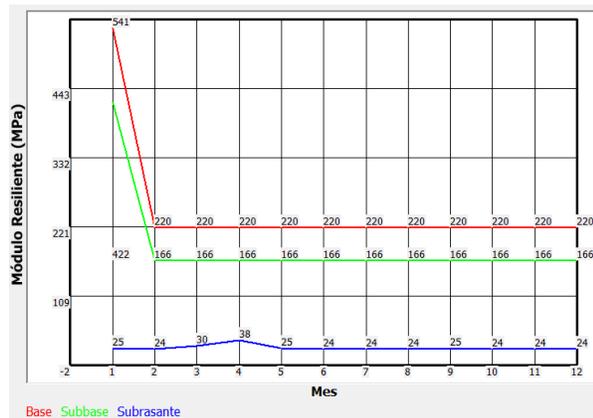


Figura 52. Módulo resiliente del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

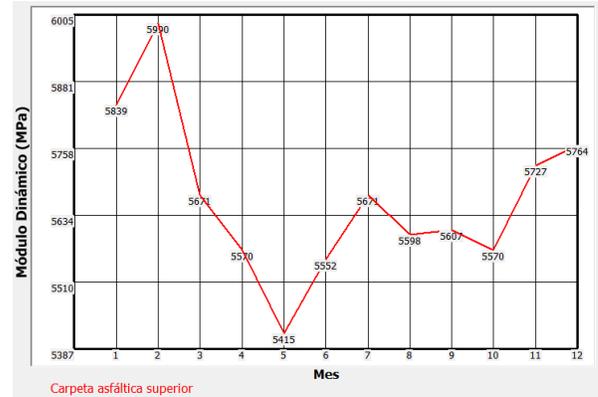


Figura 53. Módulo dinámico de la capa asfáltica.
Fuente: CR-ME ®.



Figura 54. Porcentaje de daño del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

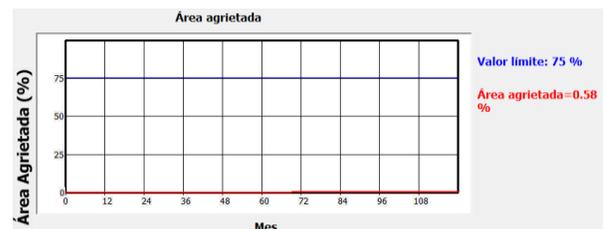


Figura 55. Área agrietada del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

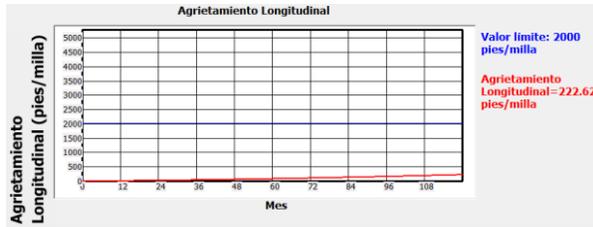


Figura 56. Agrietamiento longitudinal del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

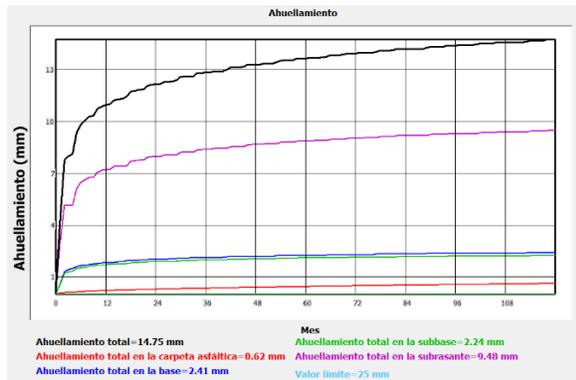


Figura 57. Ahuellamiento del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

CUADRO 22. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	0,00	6,00	0,001	1,04
Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	0,158	1,00	3,57	20,00	0,22	1,24
Sub-base Granular	0,128	1,00	12,56	20,00	0,63	1,01
			Σ	46,00	0,86	3,29

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En el Apéndice C-2 se muestra el diseño completo del pavimento semi-rígido. Para el pavimento semi-rígido se verificó el ahuellamiento total usando el programa CR-ME ®, también se muestra el comportamiento de la estructura de pavimento semi-rígido.

CUADRO 23. PARÁMETRO DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ahuellamiento total (mm)	25,00	8,28	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Semi-rígido

En el siguiente cuadro se muestran los espesores y números estructurales determinados con la AASHTO-93, para la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) se utilizó un mínimo de 15,00 cm según Leiva, Arce & Castro (2005).

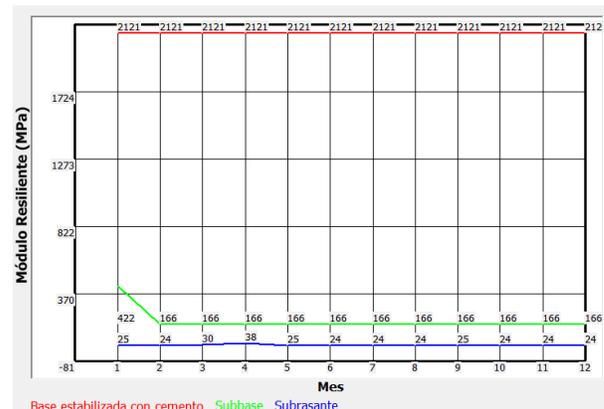


Figura 58. Módulo resiliente del pavimento semi-rígido.
Fuente: CR-ME ®.

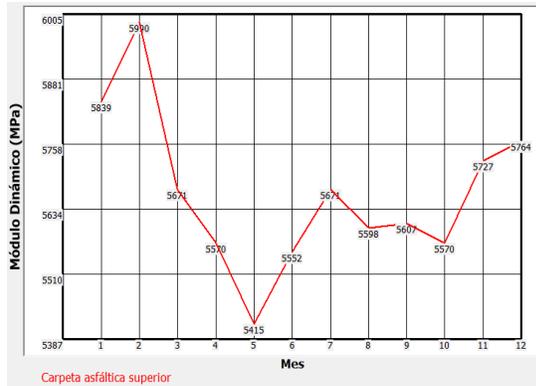


Figura 59. Módulo dinámico de la capa asfáltica.
Fuente: CR-ME ®.

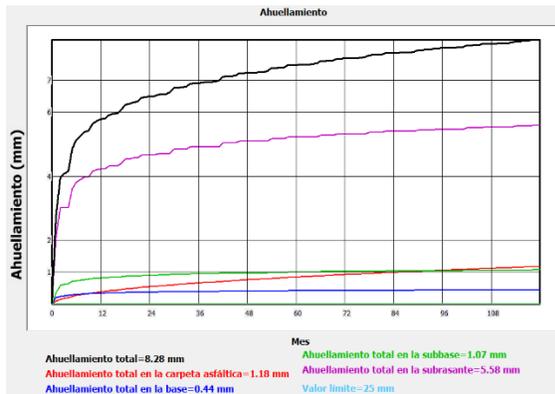


Figura 60. Ahuellamiento del pavimento semi-rígido.
Fuente: CR-ME ®.

Para el caso de la fatiga se aplicó el modelo de desempeño de la PCA, la fatiga es mayor a los ejes equivalentes de diseño, el esfuerzo a tensión de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) se determinó por medio programa PITRA PAVE ®, los puntos 5 y 6 corresponden a la base estabilizada.

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.2058e+02	1.1837e+02	1.2004e+02	-4.0578e-16	2.6304e-31	1.4319e-15
2	8.8445e+00	-2.7394e+00	2.1237e-01	-1.4186e-15	-2.3187e-31	0.0000e+00
3	5.1585e+01	5.0307e+01	9.7999e+01	-2.3477e-16	1.1295e-18	6.1487e-03
4	5.1105e+00	-1.3232e+00	7.6971e-02	-7.8789e-16	-6.8591e-17	0.0000e+00
5	-4.9730e+01	-4.7000e+01	2.6826e+00	5.0155e-16	-7.0957e-18	-3.8627e-02
6	-9.5936e+00	5.9107e+00	6.5359e-01	1.8987e-15	-2.8532e-17	0.0000e+00
7	2.0203e-01	2.7873e-01	1.3018e+00	1.4090e-17	-9.6438e-18	-5.2498e-02
8	2.2460e-01	5.3258e-01	6.9326e-01	3.7716e-17	-2.3284e-17	0.0000e+00

Figura 61. Esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25).
Fuente: PITRA PAVE ®.

CUADRO 24. MODELO DE FATIGA PCA	
Esfuerzo a tensión (psi)	49,73
Módulo de ruptura base estabilizada 28 días (psi)	107,01

Fatiga (PCA)	1409370,65
Ejes Equivalentes	50714,66
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

También se verificó la fatiga en la capa asfáltica y está supera las repeticiones usadas para el diseño, la deformación unitaria máxima a la tensión se calculó por medio del programa PITRA PAVE ®, los puntos 1, 2, 3 y 4 corresponden a la capa asfáltica.

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	8.2529e-05	7.5902e-05	8.0902e-05	-2.4347e-21	1.5782e-36	8.5915e-21
2	2.1620e-05	-1.3132e-05	-4.2765e-06	-8.5117e-21	-1.3912e-36	0.0000e+00
3	-7.1525e-07	-4.5493e-06	1.3953e-04	-1.4089e-21	6.7770e-24	3.6892e-09
4	1.2326e-05	-6.9750e-06	-2.7746e-06	-4.7724e-21	-4.1155e-22	0.0000e+00
5	-8.2847e-05	-5.7297e-05	4.3683e-05	2.0388e-21	-2.8844e-23	-1.5702e-07
6	-1.8268e-05	1.3245e-05	2.5599e-06	7.7184e-21	-1.1598e-22	0.0000e+00
7	-5.2226e-05	-4.0819e-05	1.1133e-04	4.1909e-21	-2.8684e-21	-1.5615e-05
8	-3.3541e-05	1.2260e-05	3.6157e-05	1.1218e-20	-6.9254e-21	0.0000e+00

Figura 62. Deformación unitaria a la tensión en la capa asfáltica.

Fuente: PITRA PAVE ®.

CUADRO 25. MODELO FATIGA CAPA ASFÁLTICA	
Deformación unitaria máxima a tensión	0,0000131
Módulo resiliente de la carpeta asfáltica (kPa)	3102642,00
Número de repeticiones	3,56E+50
Ejes Equivalentes	50714,66
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Rígido

Para el diseño de este pavimento se usaron las características mínimas según el CR-2010 para el concreto hidráulico explicadas en la sección de metodología. En el cuadro siguiente se detalla el módulo efectivo de reacción corregido de la subrasante y los espesores de capas de este pavimento.

CUADRO 26. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93	
Módulo de reacción compuesto (pci)	839,30
Módulo de reacción compuesto corregido (pci)	839,30
Daño relativo	6,58
Módulo efectivo de reacción (pci)	860,00
Pérdida de soporte	1,00

Módulo efectivo de reacción corregido (pci)	215,00
Espesor de losa supuesto (in)	6,00
Espesor de base supuesto (in)	6,00
Espesor de losa calculado (in)	3,01

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Cabe resaltar que al usar la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) la ecuación de la guía AASHTO-93 se indefinía debido al alto módulo de reacción efectivo corregido de la sub-rasante, porque el suelo presente en la ruta es de muy buena calidad y presenta un módulo resiliente alto y a eso hay que sumarle el alto módulo resiliente de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25), por lo que en este caso se usó el máximo k que se permitía en la ecuación para este diseño el cual es de 195,00 pci.

Con respecto al espesor de losa calculado éste es de 3,01 in (7,65 cm), no obstante, se decidió usar el mínimo establecido en la sección de la metodología con base en las recomendaciones de la AASHTO-93 y Huang (20014) el cual es de 6,00 in (15,00 cm) y que corresponde al espesor de losa supuesto al inicio del cálculo.

El modelo de escalonamiento (Ver ecuación 26) si cumple, el valor es menor al máximo permitido según Huang (2004) que es de 0,12 in (0,30 cm), el máximo esfuerzo a tensión del es de 180,40 psi según el programa ApRIGID ®.

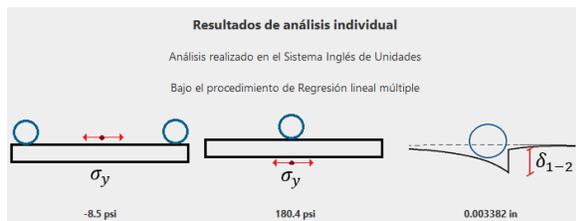


Figura 63. Esfuerzo a tensión del pavimento rígido.
Fuente: ApRIGID ®

CUADRO 27. MODELO DE ESCALONAMIENTO	
Ejes Equivalentes (millones)	0,0757
Esfuerzo máximo (psi)	180,40
Separación de juntas transversales (ft)	10,50
Módulo de reacción efectivo (pci)	215,00
Escalonamiento (in)	0,014
Escalonamiento (cm)	0,036
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En referencia al índice de bombeo (Ver ecuación 27) la severidad es nula, ya que el índice dio menor a 1,00.

CUADRO 28. MODELO DE BOMBEO Y EROSIÓN	
Ejes Equivalentes (millones)	0,0757
Tipo de suelo	0
Precipitación anual (cm)	227,84
Espesor de losa (in)	6,00
Índice de congelación	0,00
Índice de bombeo y erosión	0,63
Severidad	Nula

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En el caso del modelo de fatiga (Ver ecuación 29) las repeticiones de carga superan en una gran cantidad a los ejes equivalentes de diseño.

CUADRO 29. MODELO DE FATIGA	
Esfuerzo máximo (psi)	180,40
Módulo ruptura (psi)	640,00
Fatiga	1,84E+14
Ejes Equivalentes	75693,52
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Como el diseño propuesto cumple con los modelos de desempeño se calcularon especificaciones de las barras de amarre y dovelas que tendrán las losas de concreto que componen la capa de ruedo.

	Dovelas	Barras de amarre
Calibre Varilla	6	4
Longitud (cm)	35,00	56,00
Separación (cm)	30,00	60,00
Grado	60	40

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

La siguiente figura define la carga que es soportada por cada dovela según la carga de 4.500,00 lb aplicada por llanta en la losa de

concreto, siendo la dovela # 1 la que mayor carga recibe con un total de 1.948,67 lb.

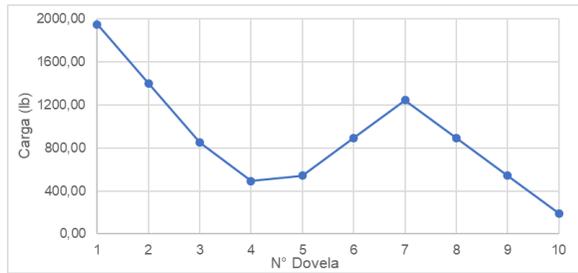


Figura 64. Fracción de carga recibida por cada dovela.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En los Apéndices C-3, C-4 y C-5 se especifica el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento rígida. A continuación, se detalla las dimensiones de las estructuras de pavimentos diseñadas para la ruta La Cecilia para el periodo de 10 años.

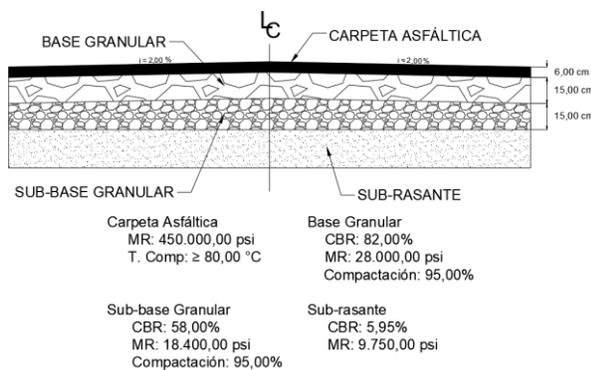


Figura 65. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ®.

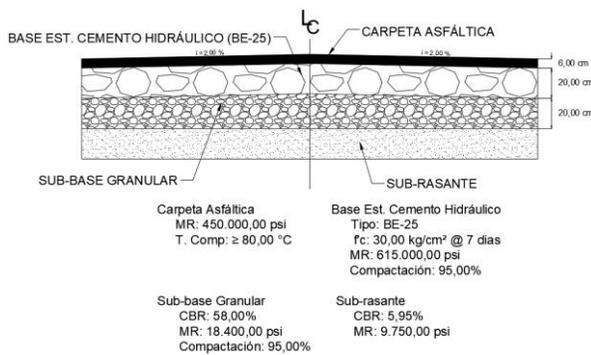


Figura 66. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ®.

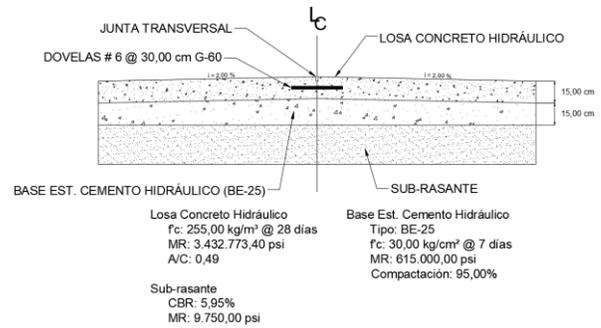


Figura 67. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ®.

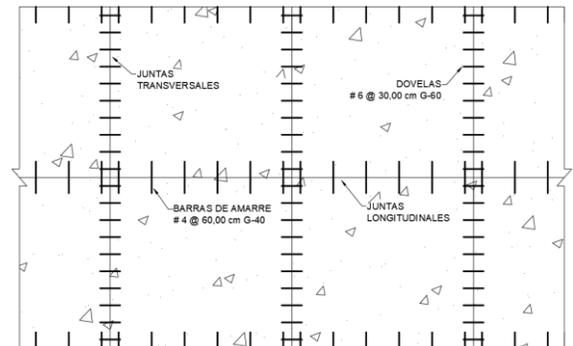


Figura 68. Distribución de juntas, dovelas y barras de amarre.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ®.

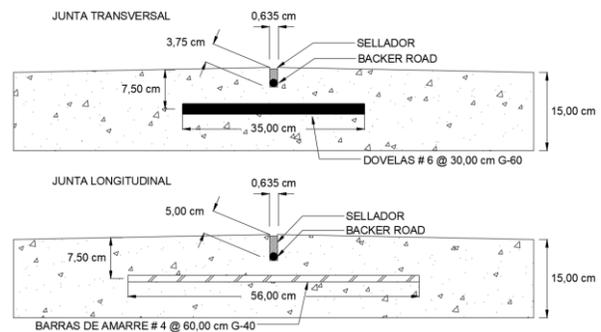


Figura 69. Detalle de juntas transversales y longitudinales.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ®.

Costo de construcción

A continuación, se muestra el costo de inversión a realizar según el diseño más adecuado, para estos costos se tomó en cuenta la longitud de la ruta, el ancho, los espesores de capa calculados para cada tipo de estructura de pavimento y los renglones de pago del CR-2010.

En la sección de apéndice se detalla el costo de construcción de cada uno de los pavimentos diseñados para la ruta La Cecilia, en estos se detalla la cantidad de materiales a usar,

las horas de trabajo de la mano de obra y del equipo (Ver Apéndice D-1, D-2 y D-3).

CUADRO 31. COSTO PAVIMENTO FLEXIBLE			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	2254,32 m ³	₡ 9.214,31	₡ 20.772.014,36
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	1127,16 m ³	₡ 14.973,43	₡ 16.877.451,71
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)	1127,16 m ³	₡ 14.973,43	₡ 16.877.451,71
Riego de imprimación (CR.413.02)	6762,96 L	₡ 407,36	₡ 2.754.964,72
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	1108,67 ton	₡ 66.297,13	₡ 73.501.639,47
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 4.996.536,06
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 408.086,25
Total			₡143.082.144,28

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 32. COSTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	3005,76 m ³	₡ 9.214,31	₡ 27.696.019,15
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	1502,90 m ³	₡ 14.973,43	₡ 22.503.568,41
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	1502,90 m ³	₡ 30.226,63	₡ 45.427.595,38
Riego de imprimación (CR.413.02)	6762,96 L	₡ 407,36	₡ 2.754.964,72
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	1108,67 ton	₡ 66.297,13	₡ 73.501.639,47
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 6.521.355,90
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 521.042,73
Total			₡185.820.185,75

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 33. COSTO PAVIMENTO RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	1127,16 m ³	₡ 9.214,31	₡ 10.386.007,18

Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	1127,16 m ³	₡ 30.230,29	₡ 34.074.372,48
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)	7514,40 m ²	₡ 24.893,50	₡187.059.697,33
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 8.733.862,26
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 684.942,04
Total			₡247.832.881,28

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

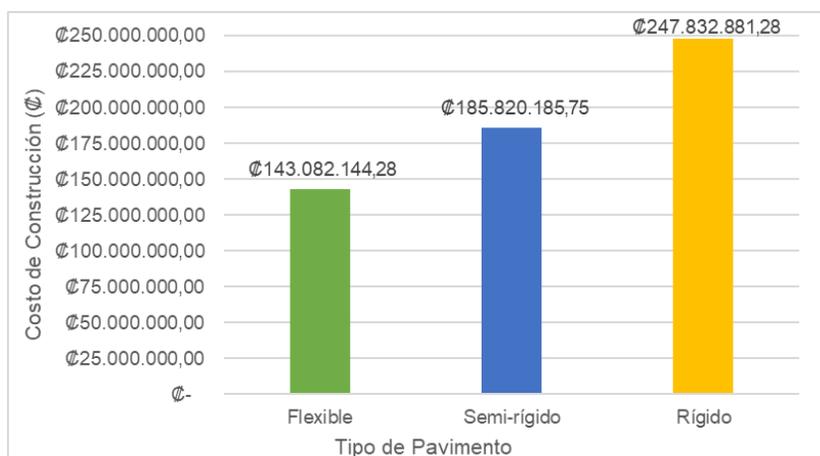


Figura 70. Costo de construcción ruta La Cecilia según tipo de pavimento.

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

En el Apéndice O como parte de los resultados del plan de conservación se formuló una lista de los deterioros más comunes a los que pueden estar expuestas las estructuras de pavimentos en Costa Rica.

Este listado pretende que las personas de la Municipalidad de Turrialba se familiaricen con los deterioros y puedan detectarlos con mayor facilidad, en este apéndice se explica cada uno de los deterioros, las causas más comunes que lo

producen y posibles intervenciones como parte del plan de conservación, además en esta misma sección se adjunta un formulario para que a los representantes de la institución puedan agilizar y facilitar las inspecciones de las condiciones de las estructuras a construir.

Seguidamente, se identificaron algunos de los deterioros que podría sufrir cada estructura durante su periodo de diseño, así como el costo que conlleva la intervención de cada deterioro y el costo total de mantenimiento (tanto en valor futuro y presente) para no afectar la funcionalidad del pavimento.

CUADRO 34. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	372,00 m	₡ 4.373,04	₡ 1.626.771,46	₡ 1.327.930,09

5	Deformaciones en la carpeta	Recuperación de base	122,76 m ³	₡ 44.264,84	₡ 5.433.951,74	₡ 3.874.332,49
5	Deformaciones en la carpeta	Carpeta de mezcla asfáltica	256,13 ton	₡106.340,17	₡ 27.236.848,12	₡19.419.496,28
8	-	Mantenimiento rutinario	372,00 m	₡ 6.133,42	₡ 2.281.631,12	₡ 1.327.930,09
9	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	44,64 m	₡ 5.149,33	₡ 229.866,21	₡ 125.031,99
TOTAL					₡ 36.809.068,65	₡26.074.720,94

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 35. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	334,80 m	₡ 4.373,04	₡ 1.464.094,31	₡ 1.195.137,08
5	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	15,50 m	₡ 3.928,40	₡ 60.890,22	₡ 43.413,88
6	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	138,58 ton	₡128.505,42	₡ 17.808.763,19	₡11.866.730,87
9	-	Mantenimiento rutinario	334,80 m	₡ 6.562,76	₡ 2.197.210,77	₡ 1.195.137,08
TOTAL					₡ 21.530.958,50	₡14.300.418,91

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 36. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	11,16 m	₡ 6.142,24	₡ 68.547,43	₡ 55.955,12
4	-	Mantenimiento rutinario	186,00 m	₡ 4.503,83	₡ 837.712,91	₡ 639.087,17
6	Grietas en la losa, escalonamiento	Sustitución de losa	148,80 m ²	₡ 95.209,18	₡ 14.167.126,71	₡ 9.440.154,72
9	-	Mantenimiento rutinario	186,00 m	₡ 6.316,86	₡ 1.174.935,69	₡ 639.087,17
TOTAL					₡ 16.248.322,74	₡10.774.284,17

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 37. VPN Y CAUE POR ESTRUCTURA		
Pavimento	VPN	CAUE
Flexible	₡ 169.156.865,21	₡ 24.084.132,04
Semi-rígido	₡ 200.120.604,66	₡ 28.492.671,94
Rígido	₡ 258.607.165,46	₡ 36.819.842,41

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

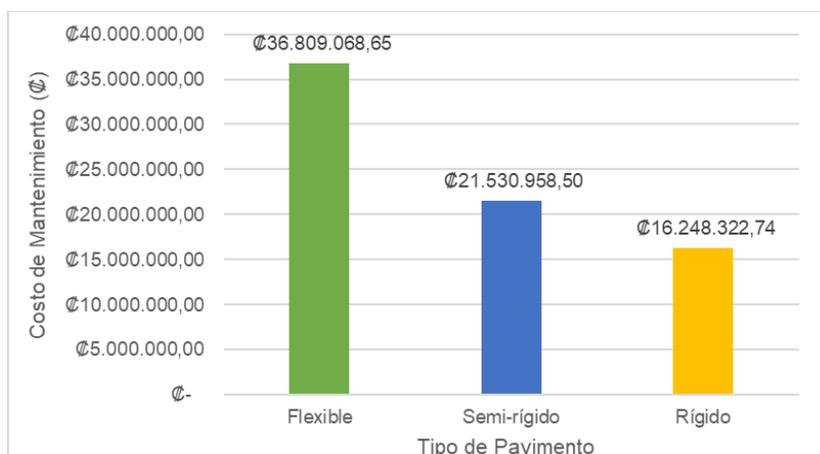


Figura 71. Costo de mantenimiento ruta La Cecilia según tipo de pavimento.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Periodo de Diseño de 15 años

Diseño de Pavimentos

En el siguiente cuadro se definen los ejes equivalentes calculados para el periodo de diseño de 15 años para la ruta La Cecilia.

Los ejes equivalentes mostrados en el cuadro siguiente son los usados para el diseño del pavimento flexible y pavimento semi-rígido, para el caso de los pavimentos rígidos los ejes equivalentes obtenidos son de 126.240,42 se utilizó la corrección de la guía de diseño de la AASHTO-93.

CUADRO 38. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO										
Vehículo	TPD	F.C	EEQ /día	EEQ /anual	Crec. (%)	F. Crec (%)	EEQ Diseño	F. Dir (%)	F. Car (%)	EEQ Carril
Liviano	285,60	0,001	0,29	104,24	4,00	20,02	2087,34	50,00	100,00	1043,67
CL	118,80	0,02	2,38	867,24	4,00	20,02	17365,26	50,00	100,00	8682,63
C2	25,20	0,63	15,88	5794,74	4,00	20,02	116031,48	50,00	100,00	58015,74
C3	3,60	1,28	4,61	1681,92	4,00	20,02	33678,07	50,00	100,00	16839,04
T3-S2	0,00	2,38	0,00	0,00	4,00	20,02	0,00	50,00	100,00	0,00
Buses	0,00	2,29	0,00	0,00	4,00	20,02	0,00	50,00	100,00	0,00
Σ										84581,08

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Flexible

En el cuadro 39 se muestran los espesores con base en la guía AASHTO-93 para el periodo de

diseño de 15 años, en el Apéndice E-1 se muestra el diseño completo de este pavimento.

CUADRO 39. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	6,65	7,00	1,15	1,22
Base Granular	0,133	1,00	3,38	15,00	0,18	0,79
Sub-base Granular	0,128	1,00	-3,86	15,00	-0,19	0,76
Σ				37,00	1,14	2,76

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Dichos espesores si cumplen con los parámetros de aceptación como se muestra en el cuadro siguiente.

CUADRO 40. PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ag. Longitudinal (pies/milla)	2000,00	686,62	Cumple
Área agrietada (%)	75,00	3,18	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	25,00	14,59	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

A continuación, se muestra el comportamiento de la estructura de pavimento flexible con los espesores establecidos anteriormente.

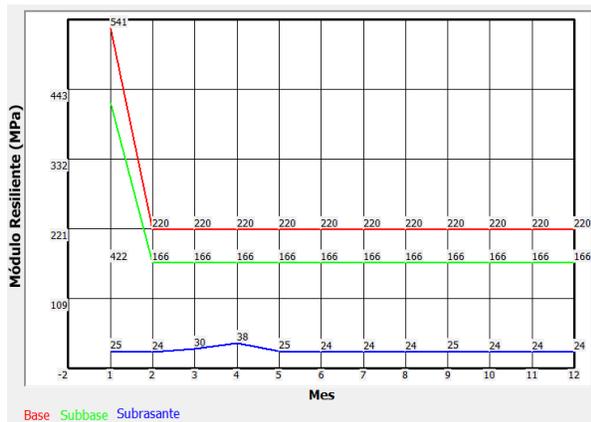


Figura 72. Módulo resiliente del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME®.

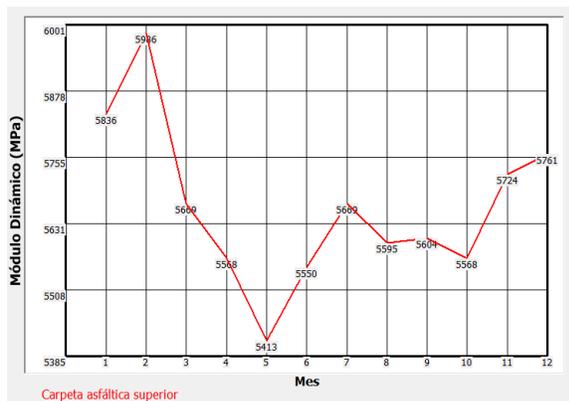


Figura 73. Módulo dinámico de la capa asfáltica.

Fuente: CR-ME®.

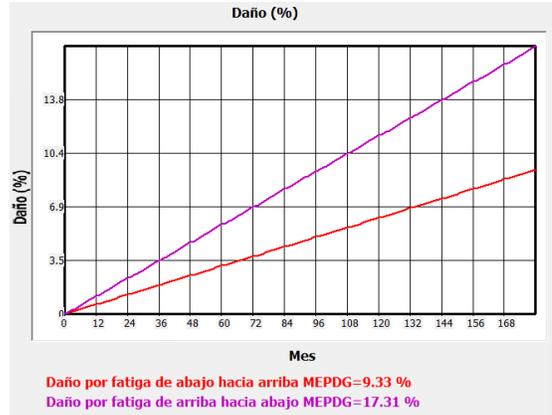


Figura 74. Porcentaje de daño del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME®.



Figura 75. Área agrietada del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME®.

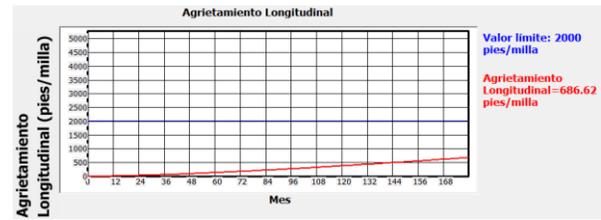


Figura 76. Agrietamiento longitudinal del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME®.

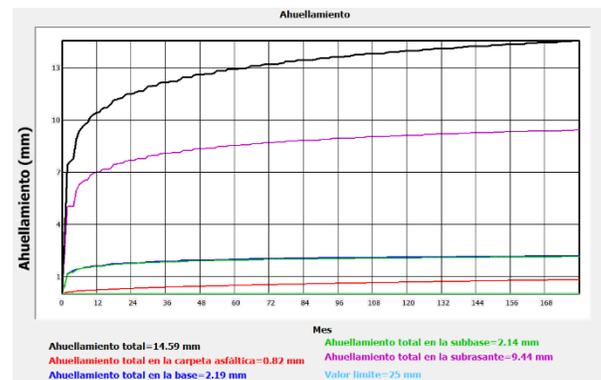


Figura 77. Ahuellamiento del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME®.

Pavimento Semi-rígido

Seguidamente se muestran los espesores obtenidos con la metodología AASHTO-93 para la estructura semi-rígida.

CUADRO 41. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	0,004	6,00	0,001	1,04
Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	0,158	1,00	5,62	20,00	0,35	1,24
Sub-base Granular	0,128	1,00	9,57	20,00	0,48	1,01
			Σ	46,00	0,83	3,29

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Los espesores calculados cumplen con el parámetro de aceptación de la MEPDG ahuellamiento total.

CUADRO 42. PARÁMETRO DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ahuellamiento total (mm)	25,00	7,78	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

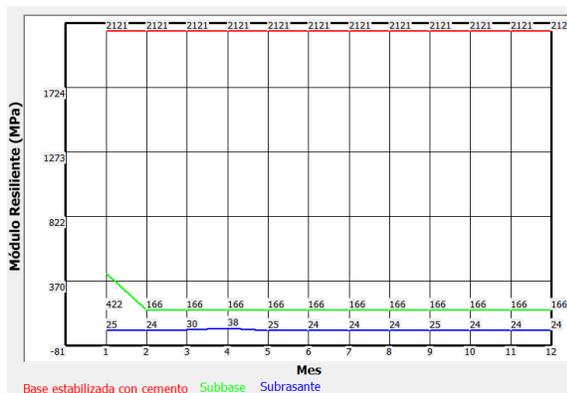


Figura 78. Módulo resiliente del pavimento semi-rígido.
Fuente: CR-ME ®.

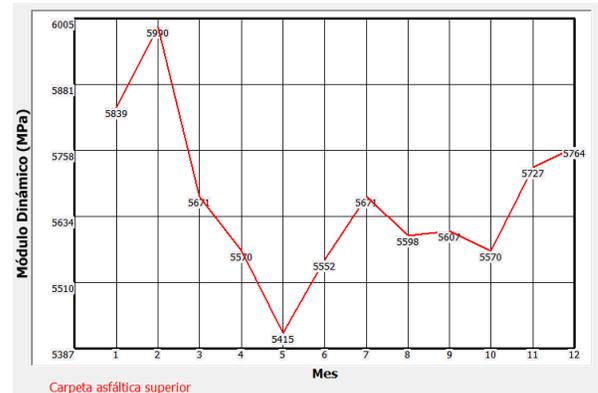


Figura 79. Módulo dinámico de la capa asfáltica.
Fuente: CR-ME ®.

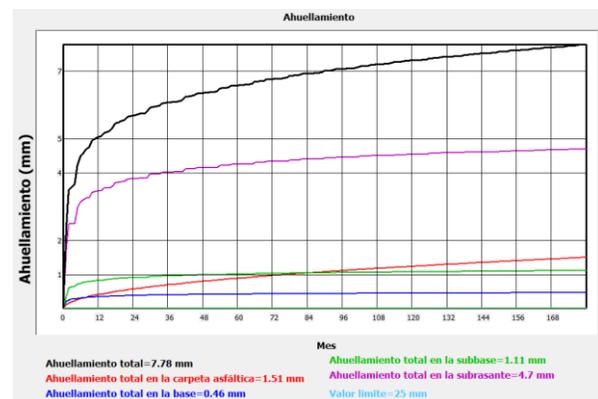


Figura 80. Ahuellamiento del pavimento semi-rígido.
Fuente: CR-ME ®.

Fue verificada la fatiga por medio del modelo de desempeño de la PCA, el esfuerzo en la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) para este periodo es el mismo esfuerzo usado

para el periodo de 10 años porque los espesores son los mismos (Ver figura 61).

CUADRO 43. MODELO DE FATIGA PCA	
Esfuerzo a tensión (psi)	49,73
Módulo de ruptura base estabilizada 28 días (psi)	107,01
Fatiga (PCA)	1409370,65
Ejes Equivalentes	84581,08
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

La fatiga en la capa asfáltica cumple con lo establecido y la deformación unitaria máxima a la tensión es la misma del periodo anterior (Ver figura 62).

CUADRO 44. MODELO FATIGA CAPA ASFÁLTICA	
Deformación unitaria máxima a tensión	0,0000131
Módulo resiliente de la carpeta asfáltica (kPa)	3102642,00
Número de repeticiones	3,56E+50
Ejes Equivalentes	84581,08
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

Pavimento Rígido

Seguidamente se muestran los datos obtenidos para determinar el módulo efectivo de reacción corregido de la sub-rasante y los espesores de las capas de este pavimento.

CUADRO 45. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93	
Módulo de reacción compuesto (pci)	839,30
Módulo de reacción compuesto corregido (pci)	839,30
Daño relativo	6,58
Módulo efectivo de reacción (pci)	860,00
Pérdida de soporte	1,00
Módulo efectivo de reacción corregido (pci)	215,00
Espesor de losa supuesto (in)	6,00
Espesor de base supuesto (in)	6,00
Espesor de losa calculado (in)	3,45

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

El espesor de losa calculado es de 3,45 in (8,76 cm), como no cumple con el mínimo establecido se decide usar un espesor de losa de 6,00 in (15,00 cm).

El modelo de escalonamiento cumple con el máximo establecido el cual es de 0,12 in (0,30 cm) y el máximo esfuerzo a tensión aplicado en la losa es de 180,40 psi (Ver figura 63).

CUADRO 46. MODELO DE ESCALONAMIENTO	
Ejes Equivalentes (millones)	0,1262
Esfuerzo máximo (psi)	180,40
Separación de juntas transversales (ft)	10,50
Módulo de reacción efectivo (pci)	195,00
Escalonamiento (in)	0,017
Escalonamiento (cm)	0,043
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

Con respecto al índice de bombeo la severidad del pavimento rígido se clasifica como nula.

CUADRO 47. MODELO DE BOMBEO Y EROSIÓN	
Ejes Equivalentes (millones)	0,1262
Tipo de suelo	0
Precipitación anual (cm)	227,84
Espesor de losa (in)	6,00
Índice de congelación	0,00
Índice de bombeo y erosión	0,80
Severidad	Nula

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

Para el modelo de fatiga las repeticiones de carga superan los ejes equivalentes de diseño, debido a las buenas características de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y la sub-rasante.

CUADRO 48. MODELO DE FATIGA	
Esfuerzo máximo (psi)	180,40
Módulo ruptura (psi)	640,00
Fatiga	1,84E+14
Ejes Equivalentes	126240,42
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

Las barras de amarre y dovelas que tendrán las losas de concreto son del mismo calibre y dimensiones que el acero de refuerzo del periodo anterior, ya que se utilizaron los mismos espesores de capas, las dovelas # 6 grado 60 separadas 30,00 cm de 35,00 cm de longitud, mientras que las barras de amarre están separadas a cada 60,00 cm, son de 56,00 cm de longitud de varilla # 4 grado 40. Al igual que el periodo de diseño de 10 años para este mismo periodo la dovela 1 es la que recibe la mayor carga por llanta 1.948,67 lb respectivamente (Ver figura 64).

En los Apéndices E-3, E-4 y E-5 se detalla el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento rígida. A continuación, se detalla las dimensiones de las estructuras de pavimentos diseñadas para la ruta La Cecilia en el periodo de 15 años.

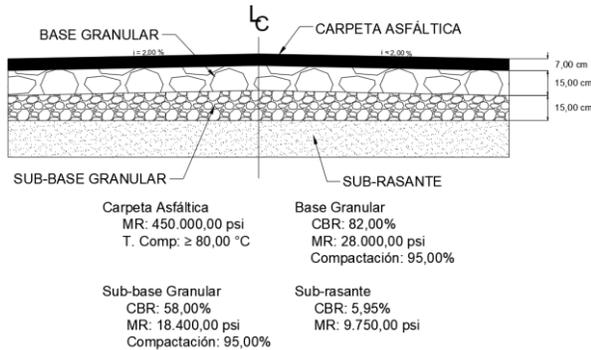


Figura 81. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

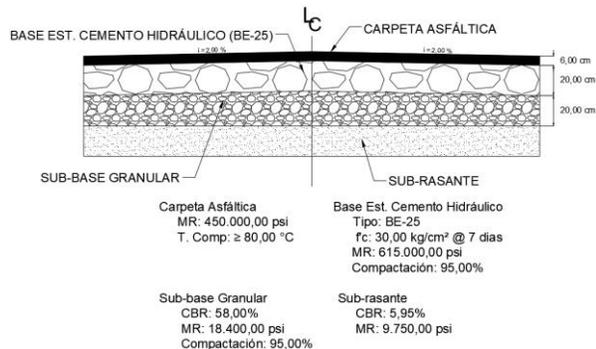


Figura 82. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

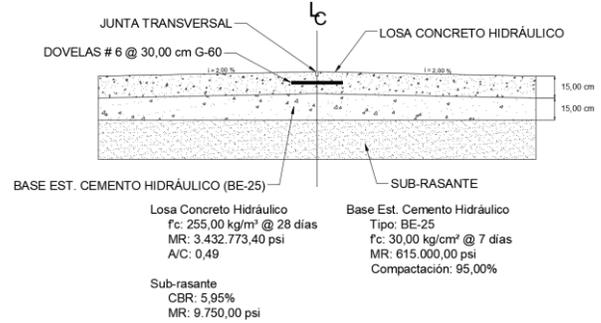


Figura 83. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

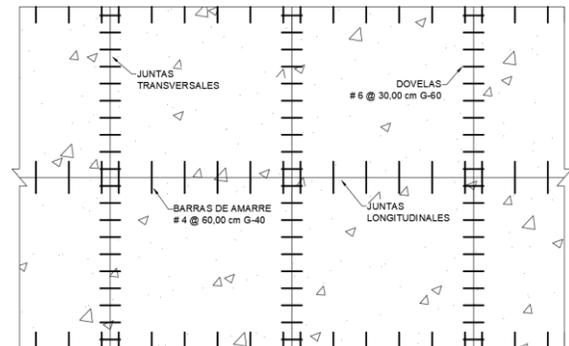


Figura 84. Distribución de juntas, dovelas y barras de amarre.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

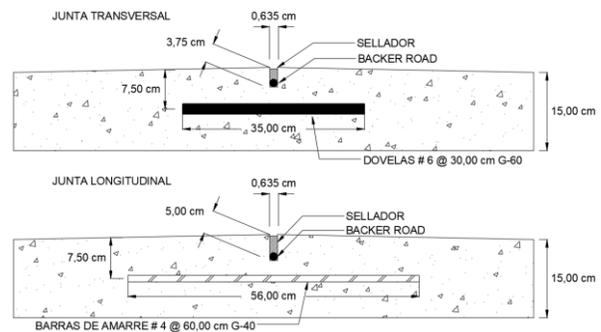


Figura 85. Detalle de juntas transversales y longitudinales.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

Costo de construcción

A continuación, se muestra el costo de inversión a realizar por tipo de pavimento, en la sección de anexos se adjunta el costo a detalle de cada estructura según los renglones de pago del CR-2010 (Ver Apéndice F-1, D-2 y D-3).

Nota: Como las estructuras de pavimento semi-rígido y rígido poseen los mismos espesores que las estructuras del periodo anterior el costo de construcción será el mismo para ambos periodos, por lo que el detalle del costo de estos aparece únicamente en los apéndices del periodo anterior.

CUADRO 49. COSTO PAVIMENTO FLEXIBLE			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	2254,32 m ³	₡ 9.214,31	₡ 20.772.014,36
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	1127,16 m ³	₡ 14.973,43	₡ 16.877.451,71
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)	1127,16 m ³	₡ 14.973,43	₡ 16.877.451,71
Riego de imprimación (CR.413.02)	6762,96 L	₡ 407,36	₡ 2.754.964,72
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	1293,45 ton	₡ 66.297,13	₡ 85.752.023,21
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 5.451.025,30
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 441.754,17
Total			₡155.820.685,17

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 50. COSTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	3005,76 m ³	₡ 9.214,31	₡ 27.696.019,15
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	1502,90 m ³	₡ 14.973,43	₡ 22.503.568,41
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	1502,90 m ³	₡ 30.226,63	₡ 45.427.595,38
Riego de imprimación (CR.413.02)	6762,96 L	₡ 407,36	₡ 2.754.964,72
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	1108,67 ton	₡ 66.297,13	₡ 73.501.639,47
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 6.521.355,90
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 521.042,73
Total			₡185.820.185,75

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 51. COSTO PAVIMENTO RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	1127,16 m ³	₡ 9.214,31	₡ 10.386.007,18
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	1127,16 m ³	₡ 30.230,29	₡ 34.074.372,48

Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)	7514,40 m ²	₡ 24.893,50	₡187.059.697,33
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 8.733.862,26
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 684.942,04
Total			₡247.832.881,28

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

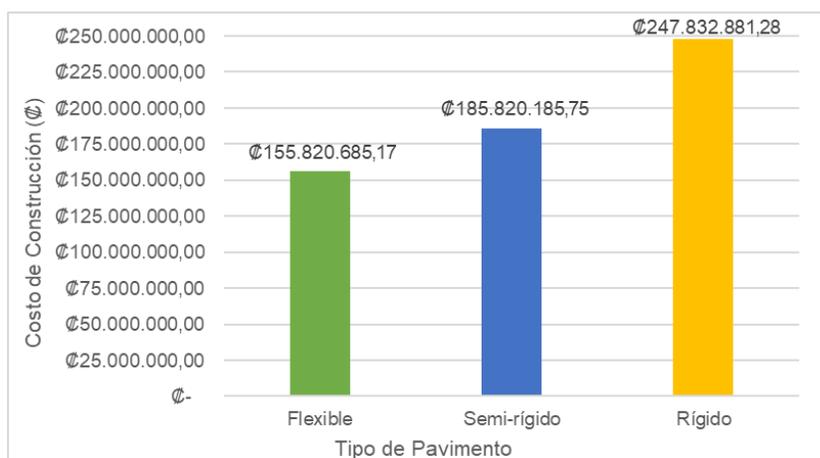


Figura 86. Costo de construcción ruta La Cecilia según tipo de pavimento.

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

que conlleva la intervención de cada deterioro y el costo total de mantenimiento para no afectar la funcionalidad del pavimento.

Seguidamente, se identificaron algunos de los deterioros que podría sufrir cada estructura durante su periodo de diseño, así como el costo

CUADRO 52. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	372,00 m	₡ 4.373,04	₡ 1.626.771,46	₡ 1.327.930,09
6	Deformaciones en la carpeta	Recuperación de base	122,76 m ³	₡ 47.363,38	₡ 10.398.133,41	₡ 6.928.715,34
6	Deformaciones en la carpeta	Carpeta de mezcla asfáltica	219,54 ton	₡ 113.783,98	₡ 13.968.121,58	₡ 9.307.549,20
10	-	Mantenimiento rutinario	372,00 m	₡ 7.022,15	₡ 2.612.239,47	₡ 1.327.930,09
12	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	116,41 ton	₡ 192.851,99	₡ 22.449.996,15	₡ 9.968.066,77

14	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	69,44 m	₡ 7.222,21	₡ 501.509,95	₡ 194.494,20
TOTAL					₡ 51.556.772,02	₡29.054.685,69

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 53. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	334,80 m	₡ 4.373,04	₡ 1.464.094,31	₡ 1.195.137,08
4	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	9,92 m	₡ 3.671,40	₡ 36.420,32	₡ 27.784,89
8	Agrietamiento	Carpeta de mezcla asfáltica	182,95 ton	₡130.271,28	₡ 23.833.078,66	₡13.871.068,77
9	-	Mantenimiento rutinario	334,80 m	₡ 6.562,76	₡ 2.197.210,77	₡ 1.195.137,08
12	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	88,69 ton	₡192.851,99	₡ 17.104.736,93	₡ 7.594.707,76
14	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	34,72 m	₡ 7.222,21	₡ 250.754,97	₡ 97.247,10
TOTAL					₡ 44.886.295,97	₡23.981.082,68

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 54. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
4	-	Mantenimiento rutinario	186,00 m	₡ 4.503,83	₡ 837.712,91	₡ 639.087,17
8	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	29,76 m	₡ 8.614,81	₡ 256.376,86	₡ 149.213,66
10	Grietas en la losa, escalonamiento	Sustitución de losa	186,00 m ²	₡124.799,82	₡ 23.212.766,46	₡11.800.193,40
12	-	Mantenimiento rutinario	186,00 m	₡ 7.738,42	₡ 1.439.346,74	₡ 639.087,17
14	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	52,08 m	₡ 12.928,51	₡ 673.316,92	₡ 261.123,91
TOTAL					₡ 26.419.519,89	₡13.488.705,31

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 55. VPN Y CAUE POR ESTRUCTURA		
Pavimento	VPN	CAUE
Flexible	₡ 184.875.370,86	₡20.298.321,96
Semi-rígido	₡ 209.801.268,43	₡23.035.051,53
Rígido	₡ 261.321.586,59	₡28.691.705,53

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

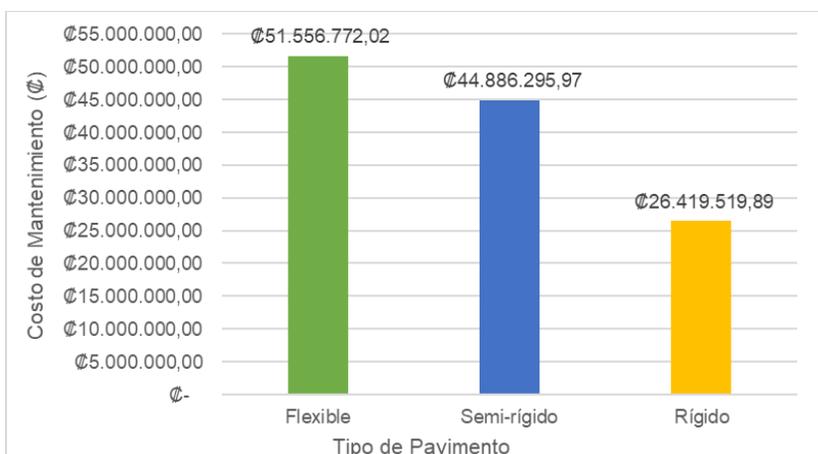


Figura 87. Costo de mantenimiento ruta La Cecilia según tipo de pavimento.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

Ruta Parque el Silencio

Periodo de Diseño de 10 años

Diseño de pavimento

A continuación se detalla los ejes equivalentes calculados para la sección Parque el Silencio, esta ruta incluye el sector que da acceso al Liceo Bilingüe Experimental de Turrialba.

En el Apéndice A-2 se detalla el TPD para el cálculo de los ejes equivalentes de esta ruta,

cabe mencionar que dichas mediciones son usadas para el diseño de ambos sectores que componen la ruta, debido a que el tramo que da acceso al centro educativo presentaba una cantidad de vehículos muy escasa por las malas condiciones de la vía.

En el siguiente cuadro se muestran los ejes equivalentes para el diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos, por su parte para el diseño de los pavimentos rígidos se obtuvo un total de 323.451,67 ejes equivalentes utilizando el criterio establecido por la AASHTO.

CUADRO 56. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO										
Vehículo	TPD	F.C	EEQ /día	EEQ /anual	Crec. (%)	F. Crec (%)	EEQ Diseño	F. Dir (%)	F. Car (%)	EEQ Carril
Liviano	241,20	0,001	0,24	88,04	4,00	12,01	1056,99	50,00	100,00	528,50
CL	91,20	0,02	1,82	665,76	4,00	12,01	7993,19	50,00	100,00	3996,59
C2	43,20	0,63	27,22	9933,84	4,00	12,01	119266,75	50,00	100,00	59633,37
C3	16,80	1,28	21,50	7848,96	4,00	12,01	94235,45	50,00	100,00	47117,73
T3-S2	15,60	2,38	37,13	13551,72	4,00	12,01	162703,40	50,00	100,00	81351,70
Buses	4,80	2,29	10,99	4012,08	4,00	12,01	48169,46	50,00	100,00	24084,73
Σ										216712,62

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

Como los ejes equivalentes son menores a 500.000,00 se estableció un mínimo de 7,00 cm para la capa asfáltica, para la base granular el mínimo espesor a usar es de 15,00 cm y para la sub-base granular un mínimo espesor de 15,00 cm según el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos y el tamaño nominal de los granos de los materiales como se explicó anteriormente.

Pavimento Flexible

En el cuadro 57 se detallan los espesores calculados para este tramo según la AASHTO-93.

En el Apéndice G-1 se muestra el diseño completo de este pavimento, se detalla el cumplimiento del SN total > SN requerido.

CUADRO 57. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	7,97	8,00	1,38	1,39
Base Granular	0,133	1	4,95	15,00	0,26	0,79
Sub-base Granular	0,128	1	-0,51	15,00	-0,03	0,76
			Σ	38,00	1,62	2,93

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En el siguiente cuadro se demuestra que los espesores conseguidos cumplen con los valores límites de la MEPDG.

CUADRO 58. PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE			
Parámetros	Límite	Valor	Condición
Ag. Longitudinal (pies/milla)	2000,00	1285,21	Cumple
Área agrietada (%)	75,00	12,58	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	25,00	9,65	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Las siguientes figuras muestran el comportamiento que tendrá la estructura de pavimento flexible a lo largo de su periodo de diseño.

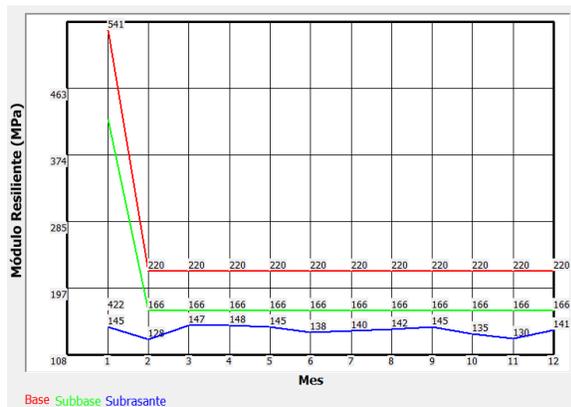


Figura 88. Módulo resiliente del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME ®.

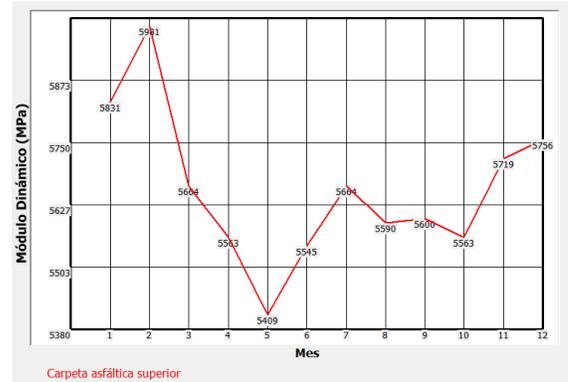


Figura 89. Módulo dinámico de la capa asfáltica.

Fuente: CR-ME ®.

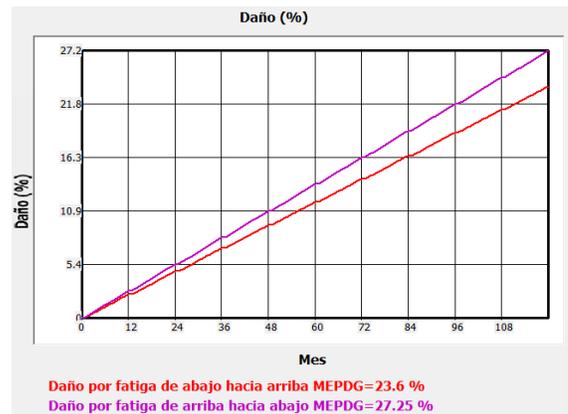


Figura 90. Porcentaje de daño del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME ®.

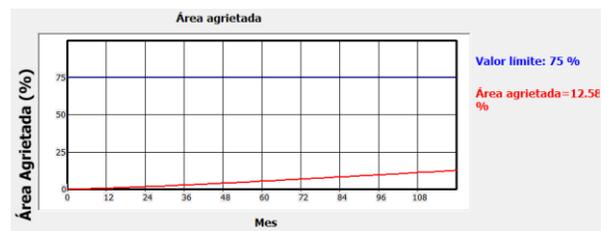


Figura 91. Área agrietada del pavimento flexible.

Fuente: CR-ME ®.

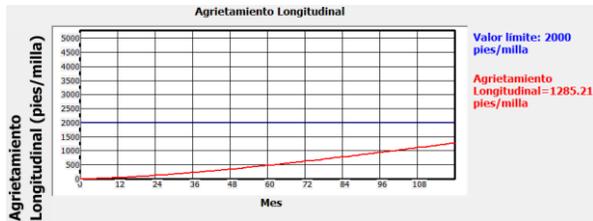


Figura 92. Agrietamiento longitudinal del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ©.

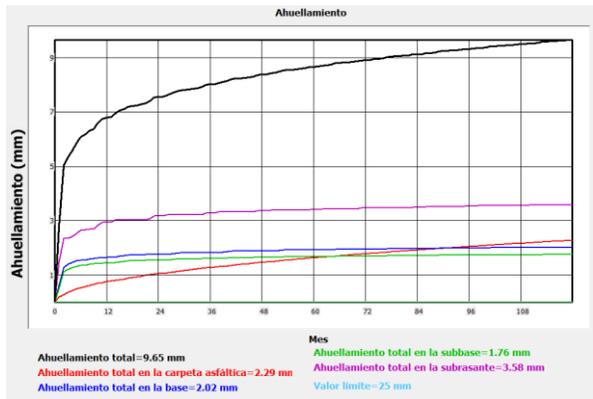


Figura 93. Ahuellamiento del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ©.

CUADRO 59. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93

Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	0,61	7,00	0,11	1,22
Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	0,158	1,00	6,94	20,00	0,43	1,24
Sub-base Granular	0,128	1,00	6,27	20,00	0,32	1,01
			Σ	47,00	0,85	3,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©.

En el Apéndice G-2 se muestra el diseño completo del pavimento semi-rígido. El ahuellamiento total cumple con el límite establecido en la MEPDG.

CUADRO 60. PARÁMETRO DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ahuellamiento total (mm)	25,00	5,09	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©.

Pavimento Semi-rígido

En el siguiente cuadro se muestran los espesores de las capas del pavimento semi-rígido según la AASHTO-93, para la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) el espesor mínimo es 15,00 cm. (Leiva, Arce & Castro, 2005).

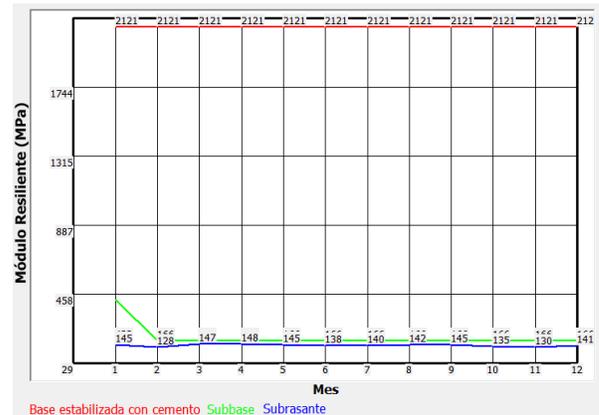


Figura 94. Módulo resiliente del pavimento semi-rígido.
Fuente: CR-ME ©.

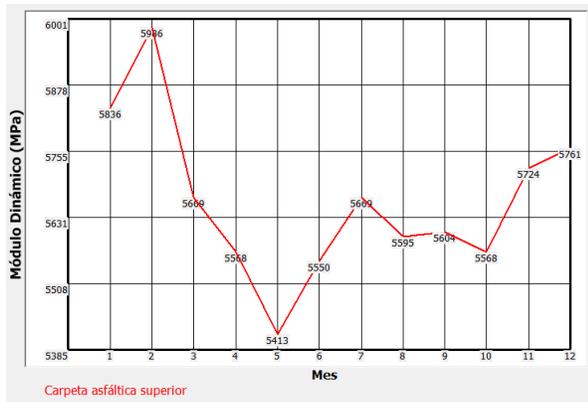


Figura 95. Módulo dinámico de la capa asfáltica.
Fuente: CR-ME ®.

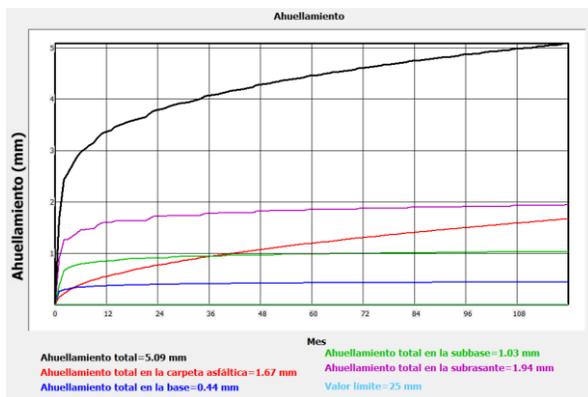


Figura 96. Ahuellamiento del pavimento semi-rígido.
Fuente: CR-ME ®.

El esfuerzo a tensión de la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) es de 46,89 psi, con esto se revisó que el modelo de fatiga de la PCA cumple con lo determinado.

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.1939e+02	1.1709e+02	1.2004e+02	-4.2224e-16	-4.0778e-31	-2.2198e-15
2	9.2397e+00	-2.0469e+00	2.1237e-01	-1.3822e-15	-5.6476e-32	0.0000e+00
3	4.3402e+01	4.2193e+01	9.0807e+01	-2.2193e-16	-1.0912e-18	-5.9401e-03
4	4.8755e+00	-7.9204e-01	9.6237e-02	-6.9408e-16	-7.9819e-17	0.0000e+00
5	-4.6890e+01	-4.4046e+01	2.4714e+00	5.2241e-16	-7.6439e-18	-4.1611e-02
6	-9.9586e+00	5.1523e+00	6.5147e-01	1.8505e-15	-2.8135e-17	0.0000e+00
7	1.9467e-01	2.6939e-01	1.2069e+00	1.3726e-17	-9.8520e-18	-5.3632e-02
8	2.2156e-01	5.0590e-01	6.8359e-01	3.4822e-17	-2.2060e-17	0.0000e+00

Figura 97. Esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25).
Fuente: PITRA-PAVE ®.

CUADRO 61. MODELO DE FATIGA PCA	
Esfuerzo a tensión (psi)	46,48
Módulo de ruptura base estabilizada 28 días (psi)	107,01
Fatiga (PCA)	3289611,49

Ejes Equivalentes	216712,62
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Se verificó la fatiga en la capa asfáltica y está supera las repeticiones usadas para el diseño, la deformación unitaria máxima a la tensión es mínima según los resultados obtenidos en el PITRA PAVE ®.

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	8.0878e-05	7.3983e-05	8.2824e-05	-2.5334e-21	-2.4467e-36	-1.3319e-20
2	2.1960e-05	-1.1900e-05	-5.1225e-06	-8.2933e-21	-3.3885e-37	0.0000e+00
3	-6.9968e-06	-1.0621e-05	1.3522e-04	-1.3316e-21	-6.5471e-24	-3.5641e-08
4	1.1378e-05	-5.6270e-06	-2.9622e-06	-4.1645e-21	-4.7891e-22	0.0000e+00
5	-5.9343e-05	-5.3563e-05	4.0984e-05	2.1236e-21	-3.1073e-23	-1.6915e-07
6	-1.8552e-05	1.2161e-05	3.0131e-06	7.5225e-21	-1.1437e-22	0.0000e+00
7	-5.0496e-05	-3.8846e-05	1.0731e-04	4.2802e-21	-3.0721e-21	-1.6724e-05
8	-3.3733e-05	1.0601e-05	3.8304e-05	1.0859e-20	-6.8790e-21	0.0000e+00

Figura 98. Deformación unitaria a la tensión en la capa asfáltica.
Fuente: PITRA PAVE ®.

CUADRO 62. MODELO FATIGA CAPA ASFÁLTICA

Deformación unitaria máxima a tensión	0,0000119
Módulo resiliente de la carpeta asfáltica (kPa)	3102642,00
Número de repeticiones	6,53E+50
Ejes Equivalentes	216712,62
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Rígido

Seguidamente se muestran los datos obtenidos para determinar el módulo efectivo de reacción corregido de la sub-rasante y los espesores de capas de este pavimento.

CUADRO 63. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93	
Módulo de reacción compuesto (pci)	807,17
Módulo de reacción compuesto corregido (pci)	807,17
Daño relativo	6,84
Módulo efectivo de reacción (pci)	800,00
Pérdida de soporte	1,00
Módulo efectivo de reacción corregido (pci)	210,00
Espesor de losa supuesto (in)	6,00
Espesor de base supuesto (in)	6,00
Espesor de losa calculado (in)	4,46

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El espesor de losa calculado es de 4,46 in (11,33 cm), como no cumple con el mínimo establecido se decide usar 6,00 in (15,00 cm) como espesor de losa.

El modelo de escalonamiento si cumple, ya que el valor es menor al máximo permitido, el máximo esfuerzo a tensión fue de 181,40 psi.

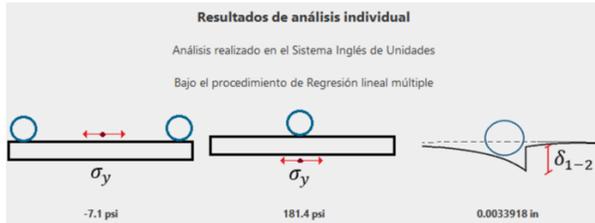


Figura 99. Esfuerzo a tensión del pavimento rígido
Fuente: ApRIGID ®.

CUADRO 64. MODELO DE ESCALONAMIENTO	
Ejes Equivalentes (millones)	0,3235
Esfuerzo máximo (psi)	181,40
Separación de juntas transversales (ft)	10,50
Módulo de reacción efectivo (pci)	210,00
Escalonamiento (in)	0,030
Escalonamiento (cm)	0,076
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El índice de bombeo indica que la estructura tendrá una severidad baja la cual es aceptable.

CUADRO 65. MODELO DE BOMBEO Y EROSIÓN	
Ejes Equivalentes (millones)	0,3235
Tipo de suelo	0
Precipitación anual (cm)	227,84
Espesor de losa (in)	6,00
Índice de congelación	0,00
Índice de bombeo y erosión	1,21
Severidad	Baja

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El modelo de fatiga indica que las repeticiones de carga hasta la falla son muchos mayores que las repeticiones de carga que usadas para el diseño de la estructura.

CUADRO 66. MODELO DE FATIGA	
Esfuerzo máximo (psi)	181,40
Módulo ruptura (psi)	640,00
Fatiga	1,61E+14
Ejes Equivalentes	323451,67
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

A continuación, se muestran los datos obtenidos para el acero de refuerzo que corresponde a las dovelas y barras de amarre.

CUADRO 67. DOVELAS Y BARRAS DE AMARRE		
	Dovelas	Barras de amarre
Calibre Varilla	6	4
Longitud (cm)	35,00	56,00
Separación (cm)	30,00	55,00
Grado	60	40

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

La primera dovela es la que mayor carga recibe de la carga generada por llanta, esta resiste un total de 1.940,34 lb.

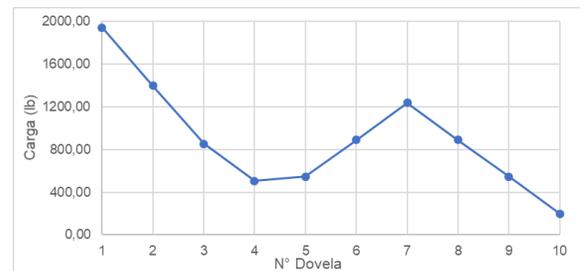


Figura 100. Fracción de carga recibida por cada dovela.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En los Apéndices G-3, G-4 y G-5 se detalla el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento rígida. A continuación, se detalla las dimensiones de las estructuras de pavimentos diseñadas para la ruta Parque el Silencio para el periodo de 10 años.

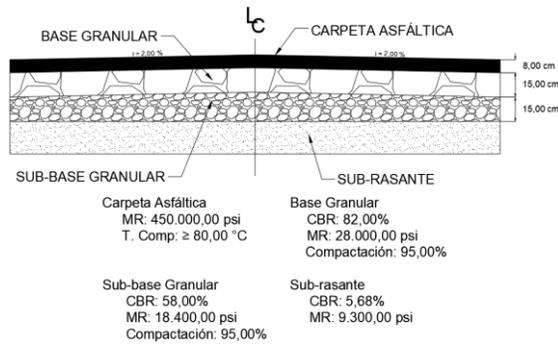


Figura 101. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

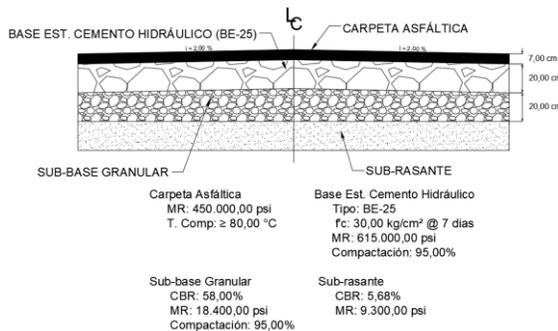


Figura 102. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

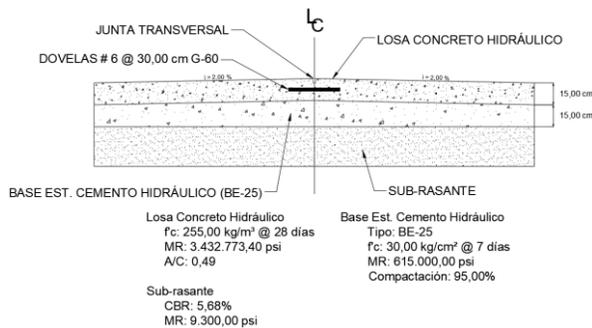


Figura 103. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

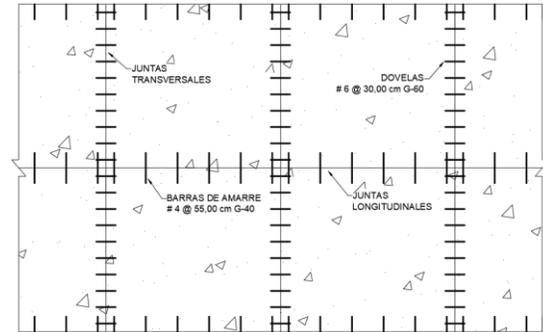


Figura 104. Distribución de juntas, dovelas y barras de amarre.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

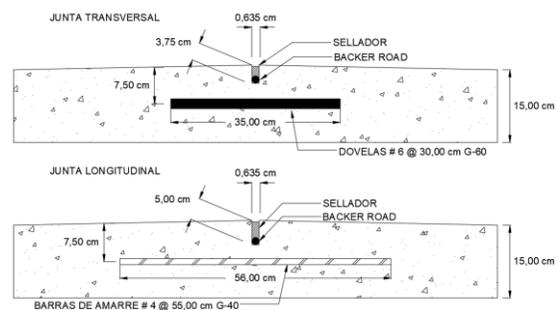


Figura 105. Detalle de juntas transversales y longitudinales.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

Costo de construcción

A continuación, se define el costo de inversión a realizar para cada uno de los tres tipos de pavimentos para este periodo de diseño. En los apéndices H-1, H-2 y H-3 se muestra con mayor detalle el costo de construcción respectivo de cada estructura de pavimento.

CUADRO 68. COSTO PAVIMENTO FLEXIBLE			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	967,72 m ³	₡ 9.214,31	₡ 8.916.876,81
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	483,86 m ³	₡ 14.973,43	₡ 7.245.043,99
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)	483,86 m ³	₡ 14.973,43	₡ 7.245.043,99
Riego de imprimación (CR.413.02)	2903,16 L	₡ 407,36	₡ 1.182.633,55
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	634,57 ton	₡ 66.297,13	₡ 42.070.169,98
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00

Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 2.617.544,80
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 231.853,98
Total			₡ 76.403.167,11

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 69. COSTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	1290,30 m³	₡ 9.214,31	₡ 11.889.230,51
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	645,15 m³	₡ 14.973,43	₡ 9.660.108,56
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	645,15 m³	₡ 30.231,10	₡ 19.503.596,14
Riego de imprimación (CR.413.02)	2903,16 L	₡ 407,36	₡ 1.182.633,55
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	555,25 ton	₡ 66.297,13	₡ 36.811.481,61
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 3.077.112,97
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 265.898,13
Total			₡ 89.284.061,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 70. COSTO PAVIMENTO RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	483,86 m³	₡ 9.214,31	₡ 4.458.438,41
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03))	483,86 m³	₡ 30.235,21	₡ 14.629.609,76
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)	3225,74 m²	₡ 24.931,82	₡ 80.423.569,38
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 3.836.348,41
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 322.141,21
Total			₡ 110.564.107,17

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

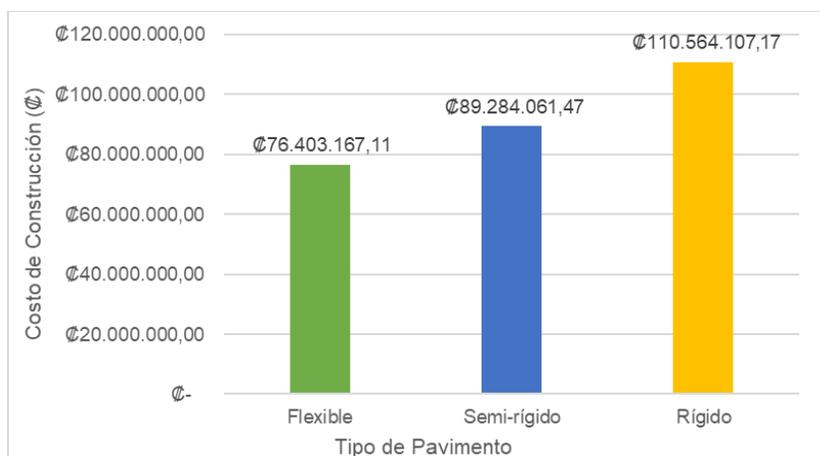


Figura 106. Costo de construcción ruta Parque el Silencio según tipo de pavimento.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

como el costo total que conlleva la intervención de para no afectar la funcionalidad del pavimento.

A continuación, se algunos de los deterioros posibles que puede presentar cada estructura así

CUADRO 71. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	159,69 m	C\$ 4.373,04	C\$ 698.331,01	C\$ 570.046,12
5	Deformaciones en la carpeta	Recuperación de base	52,70 m ³	C\$ 44.264,84	C\$ 2.332.655,25	C\$ 1.663.150,96
5	Deformaciones en la carpeta	Carpeta de mezcla asfáltica	109,95 ton	C\$106.340,17	C\$ 11.692.076,01	C\$ 8.336.288,61
8	-	Mantenimiento rutinario	159,69 m	C\$ 6.133,42	C\$ 979.445,36	C\$ 570.046,12
9	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	19,16 m	C\$ 5.149,33	C\$ 98.675,63	C\$ 53.673,01
TOTAL					C\$ 15.801.183,26	C\$11.193.204,80

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 72. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	143,72 m	C\$ 4.373,04	C\$ 628.497,91	C\$ 513.041,51
5	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	6,65 m	C\$ 3.928,40	C\$ 26.138,60	C\$ 18.636,46
6	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	69,41 ton	C\$128.505,42	C\$ 8.919.079,40	C\$ 5.943.159,20
9	-	Mantenimiento rutinario	143,72 m	C\$ 6.562,76	C\$ 943.205,88	C\$ 513.041,51
TOTAL					C\$ 10.516.921,79	C\$ 6.987.878,68

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 73. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	4,79 m	₺ 6.142,24	₺ 29.425,64	₺ 24.020,09
4	-	Mantenimiento rutinario	79,85 m	₺ 4.503,83	₺ 359.608,53	₺ 274.343,63
6	Grietas en la losa, escalonamiento	Sustitución de losa	63,88 m ²	₺ 95.209,18	₺ 6.081.581,90	₺ 4.052.414,80
9	-	Mantenimiento rutinario	79,85 m	₺ 6.316,86	₺ 504.369,57	₺ 274.343,63
TOTAL					₺ 6.974.985,64	₺ 4.625.122,15

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 74. VPN Y CAUE POR ESTRUCTURA		
Pavimento	VPN	CAUE
Flexible	₺ 87.596.371,91	₺ 12.471.752,68
Semi-rígido	₺ 96.271.940,15	₺ 13.706.958,42
Rígido	₺ 115.189.229,32	₺ 16.400.354,81

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

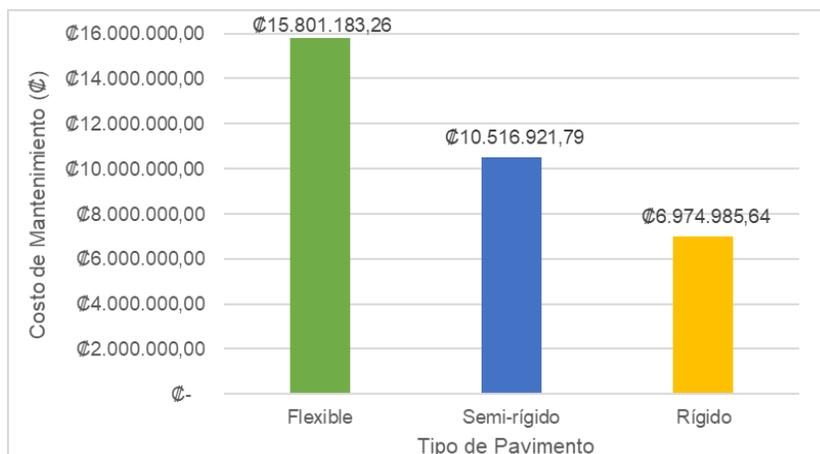


Figura 107. Costo de mantenimiento ruta Parque el Silencio según tipo de pavimento.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Periodo de Diseño de 15 años

Diseño de Pavimentos

En el siguiente cuadro se detalla los ejes equivalentes calculados para el periodo de diseño de 15 años para la ruta Parque el Silencio.

Los ejes equivalentes del siguiente cuadro corresponden a los ejes calculados para el diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos, para el caso de los pavimentos rígidos los ejes equivalentes aumentan a 539.447,37 usando la correlación de la guía AASHTO-93.

CUADRO 75. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO										
Vehículo	TPD	F.C	EEQ /día	EEQ /anual	Crec. (%)	F. Crec (%)	EEQ Diseño	F. Dir (%)	F. Car (%)	EEQ Carril
Liviano	241,20	0,001	0,24	88,04	4,00	20,02	1762,84	50,00	100,00	881,42
CL	91,20	0,02	1,82	665,76	4,00	20,02	13330,90	50,00	100,00	6665,45

C2	43,20	0,63	27,22	9933,84	4,00	20,02	198911,12	50,00	100,00	99455,56
C3	16,80	1,28	21,50	7848,96	4,00	20,02	157164,34	50,00	100,00	78582,17
T3-S2	15,60	2,38	37,13	13551,72	4,00	20,02	271354,05	50,00	100,00	135677,03
Buses	4,80	2,29	10,99	4012,08	4,00	20,02	80336,24	50,00	100,00	40168,12
									Σ	361429.74

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Flexible

En el siguiente cuadro se encuentran los espesores calculados para el pavimento flexible según la AASHTO-93.

En el Apéndice I-1 se muestra el diseño completo de este pavimento, se detalla el cumplimiento del SN total > SN requerido.

CUADRO 76. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	8,75	9,00	1,52	1,56
Base Granular	0,133	1,00	4,53	15,00	0,24	0,79
Sub-base Granular	0,128	1,00	-0,32	15,00	-0,02	0,76
			Σ	39,00	1,74	3,10

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En el siguiente cuadro se revisa que efectivamente los espesores calculados cumplen con los valores límites de la MEPDG.

CUADRO 77. PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE			
Parámetros	Límite	Valor	Condición
Ag. Longitudinal (pies/milla)	2000,00	1631,56	Cumple
Área agrietada (%)	75,00	25,10	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	25,00	10,20	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Seguidamente se expone el comportamiento de la estructura de pavimento flexible a lo largo de su periodo de diseño de 15 años.

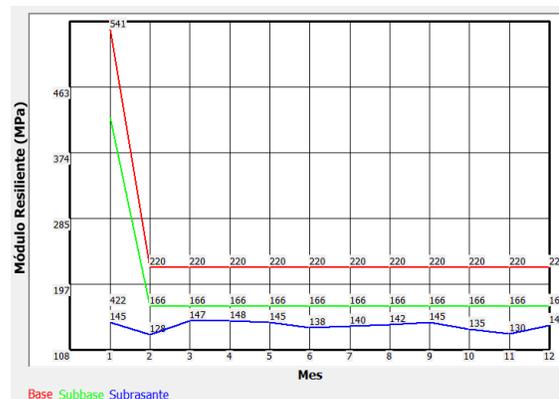


Figura 108. Módulo resiliente del pavimento flexible. Fuente: CR-ME ®.

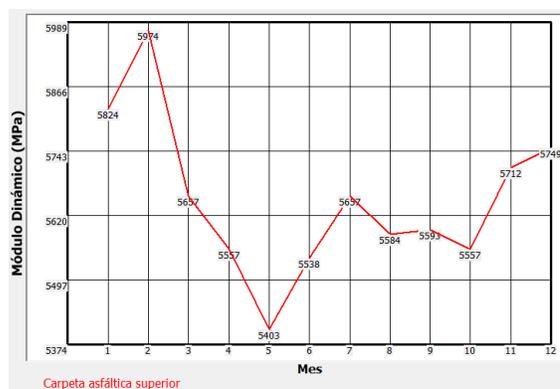


Figura 109. Módulo dinámico de la capa asfáltica. Fuente: CR-ME ®.

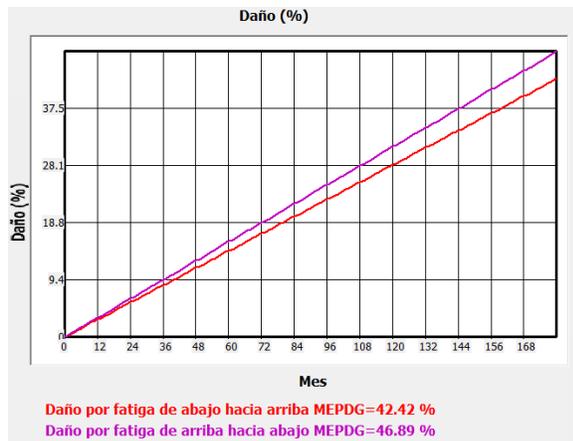


Figura 110. Porcentaje de daño del pavimento flexible.
 Fuente: CR-ME ®.

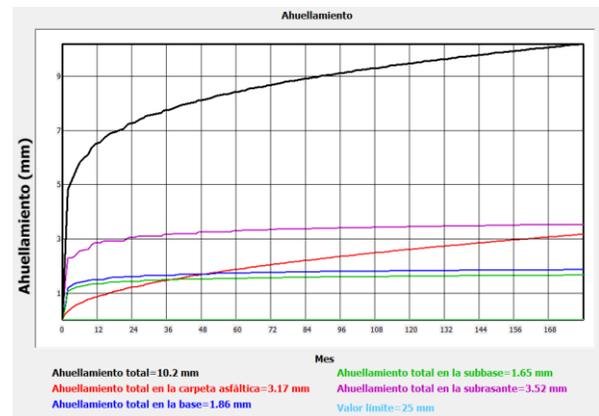


Figura 113. Ahuellamiento del pavimento flexible.
 Fuente: CR-ME ®.



Figura 111. Área agrietada del pavimento flexible.
 Fuente: CR-ME ®.



Figura 112. Agrietamiento longitudinal del pavimento flexible.
 Fuente: CR-ME ®.

CUADRO 78. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93

Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	0,97	7,00	0,17	1,22
Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	0,158	1,00	9,36	20,00	0,58	1,24
Sub-base Granular	0,128	1,00	2,66	20,00	0,13	1,01
			Σ	47,00	0,89	3,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®

Pavimento Semi-rígido

El pavimento semi-rígido se compone de 47,00 cm de estructura. En el Apéndice I-2 se muestra el diseño completo del pavimento semi-rígido y se detalla el cumplimiento del SN total > SN requerido

CUADRO 79. PARAMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ahuellamiento total (mm)	25,00	6,13	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El ahuellamiento total cumple con el límite establecido en la MEPDG.

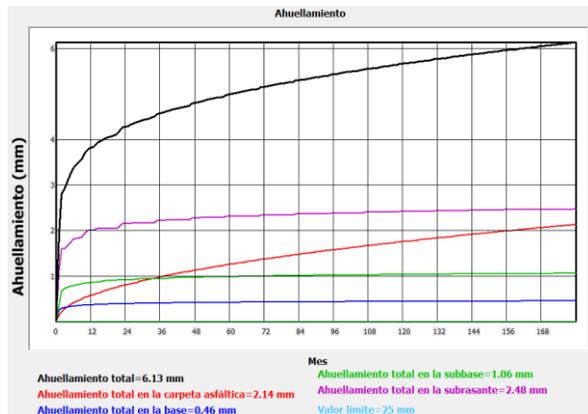


Figura 116. Ahuellamiento del pavimento semi-rígido. Fuente: CR-ME ®.

Los modelos para la fatiga indican que las repeticiones de carga obtenidas tanto en la base estabilizada como en la carpeta asfáltica son mayores al número de repeticiones de diseño, con respecto al esfuerzo y a la deformación a tensión estos son los mismos al del diseño anterior ya que comparten las mismas características (Ver figuras 97 y 98).

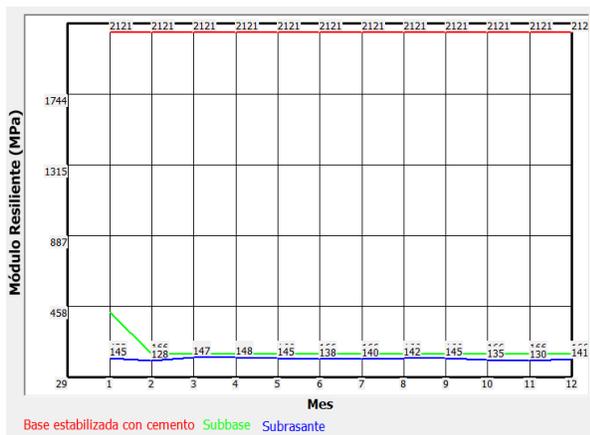


Figura 114. Módulo resiliente del pavimento semi-rígido. Fuente: CR-ME ®.

CUADRO 80. MODELO DE FATIGA PCA	
Esfuerzo a tensión (psi)	46,48
Módulo de ruptura base estabilizada 28 días (psi)	107,01
Fatiga (PCA)	3289611,49
Ejes Equivalentes	361429,74
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

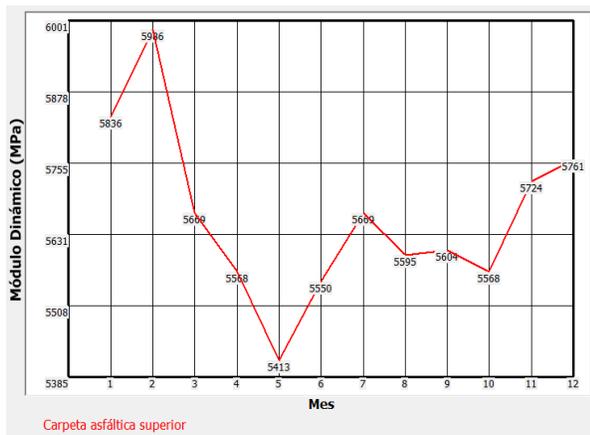


Figura 115. Módulo dinámico de la capa asfáltica. Fuente: CR-ME ®.

CUADRO 81. MODELO FATIGA CAPA ASFÁLTICA	
Deformación unitaria máxima a tensión	0,0000119
Módulo resiliente de la carpeta asfáltica (kPa)	3102642,00
Número de repeticiones	6,53E+50
Ejes Equivalentes	361429,74
Condición	Cumple

Pavimento Rígido

En el cuadro siguiente se detalla el módulo efectivo de reacción corregido de la sub-rasante y los espesores de las capas de este pavimento.

CUADRO 82. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93	
Módulo de reacción compuesto (pci)	807,17
Módulo de reacción compuesto corregido (pci)	807,17
Daño relativo	6,84
Módulo efectivo de reacción (pci)	800,00
Pérdida de soporte	1,00
Módulo efectivo de reacción corregido (pci)	210,00
Espesor de losa supuesto (in)	6,00
Espesor de base supuesto (in)	6,00
Espesor de losa calculado (in)	4,98

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El espesor de losa calculado es 4,98 in (12,65 cm), sin embargo, como este no cumple con el mínimo se decide usar 6,00 in (15,00 cm).

El modelo de escalonamiento es de 0,040 in (0,10 cm) siendo menor al máximo permitido según Huang (2004), el máximo esfuerzo a tensión fue de 181,40 psi y es el mismo del periodo anterior (Ver figura 99).

CUADRO 83. MODELO DE ESCALONAMIENTO	
Ejes Equivalentes (millones)	0,5394
Esfuerzo máximo (psi)	181,40
Separación de juntas transversales (ft)	10,50
Módulo de reacción efectivo (pci)	210,00
Escalonamiento (in)	0,039
Escalonamiento (cm)	0,10
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

La severidad del índice de bombeo es baja por lo que la estructura es aceptada.

CUADRO 84. MODELO DE BOMBEO Y EROSIÓN	
Ejes Equivalentes (millones)	0,5394
Tipo de suelo	0
Precipitación anual (cm)	227,84
Espesor de losa (in)	6,00
Índice de congelación	0,00
Índice de bombeo y erosión	1,51
Severidad	Baja

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El modelo de fatiga para este tipo de pavimento indica que las repeticiones de carga obtenidas superan las repeticiones de carga originales para el diseño.

CUADRO 85. MODELO DE FATIGA	
Esfuerzo máximo (psi)	181,40
Módulo ruptura (psi)	640,00
Fatiga	1,61E+14
Ejes Equivalentes	539447,37
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Con respecto al acero de refuerzo de la losa de concreto para este periodo son iguales al acero de refuerzo del periodo de diseño de 10 años, las dovelas estarán separadas 30,00 cm, con una longitud de 35,00 cm hechas de varilla # 6 grado 60, por su parte las barras de amarre # 4 grado 40 se encontrarán separadas 55,00 cm, con una longitud de 56,00 cm. Al igual que el periodo de diseño anterior la dovela 1 es la que recibe la mayor carga por llanta 1.940,34 lb respectivamente (Ver figura 100).

En los Apéndices I-3, I-4 y I-5 se detalla el cálculo empleado para el diseño del pavimento rígido. Seguidamente, se muestran las secciones típicas de cada uno de los tres pavimentos a diseñar.

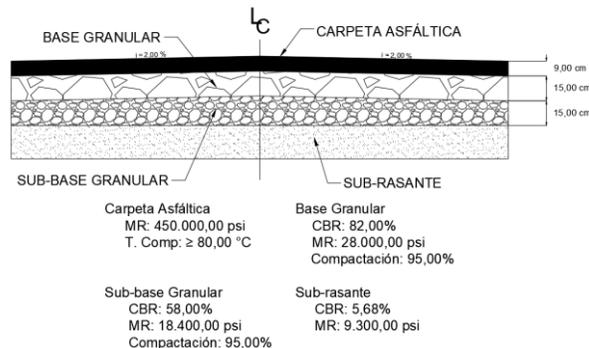


Figura 117. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ®.

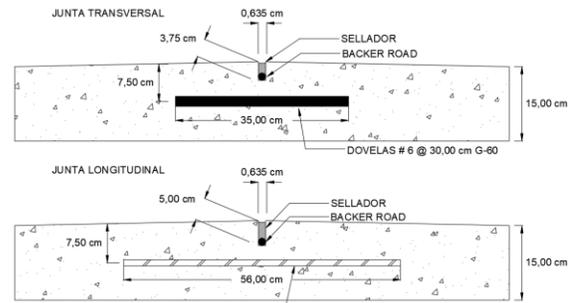
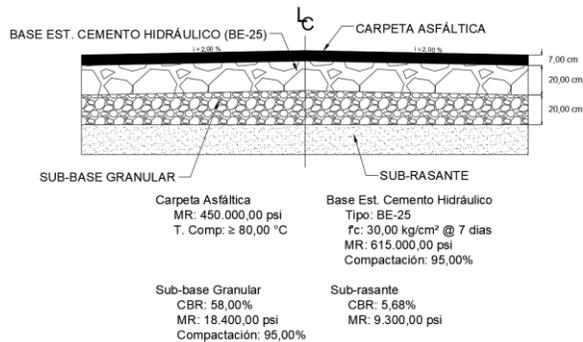


Figura 121. Detalle de juntas transversales y longitudinales.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

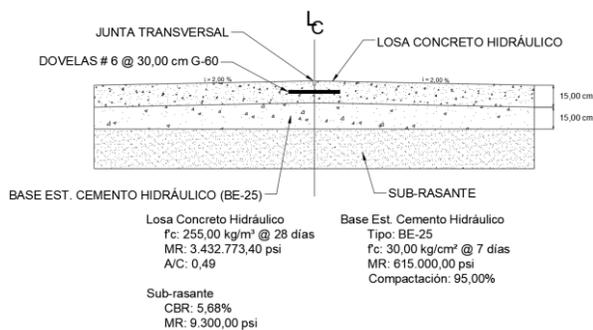


Figura 119. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

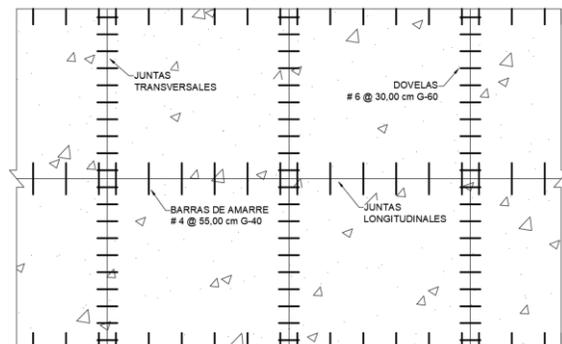


Figura 120. Distribución de juntas, dovelas y barras de amarre.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

Costo de construcción

A continuación, se resume el costo de construcción para cada uno de los tres tipos de pavimentos para este periodo de diseño por actividad a realizar para la debida construcción de cada estructura. En los apéndices J-1, H-2 y H-3 se muestra la estructura de costos usadas para el cálculo del costo de construcción.

Nota: Como las estructuras de pavimento semi-rígido y rígido poseen los mismos espesores que las estructuras del periodo anterior el costo de construcción será el mismo para ambos periodos, por lo que el detalle del costo de estos aparece únicamente en los apéndices del periodo anterior.

CUADRO 86. COSTO PAVIMENTO FLEXIBLE			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	967,72 m ³	₡ 9.214,31	₡ 8.916.876,81
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	483,86 m ³	₡ 14.973,43	₡ 7.245.043,99
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)	483,86 m ³	₡ 14.973,43	₡ 7.245.043,99
Riego de imprimación (CR.413.02)	2903,16 L	₡ 407,36	₡ 1.182.633,55
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	713,89 ton	₡ 66.297,13	₡ 47.328.858,36

Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 2.812.642,14
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 246.306,51
Total			₡ 81.871.405,35

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 87. COSTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	1290,30 m ³	₡ 9.214,31	₡ 11.889.230,51
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	645,15 m ³	₡ 14.973,43	₡ 9.660.108,56
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03))	645,15 m ³	₡ 30.231,10	₡ 19.503.596,14
Riego de imprimación (CR.413.02)	2903,16 L	₡ 407,36	₡ 1.182.633,55
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	555,25 ton	₡ 66.297,13	₡ 36.811.481,61
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 3.077.112,97
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 265.898,13
Total			₡ 89.284.061,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 88. COSTO PAVIMENTO RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	483,86 m ³	₡ 9.214,31	₡ 4.458.438,41
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	483,86 m ³	₡ 30.235,21	₡ 14.629.609,76
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)	3225,74 m ²	₡ 24.931,82	₡ 80.423.569,38
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 3.836.348,41
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00

Trámites CFIA	0,265 %	-	₪ 322.141,21
Total			₪110.564.107,17

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

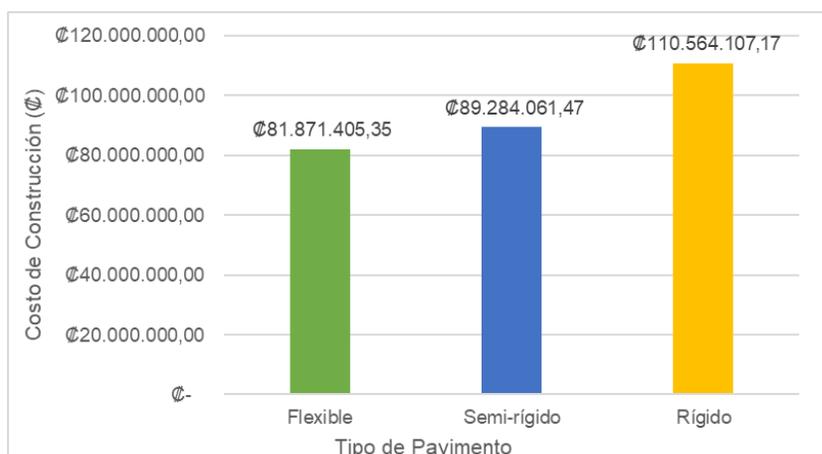


Figura 122. Costo de construcción ruta Parque el Silencio según tipo de pavimento.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

vida útil así como el costo total que conllevaría la intervención de cada deterioro.

Se definen algunos de los deterioros posibles que puede presentar cada estructura a lo largo de su

CUADRO 89. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	159,69 m	₪ 4.373,04	₪ 698.331,01	₪ 570.046,12
6	Deformaciones en la carpeta	Recuperación de base	52,70 m ³	₪ 47.363,38	₪ 2.495.941,12	₪ 1.663.150,96
6	Deformaciones en la carpeta	Carpeta de mezcla asfáltica	94,24 ton	₪113.783,98	₪ 10.723.304,00	₪ 7.145.390,23
10	-	Mantenimiento rutinario	159,69 m	₪ 7.022,15	₪ 1.121.366,99	₪ 570.046,12
12	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	64,25 ton	₪192.851,99	₪ 12.390.759,40	₪ 5.501.645,36
14	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	29,81 m	₪ 7.222,21	₪ 215.285,28	₪ 83.491,34
TOTAL					₪ 27.644.987,80	₪15.533.770,12

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 90. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	143,72 m	₪ 4.373,04	₪ 628.497,91	₪ 513.041,51
4	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	4,26 m	₪ 3.671,40	₪ 15.634,30	₪ 11.927,33

8	Agrietamiento	Carpeta de mezcla asfáltica	78,54 ton	₺130.271,28	₺ 10.230.925,62	₺ 5.954.491,86
9	-	Mantenimiento rutinario	143,72 m	₺ 6.562,76	₺ 943.205,88	₺ 513.041,51
12	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	44,42 ton	₺192.851,99	₺ 8.566.485,23	₺ 3.803.621,89
14	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	14,90 m	₺ 7.222,21	₺ 107.642,64	₺ 41.745,67
TOTAL					₺ 20.492.391,58	₺10.837.869,77

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 91. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
4	-	Mantenimiento rutinario	79,85 m	₺ 4.503,83	₺ 359.608,53	₺ 274.343,63
8	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	12,78 m	₺ 8.614,81	₺ 110.055,97	₺ 64.053,58
10	Grietas en la losa, escalonamiento	Sustitución de losa	79,85 m ²	₺ 124.799,82	₺ 9.964.641,60	₺ 5.065.518,51
12	-	Mantenimiento rutinario	79,85 m	₺ 7.738,42	₺ 617.874,41	₺ 274.343,63
14	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	22,36 m	₺ 12.928,51	₺ 289.037,58	₺ 112.093,76
TOTAL					₺ 11.341.218,09	₺ 5.790.353,09

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 92. VPN Y CAUE POR ESTRUCTURA		
Pavimento	VPN	CAUE
Flexible	₺ 97.405.175,48	₺ 10.694.564,69
Semi-rígido	₺ 100.121.931,24	₺ 10.992.849,86
Rígido	₺ 116.354.460,26	₺ 12.775.094,30

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

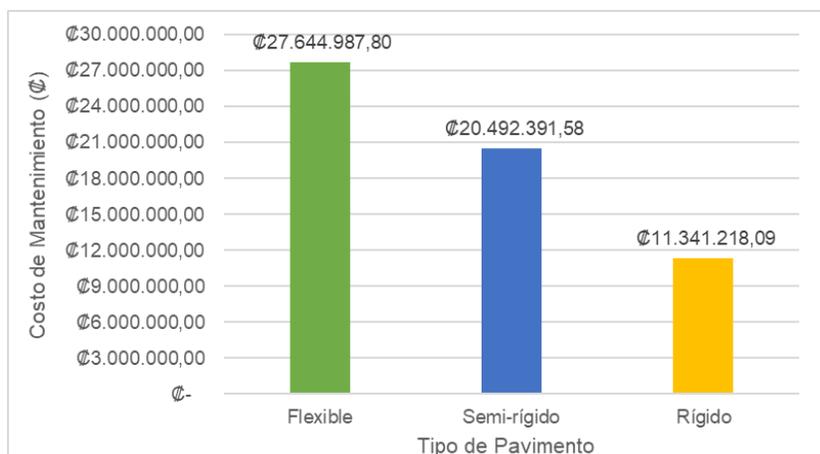


Figura 123. Costo de mantenimiento ruta Parque el Silencio según tipo de pavimento.

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®

Ruta INA

Periodo de Diseño de 10 años

Diseño de Pavimentos

En el siguiente cuadro se especifican los ejes equivalentes determinados para el diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos de la tercera ruta denominada INA para el periodo de diseño de 10 años, por su parte para el pavimento rígido los ejes equivalentes son de 375.944,24, cabe

resaltar que en el Apéndice A-3 se encuentran los datos del TPD que permitieron el cálculo de los ejes equivalentes.

Al igual que la ruta anterior los ejes equivalentes son menores a 500.000,00 por lo que se estableció de ser necesario un mínimo de 7,00 cm para la capa asfáltica, para la base granular el mínimo espesor a usar es de 15,00 cm, y para la sub-base granular mínimo un espesor de 15,00 cm (Ver figura A-10) según el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos y tomando en cuenta la relación del espesor y el tamaño máximo del grano del material.

CUADRO 93. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO										
Vehículo	TPD	F.C	EEQ /día	EEQ /anual	Crec. (%)	F. Crec (%)	EEQ Diseño	F. Dir (%)	F. Car (%)	EEQ Carril
Liviano	356,40	0,001	0,36	130,09	4,00	12,01	1561,83	50,00	100,00	780,91
CL	69,60	0,02	1,39	508,08	4,00	12,01	6100,06	50,00	100,00	3050,03
C2	33,60	0,63	21,17	7726,32	4,00	12,01	92763,03	50,00	100,00	46381,51
C3	28,80	1,28	36,86	13455,36	4,00	12,01	161546,49	50,00	100,00	80773,25
T3-S2	2,40	2,38	5,71	2084,88	4,00	12,01	25031,29	50,00	100,00	12515,65
Buses	21,60	2,29	49,46	18054,36	4,00	12,01	216762,58	50,00	100,00	108381,29
Σ										251882,64

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©.

Pavimento Flexible

La metodología AASHTO-93 da como resultado que la base y la sub-base granular usarán un

espesor de 15,00 cm cada una, mientras que la capa asfáltica se usará un espesor de 9.00 cm

En el Apéndice K-1 se muestra el diseño completo de este pavimento, se detalla el cumplimiento del SN total > SN requerido.

CUADRO 94. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	8,20	9,00	1,42	1,56
Base Granular	0,133	1,00	2,47	15,00	0,13	0,79
Sub-base Granular	0,128	1,00	-8,11	15,00	-0,41	0,76
Σ				39,00	1,14	3,10

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©.

Los espesores determinados con la AASHTO-93 cumplen con los valores límites de la MEPDG.

CUADRO 95. PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE			
Parámetros	Límite	Valor	Condición
Ag. Longitudinal (pies/milla)	2000,00	1775,75	Cumple

Área agrietada (%)	75,00	24,59	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	25,00	14,58	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ©.

Comportamiento de la estructura de pavimento flexible a lo largo de su periodo de diseño.

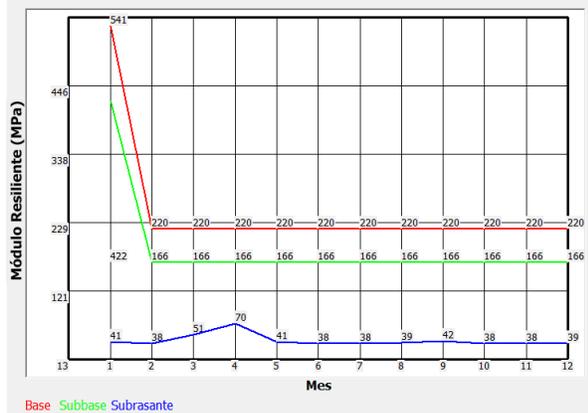


Figura 124. Módulo resiliente del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

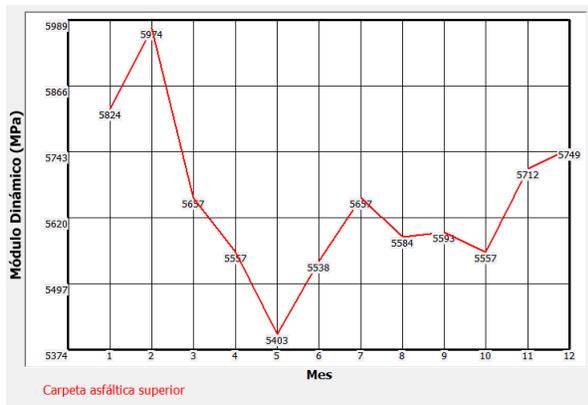


Figura 125. Módulo dinámico de la capa asfáltica.
Fuente: CR-ME ®.



Figura 126. Porcentaje de daño del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.



Figura 127. Área agrietada del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

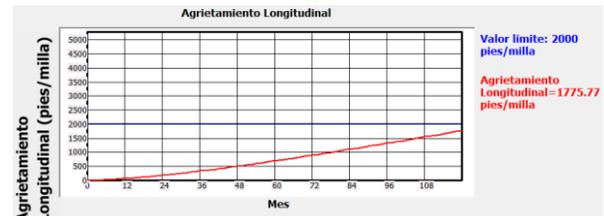


Figura 128. Agrietamiento longitudinal del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

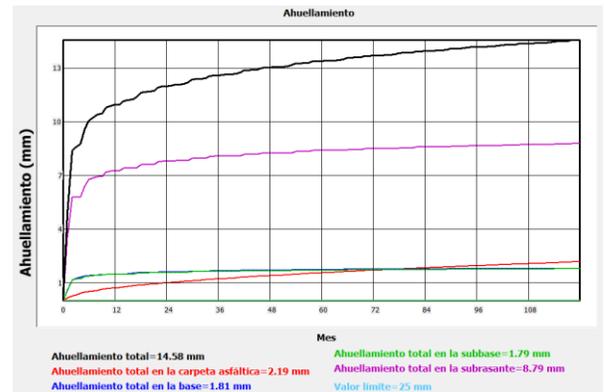


Figura 129. Ahuellamiento del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

Pavimento Semi-rígido

Los espesores determinados con la metodología AASHTO-93 en este pavimento corresponden a 20,00 cm para la base y sub-base y el espesor mínimo para la capa de rueda.

CUADRO 96. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	0,73	7,00	0,12	1,22

Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	0,158	1,00	7,63	20,00	0,47	1,24
Sub-base Granular	0,128	1,00	10,39	20,00	0,52	1,01
			Σ	47,00	1,12	3,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El ahuellamiento total cumple con el límite establecido en la MEPDG.

CUADRO 97. PARÁMETRO DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ahuellamiento total (mm)	25,00	8,55	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

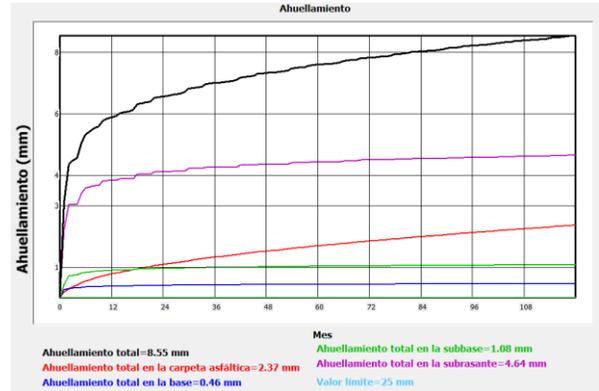


Figura 132. Ahuellamiento del pavimento semi-rígido.

Fuente: CR-ME ®.

Se obtiene un esfuerzo a tensión de la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) de 45,11 psi (puntos 5 y 6) y se revisa que el modelo de fatiga de la PCA cumple.

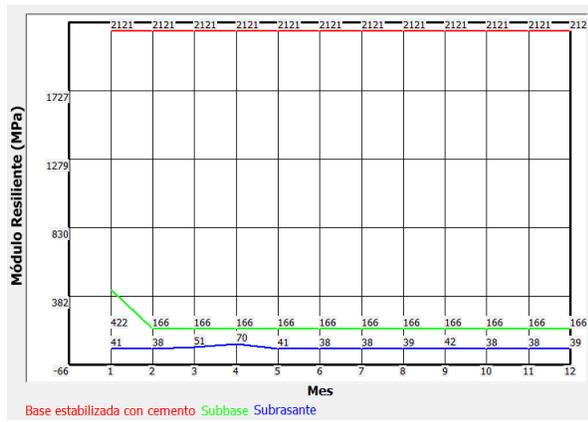


Figura 130. Módulo resiliente del pavimento semi-rígido.

Fuente: CR-ME ®.

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.1768e+02	1.1586e+02	1.2004e+02	-3.3499e-16	-1.5049e-31	-8.1923e-16
2	7.3099e+00	-3.0599e+00	2.1237e-01	-1.2699e-15	2.7446e-31	0.0000e+00
3	4.2519e+01	4.1558e+01	9.0837e+01	-1.7656e-16	3.5202e-18	1.9163e-02
4	3.8680e+00	-1.3239e+00	9.8130e-02	-6.3583e-16	-6.5829e-17	0.0000e+00
5	-4.5108e+01	-4.2855e+01	2.6911e+00	4.1383e-16	-6.3773e-18	-3.4716e-02
6	-7.9360e+00	6.0451e+00	6.6431e-01	1.7122e-15	-2.5531e-17	0.0000e+00
7	2.2902e-01	3.0696e-01	1.4182e+00	1.4319e-17	-9.3003e-18	-5.0629e-02
8	2.3129e-01	5.6354e-01	7.0307e-01	4.0689e-17	-2.4525e-17	0.0000e+00

Figura 133. Esfuerzo a tensión en la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25).

Fuente: PITRA PAVE ®.

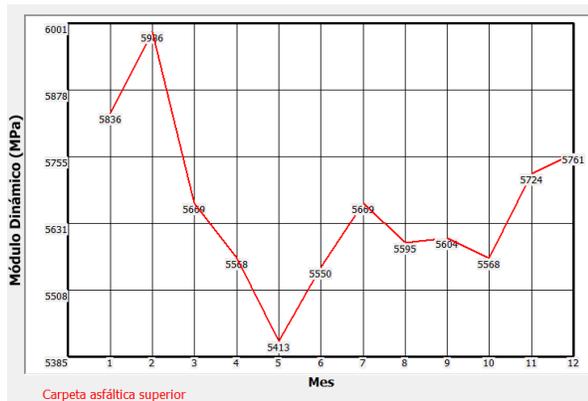


Figura 131. Módulo dinámico de la capa asfáltica.

Fuente: CR-ME ®.

CUADRO 98. MODELO DE FATIGA PCA	
Esfuerzo a tensión (psi)	45,11
Módulo de ruptura base estabilizada 28 días (psi)	107,01
Fatiga (PCA)	4702416,47
Ejes Equivalentes	251882,64
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

La fatiga en la capa asfáltica supera las repeticiones usadas para el diseño, la deformación unitaria máxima a la tensión se calculó por medio del programa PITRA PAVE ® (puntos 1,2,3 y 4).

Esfuerzos		Deformaciones		Deflexiones		
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Eyx (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	7.8034e-05	7.2563e-05	8.5121e-05	-2.0100e-21	-9.0294e-37	-4.9154e-21
2	1.8459e-05	-1.2650e-05	-2.8336e-06	-7.6196e-21	1.6468e-36	0.0000e+00
3	-8.4871e-06	-1.1371e-05	1.3647e-04	-1.0594e-21	2.1121e-23	1.1498e-07
4	9.5489e-06	-6.0268e-06	-1.7606e-06	-3.8150e-21	-3.9497e-22	0.0000e+00
5	-5.7020e-05	-5.2441e-05	4.0133e-05	1.6823e-21	-2.5924e-23	-1.4112e-07
6	-1.5631e-05	1.2785e-05	1.8489e-06	6.9601e-21	-1.0379e-22	0.0000e+00
7	-4.2100e-05	-3.3406e-05	9.0538e-05	3.1942e-21	-2.0747e-21	-1.1294e-05
8	-2.6053e-05	1.1006e-05	2.6570e-05	9.0767e-21	-5.4709e-21	0.0000e+00

Figura 134. Deformación unitaria a la tensión en la capa asfáltica.

Fuente: PITRA PAVE ®.

CUADRO 99. MODELO FATIGA CAPA ASFÁLTICA	
Deformación unitaria máxima a tensión	0,0000127
Módulo resiliente de la carpeta asfáltica (kPa)	3102642,00
Número de repeticiones	4,33E+50
Ejes Equivalentes	251882,64
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Rígido

En el cuadro siguiente se detalla el módulo efectivo de reacción corregido de la sub-rasante y los espesores de las capas de este pavimento.

CUADRO 100. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93	
Módulo de reacción compuesto (pci)	1064,43
Módulo de reacción compuesto corregido (pci)	1064,43
Daño relativo	5,05
Módulo efectivo de reacción (pci)	1007,00
Pérdida de soporte	1,00
Módulo efectivo de reacción corregido (pci)	260,00
Espesor de losa supuesto (in)	6,00
Espesor de base supuesto (in)	6,00
Espesor de losa calculado (in)	4,37

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El espesor de losa calculado de 4,37 in (11,10 cm) no cumple con el mínimo establecido se decide usar 6,00 in (15,00 cm) como espesor de losa. El modelo de escalonamiento cumple, ya que el valor es menor al máximo permitido, el máximo esfuerzo a tensión fue de 172,20 psi.

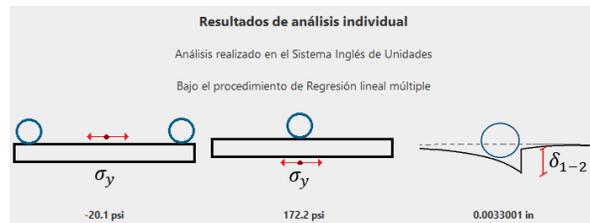


Figura 135. Esfuerzo a tensión del pavimento rígido. Fuente: ApRIGID ®.

CUADRO 101. MODELO DE ESCALONAMIENTO	
Ejes Equivalentes (millones)	0,3759
Esfuerzo máximo (psi)	172,20
Separación de juntas transversales (ft)	10,50
Módulo de reacción efectivo (pci)	260,00
Escalonamiento (in)	0,037
Escalonamiento (cm)	0,094
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El índice de bombeo indica que la estructura tendrá una severidad baja porque se encuentra entre 1,00 - 2,00 aproximadamente.

CUADRO 102. MODELO DE BOMBEO Y EROSIÓN	
Ejes Equivalentes (millones)	0,3759
Tipo de suelo	0
Precipitación anual (cm)	227,84
Espesor de losa (in)	6,00
Índice de congelación	0,00
Índice de bombeo y erosión	1,29
Severidad	Baja

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El modelo de fatiga indica que las repeticiones de carga hasta la falla son muchos mayores que las repeticiones de carga usadas para el diseño de la estructura.

CUADRO 103. MODELO DE FATIGA	
Esfuerzo máximo (psi)	172,20
Módulo ruptura (psi)	640,00
Fatiga	5,78E+14
Ejes Equivalentes	375944,24
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En el siguiente cuadro se muestran los datos obtenidos para el acero de refuerzo de la losa de concreto, además de esto la primera dovela de la losa es la que mayor carga resiste con un total de 2.020,66 lb.

CUADRO 104. DOVELAS Y BARRAS DE AMARRE		
	Dovelas	Barras de amarre
Calibre Varilla	6	4
Longitud (cm)	35,00	56,00
Separación (cm)	30,00	50,00
Grado	60	40

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel @.

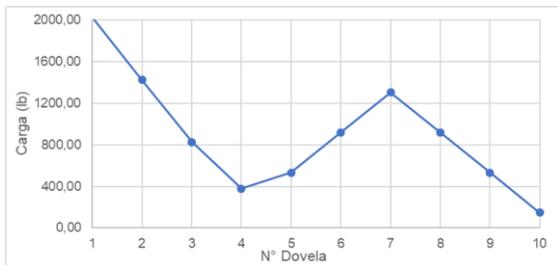


Figura 136. Fracción de carga recibida por cada dovela.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel @.

En los Apéndices K-3, K-4 y K-5 se muestra con más detalle el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento rígido. Las figuras siguientes detallan las dimensiones de las estructuras de pavimentos determinadas.

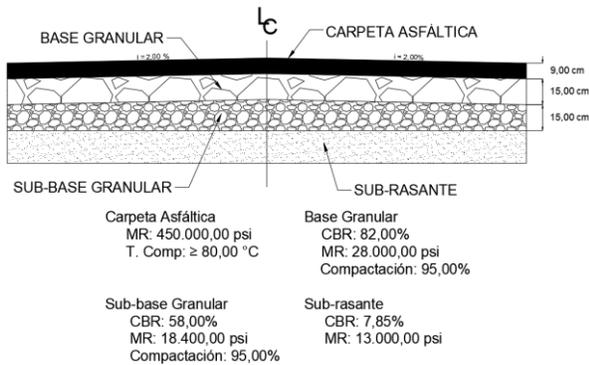


Figura 137. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 @.

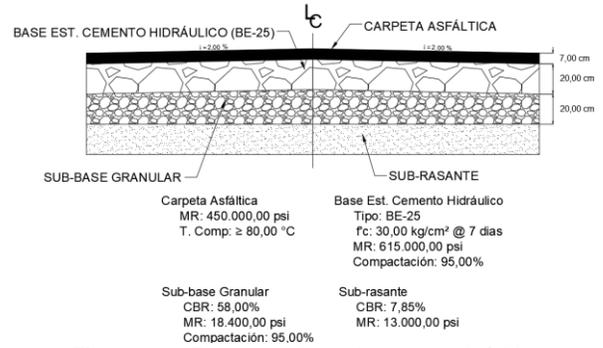


Figura 138. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 @.

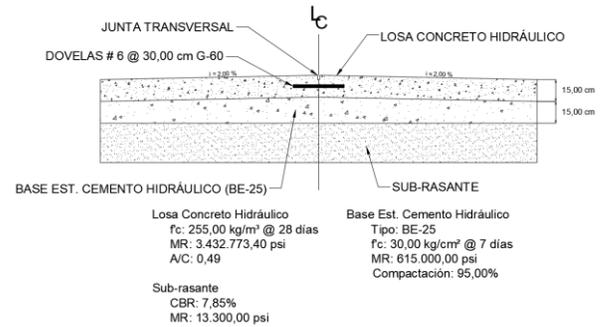


Figura 139. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 @.

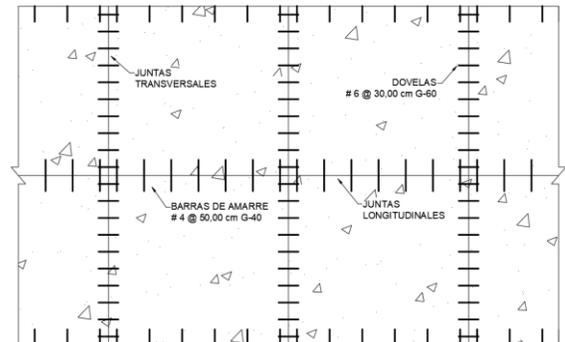


Figura 140. Distribución de juntas, dovelas y barras de amarre.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 @.

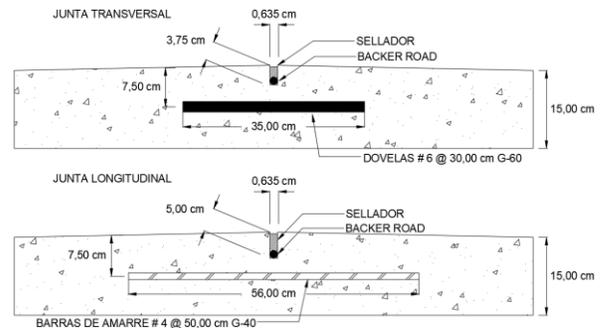


Figura 141. Detalle de juntas transversales y longitudinales.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 @.

Costo de construcción

En seguida, se define un resumen del costo de inversión para cada una de las tres estructuras de pavimentos para este periodo de diseño, en los apéndices L-1, L-2 y L-3 se muestra con mayor

detalle la cantidad de materiales a usar, las horas de trabajo de la mano de obra y del equipo a usar para la construcción respectiva de cada pavimento.

CUADRO 105. COSTO PAVIMENTO FLEXIBLE			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	5793,97 m ³	₡ 9.214,31	₡ 53.387.464,09
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	2896,98 m ³	₡ 14.973,43	₡ 43.377.728,14
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)	2896,98 m ³	₡ 14.973,43	₡ 43.377.728,14
Riego de imprimación (CR.413.02)	17381,90 L	₡ 407,36	₡ 7.080.704,49
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	4274,21 ton	₡ 66.297,13	₡ 283.367.857,36
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 16.119.411,39
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 1.232.052,97
Total			₡ 454.836.946,57

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 106. COSTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	7725,29 m ³	₡ 9.214,31	₡ 71.183.254,74
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	3862,64 m ³	₡ 14.973,43	₡ 57.836.970,85
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	3862,64 m ³	₡ 30.225,44	₡ 116.749.997,34
Riego de imprimación (CR.413.02)	17381,90 L	₡ 407,36	₡ 7.080.704,49
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	3324,68 ton	₡ 66.297,13	₡ 220.416.743,22
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 17.702.697,98
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 1.349.340,58
Total			₡ 499.213.709,19

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 107. COSTO PAVIMENTO RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	2896,98 m ³	₡ 9.214,31	₡ 26.693.685,97
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	2896,98 m ³	₡ 30.227,46	₡ 87.568.348,00
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)	19313,22 m ²	₡ 24.923,39	₡ 481.350.874,36
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 22.241.706,30
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 1.685.583,83
Total			₡ 626.434.198,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

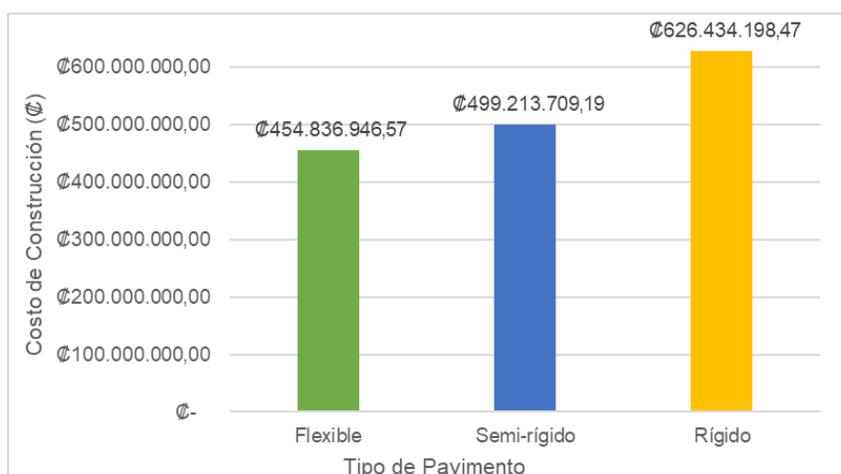


Figura 142. Costo de construcción ruta INA según tipo de pavimento.

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

conlleva la intervención de cada deterioro y el costo total del mantenimiento de la obra.

Estos son los deterioros posibles que puede presentar cada estructura así como el costo que

CUADRO 108. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	956,10 m	₡ 4.373,04	₡ 4.181.065,03	₡ 3.412.994,51
5	Deformaciones en la carpeta	Recuperación de base	315,51 m ³	₡ 44.264,84	₡ 13.966.132,41	₡ 9.957.659,39
5	Deformaciones en la carpeta	Carpeta de mezcla asfáltica	658,29 ton	₡106.340,17	₡ 70.003.092,70	₡49.911.237,62

8	-	Mantenimiento rutinario	956,10 m	₡ 6.133,42	₡ 5.864.160,00	₡ 3.412.994,51
9	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	114,73 m	₡ 5.149,33	₡ 590.793,24	₡ 321.352,38
TOTAL					₡ 94.605.243,38	₡67.016.238,40

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 109. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	860,49 m	₡ 4.373,04	₡ 3.762.958,53	₡ 3.071.695,06
5	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	39,84 m	₡ 3.928,40	₡ 156.497,69	₡ 111.580,69
6	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	415,59 ton	₡128.505,42	₡ 53.404.925,55	₡35.585.956,85
9	-	Mantenimiento rutinario	860,49 m	₡ 6.562,76	₡ 5.647.186,08	₡ 3.071.695,06
TOTAL					₡ 62.971.567,84	₡41.840.927,65

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 110. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	28,68 m	₡ 6.142,24	₡ 176.177,96	₡ 143.813,69
4	-	Mantenimiento rutinario	478,05 m	₡ 4.503,83	₡ 2.153.057,28	₡ 1.642.557,09
6	Grietas en la losa, escalonamiento	Sustitución de losa	382,44 m ²	₡ 95.209,18	₡36.411.800,68	₡24.262.720,24
9	-	Mantenimiento rutinario	478,05 m	₡ 6.316,86	₡ 3.019.774,22	₡ 1.642.557,09
9	Fisuras menores a 2 mm	Sellado de juntas y grietas	86,05 m	₡ 9.217,85	₡ 793.186,83	₡ 431.441,08
TOTAL					₡42.553.996,97	₡28.123.089,20

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 111. VPN Y CAUE POR ESTRUCTURA		
Pavimento	VPN	CAUE
Flexible	₡ 521.853.184,98	₡ 74.300.153,27
Semi-rígido	₡ 541.054.636,84	₡ 77.034.008,03
Rígido	₡ 654.557.287,66	₡ 93.194.232,01

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

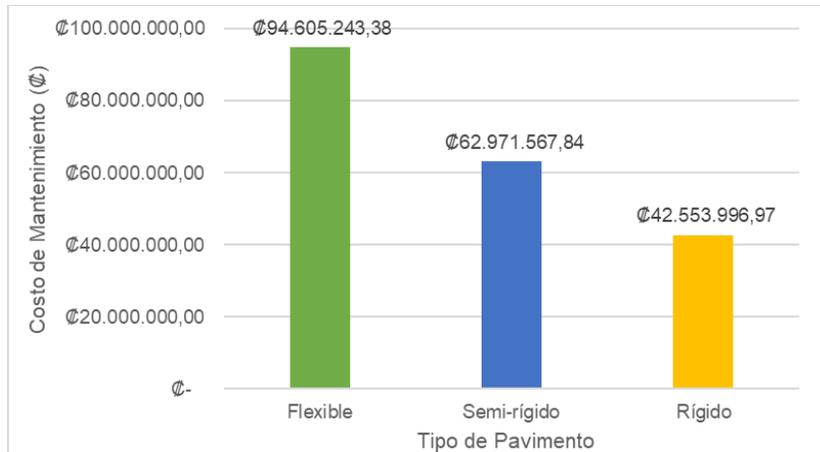


Figura 143. Costo de mantenimiento ruta INA según tipo de pavimento.
Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Periodo de Diseño de 15 años

Diseño de Pavimentos

En el siguiente cuadro se especifican los ejes equivalentes determinados para el diseño de los

pavimentos flexibles y semi-rígidos usando un factor de expansión de 20,00 % para cada tipo de vehículo, para el pavimento rígido los ejes equivalentes son de 626.993,61 usando el criterio de correlación de la AASHTO-93.

Vehículo	TPD	F.C	EEQ /día	EEQ /anual	Crec. (%)	F. Crec (%)	EEQ Diseño	F. Dir (%)	F. Car (%)	EEQ Carril
Liviano	356,40	0,001	0,36	130,09	4,00	20,02	2604,79	50,00	100,00	1302,39
CL	69,60	0,02	1,39	508,08	4,00	20,02	10173,58	50,00	100,00	5086,79
C2	33,60	0,63	21,17	7726,32	4,00	20,02	154708,65	50,00	100,00	77354,32
C3	28,80	1,28	36,86	13455,36	4,00	20,02	269424,58	50,00	100,00	134712,29
T3-S2	2,40	2,38	5,71	2084,88	4,00	20,02	41746,78	50,00	100,00	20873,39
Buses	21,60	2,29	49,46	18054,36	4,00	20,02	361513,06	50,00	100,00	180756,53
Σ										420085,72

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Flexible

Para el pavimento flexible de esta ruta dio como resultado que la base y la sub-base granular usarán un espesor de 15,00 cm, mientras que la

capa asfáltica se usará un espesor de 10,00 cm con base en la metodología AASHTO-93.

En el Apéndice M-1 se muestra el diseño completo de este pavimento, se detalla el cumplimiento del SN total > SN requerido.

Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	8,99	10,00	1,56	1,74
Base Granular	0,133	1,00	2,10	15,00	0,11	0,79
Sub-base Granular	0,128	1,00	-8,19	15,00	-0,41	0,76
Σ				40,00	1,26	3,28

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Dichos espesores empleados cumplen con los valores límites de la MEPDG para los parámetros de aceptación del CR-ME ®.

CUADRO 114. PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE			
Parámetros	Límite	Valor	Condición
Ag. Longitudinal (pies/milla)	2000,00	1814,97	Cumple
Área agrietada (%)	75,00	34,54	Cumple
Ahuellamiento total (mm)	25,00	14,98	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento que tendría la estructura de pavimento flexible a lo largo de su periodo de diseño.

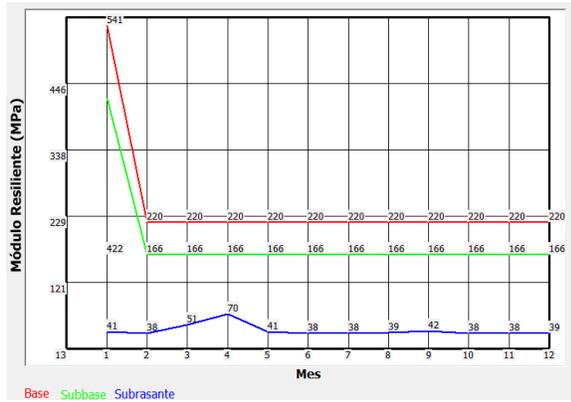


Figura 144. Módulo resiliente del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

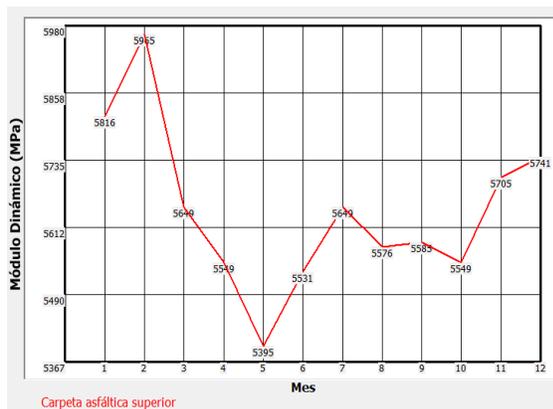


Figura 145. Módulo dinámico de la capa asfáltica.
Fuente: CR-ME ®.

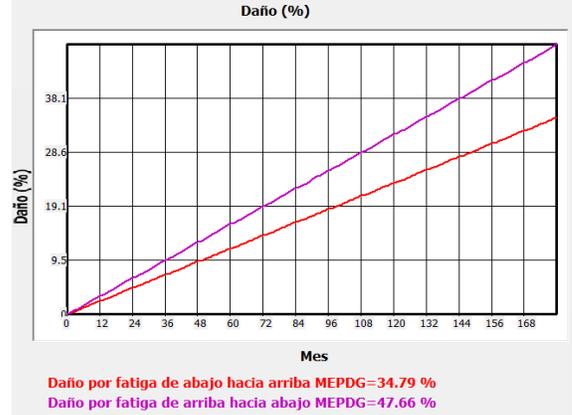


Figura 146. Porcentaje de daño del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

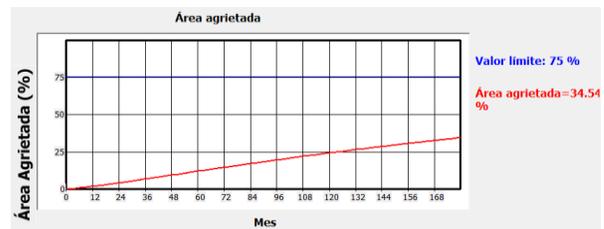


Figura 147. Área agrietada del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.



Figura 148. Agrietamiento longitudinal del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

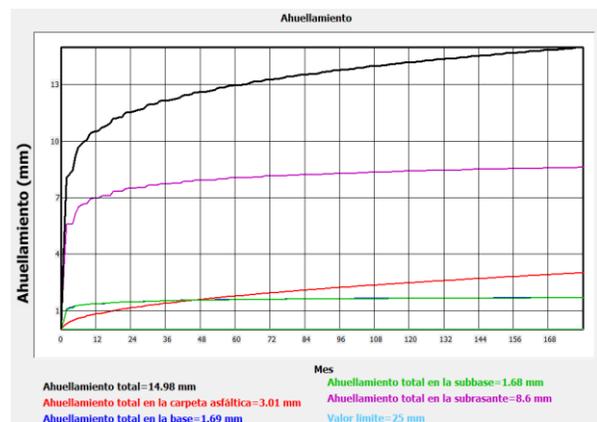


Figura 149. Ahuellamiento del pavimento flexible.
Fuente: CR-ME ®.

Pavimento Semi-rígido

Para el caso del pavimento semi-rígido se decidió usar los espesores mínimos para cada una de las capas presentes al igual que en la estructura de del periodo de diseño anterior.

CUADRO 115. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93						
Material	a	m	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,441	-	1,08	7,00	0,19	1,22
Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25)	0,158	1,00	10,10	20,00	0,63	1,24
Sub-base granular	0,128	1,00	7,05	20,00	0,36	1,01
			Σ	47,00	1,17	3,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El ahueamiento total cumple con el límite establecido en la MEPDG para dicho modelo de desempeño.

CUADRO 116. PARÁMETRO DE ACEPTACIÓN PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO "INA"			
Parámetro	Límite	Valor	Condición
Ahueamiento total (mm)	25,00	9,39	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

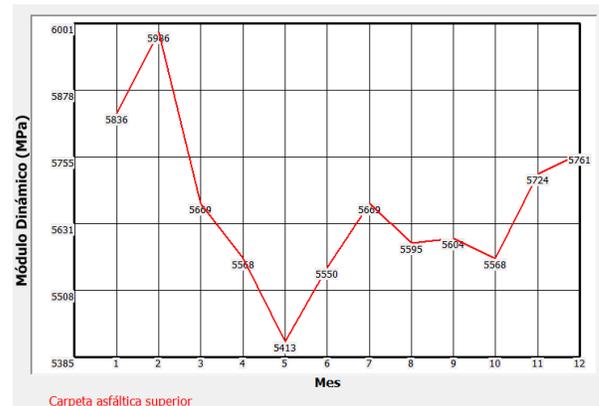


Figura 151. Módulo dinámico de la capa asfáltica.

Fuente: CR-ME ®.

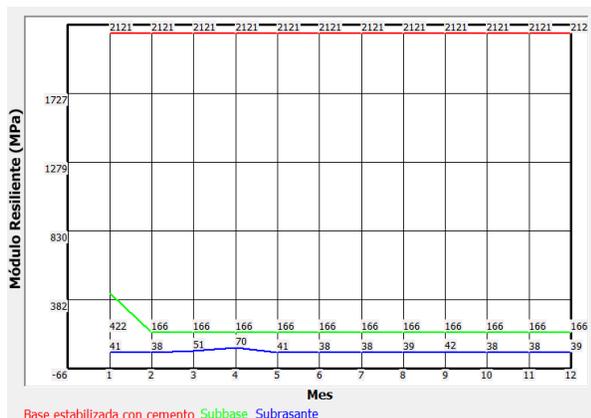


Figura 150. Módulo resiliente del pavimento semi-rígido.

Fuente: CR-ME ®.



Figura 152. Ahueamiento del pavimento semi-rígido.

Fuente: CR-ME ®.

El modelo para la fatiga de la PCA para la base BE-25 y la fatiga de la capa asfáltica dan

como resultado que las repeticiones de carga obtenidas son mayores a las repeticiones de diseño, el esfuerzo y la deformación a tensión son las mismas a las del diseño anterior ya que comparten las mismas dimensiones de los espesores (Ver figuras 133 y 134).

CUADRO 117. MODELO DE FATIGA PCA	
Esfuerzo a tensión (psi)	45,11
Módulo de ruptura base estabilizada 28 días (psi)	107,01
Fatiga (PCA)	4702416,47
Ejes Equivalentes	420085,72
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 118. MODELO FATIGA CAPA ASFÁLTICA	
Deformación unitaria máxima a tensión	0,0000127
Módulo resiliente de la carpeta asfáltica (kPa)	3102642,00
Número de repeticiones	4,33E+50
Ejes Equivalentes	420085,72
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Pavimento Rígido

En el cuadro siguiente se detalla el módulo efectivo de reacción corregido de la sub-rasante y los espesores de las capas de este pavimento.

CUADRO 119. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93	
Módulo de reacción compuesto (pci)	1064,43
Módulo de reacción compuesto corregido (pci)	1064,43
Daño relativo	5,05
Módulo efectivo de reacción (pci)	1007,00
Pérdida de soporte	1,00
Módulo efectivo de reacción corregido (pci)	260,00
Espesor de losa supuesto (in)	6,00
Espesor de base supuesto (in)	6,00
Espesor de losa calculado (in)	4,93

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El espesor de losa calculado corresponde a 4,93 in (12,52 cm), pero este no cumple con el mínimo establecido se decide usar 6,00 in (15,00 cm) el cual corresponde al espesor supuesto al inicio del procedimiento.

El modelo de escalonamiento cumple, ya que el valor es menor al máximo permitido, el máximo esfuerzo a tensión fue de 172,20 psi (Ver figura 135).

CUADRO 120. MODELO DE ESCALONAMIENTO	
Ejes Equivalentes (millones)	0,6270
Esfuerzo máximo (psi)	172,20
Separación de juntas transversales (ft)	10,50
Módulo de reacción efectivo (pci)	260,00
Escalonamiento (in)	0,048
Escalonamiento (cm)	0,12
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

La severidad del índice de bombeo es baja porque se encuentra entre 1,00 - 2,00 aproximadamente por lo tanto la estructura es aceptable.

CUADRO 121. MODELO DE BOMBEO Y EROSIÓN	
Ejes Equivalentes (millones)	0,6270
Tipo de suelo	0
Precipitación anual (cm)	227,84
Espesor de losa (in)	6,00
Índice de congelación	0,00
Índice de bombeo y erosión	1,62
Severidad	Baja

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

El modelo de fatiga indica que las repeticiones de carga hasta la falla son muchos mayores que las repeticiones de carga usadas para el diseño de la estructura.

CUADRO 122. MODELO DE FATIGA	
Esfuerzo máximo (psi)	172,20
Módulo ruptura (psi)	640,00
Fatiga	5,78E+14
Ejes Equivalentes	626993,61
Condición	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Para el acero de refuerzo de la losa de concreto se usan las mismas características de las dovelas y barras de amarre del periodo anterior (las dovelas a cada 30,00 cm con una longitud de 35,00 cm de varilla # 6 grado 60 y barras de amarre a 50,00 cm con una longitud de 56,00 cm de varilla # 4 grado 40). La primera dovela de la losa de concreto es la que mayor carga resiste con un total de 2.020,66 lb (Ver figura 136).

En los Apéndices M-3, M-4 y M-5 se detalla el cálculo empleado para el diseño del pavimento rígido. Inmediatamente, se muestran las secciones típicas de cada uno de los tres pavimentos a diseñar.

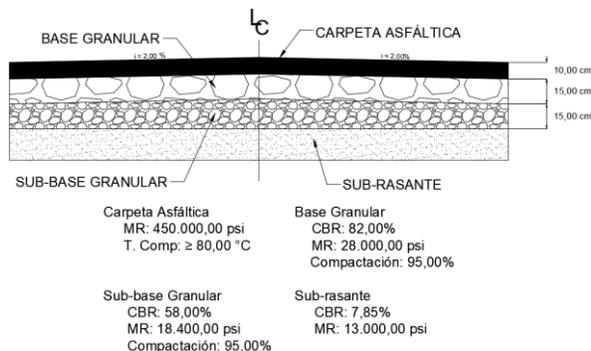


Figura 153. Estructura de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

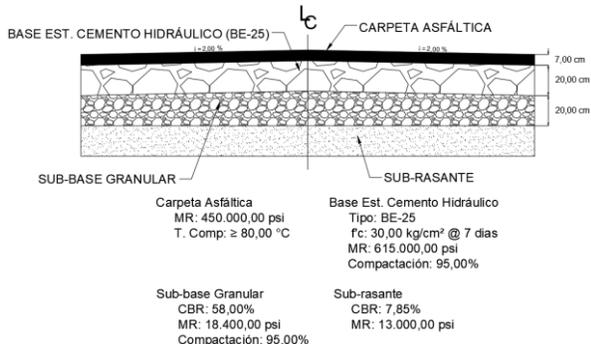


Figura 154. Estructura de pavimento semi-rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

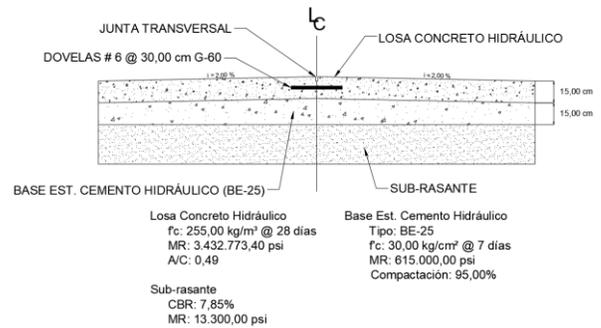


Figura 155. Estructura de pavimento rígido.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

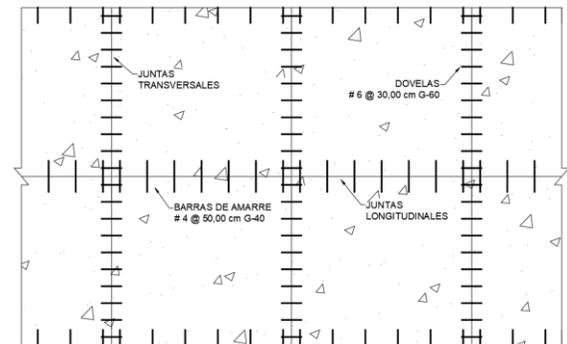


Figura 156. Distribución de juntas, dovelas y barras de amarre.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

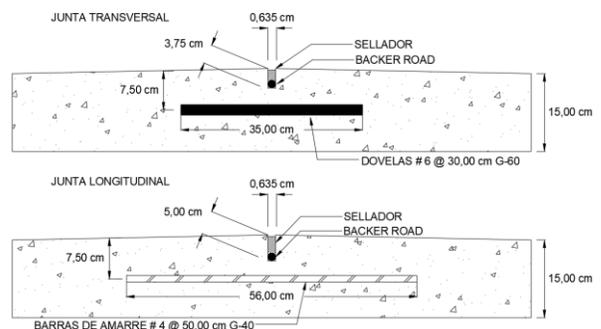


Figura 157. Detalle de juntas transversales y longitudinales.
Fuente: Elaboración propia, AutoCAD 2018 ©.

Costo de construcción

A continuación, se resume el costo de inversión inicial para cada uno de los tres tipos de pavimentos para este periodo de diseño. En los apéndices N-1, L-2 y L-3 se muestra la estructura de costos usadas para el cálculo del costo final de construcción.

Nota: Como las estructuras de pavimento semi-rígido y rígido poseen los mismos espesores que las estructuras del periodo anterior el costo de construcción será el mismo para ambos periodos, por lo que el detalle del costo de estos aparece únicamente en los apéndices del periodo anterior.

CUADRO 123. COSTO PAVIMENTO FLEXIBLE			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	5793,97 m ³	₡ 9.214,31	₡ 53.387.464,09
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	2896,98 m ³	₡ 14.973,43	₡ 43.377.728,14
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)	2896,98 m ³	₡ 14.973,43	₡ 43.377.728,14
Riego de imprimación (CR.413.02)	17381,90 L	₡ 407,36	₡ 7.080.704,49
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	4749,12 ton	₡ 66.297,13	₡ 314.853.027,52
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 17.287.511,20
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 1.318.584,13
Total			₡ 487.576.747,71

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 124. COSTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	7725,29 m ³	₡ 9.214,31	₡ 71.183.254,74
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	3862,64 m ³	₡ 14.973,43	₡ 57.836.970,85
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	3862,64 m ³	₡ 30.225,44	₡ 116.749.997,34
Riego de imprimación (CR.413.02)	17381,90 L	₡ 407,36	₡ 7.080.704,49
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)	3324,68 ton	₡ 66.297,13	₡ 220.416.743,22
Obras preliminares	1,00 und	₡ 2.000.000,00	₡ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₡ 186.500,00	₡ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₡ 55.000,00	₡ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₡ 500.000,00	₡ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₡ 17.702.697,98
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₡ 3.000.000,00	₡ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₡ 1.349.340,58
Total			₡499.213.709,19

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 125. COSTO PAVIMENTO RÍGIDO			
Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Actividad
Excavación de la vía (CR.203.03)	2896,98 m ³	₡ 9.214,31	₡ 26.693.685,97
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)	2896,98 m ³	₡ 30.227,46	₡ 87.568.348,00
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)	19313,22 m ²	₡ 24.923,39	₡481.350.874,36

Obras preliminares	1,00 und	₺ 2.000.000,00	₺ 2.000.000,00
Pruebas de campo	6,00 und	₺ 186.500,00	₺ 1.119.000,00
Planos y Papelería	5,00 und	₺ 55.000,00	₺ 275.000,00
Limpieza	1,00 und	₺ 500.000,00	₺ 500.000,00
Póliza de riesgos de trabajo	3,71 %	-	₺ 22.241.706,30
Póliza de responsabilidad civil por daños a la propiedad de tercero	1,00 und	₺ 3.000.000,00	₺ 3.000.000,00
Trámites CFIA	0,265 %	-	₺ 1.685.583,83
Total			₺626.434.198,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

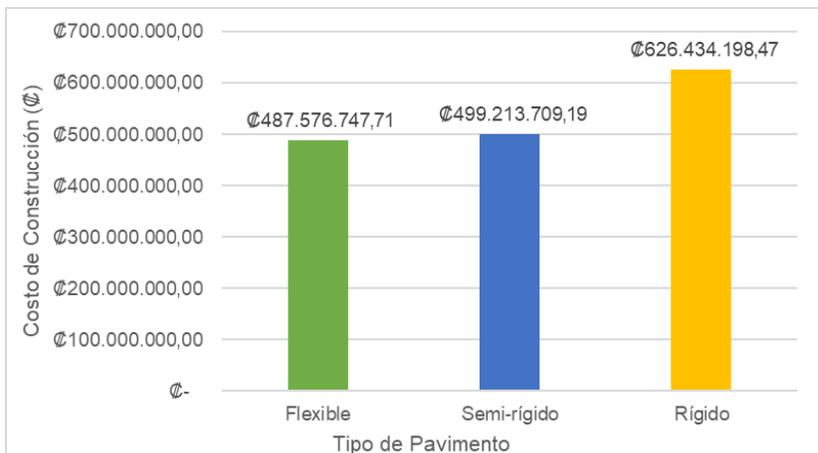


Figura 158. Costo de construcción ruta INA según tipo de pavimento.

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Plan de conservación y costo de mantenimiento

Los deterioros posibles que puede presentar cada estructura son variados, se muestran los

principales a los que estarán expuestas las estructuras debido a las características externas de la ruta, también se detalla el costo total que conlleva la intervención de cada deterioro.

CUADRO 126. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	956,10 m	₺ 4.373,04	₺ 4.181.065,03	₺ 3.412.994,51
6	Deformaciones en la carpeta	Recuperación de base	315,51 m³	₺ 47.363,38	₺ 14.943.761,68	₺ 9.957.659,39
6	Deformaciones en la carpeta	Carpeta de mezcla asfáltica	470,21 ton	₺113.783,98	₺ 53.502.363,71	₺ 35.650.884,01
10	-	Mantenimiento rutinario	956,10 m	₺ 7.022,15	₺ 6.713.876,78	₺ 3.412.994,51
12	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	379,93 ton	₺192.851,99	₺ 73.270.178,00	₺ 32.532.835,29
14	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	178,47 m	₺ 7.222,21	₺ 1.288.961,46	₺ 499.881,48
TOTAL					₺153.900.206,66	₺ 85.467.249,19

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 127. COSTO DE MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
3	-	Mantenimiento rutinario	860,49 m	₡ 4.373,04	₡ 3.762.958,53	₡ 3.071.695,06
4	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	25,50 m	₡ 3.671,40	₡ 93.606,09	₡ 71.411,64
8	Agrietamiento	Carpeta de mezcla asfáltica	470,21 ton	₡130.271,28	₡ 61.254.856,21	₡35.650.884,01
9	-	Mantenimiento rutinario	860,49 m	₡ 6.562,76	₡ 5.647.186,08	₡ 3.071.695,06
12	Deformaciones, huecos, grietas	Bacheo con mezcla asfáltica	265,97 ton	₡192.851,99	₡ 51.293.691,33	₡22.775.012,39
14	Fisuramiento	Ruteo y sellado de grietas	89,24 m	₡ 7.222,21	₡ 644.480,73	₡ 249.940,74
TOTAL					₡122.052.298,24	₡64.640.698,15

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Año	Deterioro	Mantenimiento	Cantidad	Costo/Und	VF	VP
4	-	Mantenimiento rutinario	478,05 m	₡ 4.503,83	₡ 2.153.057,28	₡ 1.642.557,09
8	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	76,49 m	₡ 8.614,81	₡ 658.929,87	₡ 383.503,18
10	Grietas en la losa, escalonamiento	Sustitución de losa	478,05 m ²	₡124.799,82	₡ 59.660.553,80	₡30.328.400,30
12	-	Mantenimiento rutinario	478,05 m	₡ 7.738,42	₡ 3.699.353,27	₡ 1.642.557,09
14	Fisuramiento	Sellado de juntas y grietas	133,85 m	₡ 12.928,51	₡ 1.730.533,10	₡ 671.130,57
TOTAL					₡ 67.902.427,32	₡34.668.148,23

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

CUADRO 128. VPN Y CAUE POR ESTRUCTURA		
Pavimento	VPN	CAUE
Flexible	₡ 573.043.996,89	₡ 62.917.150,58
Semi-rígido	₡ 563.854.407,34	₡ 61.908.183,04
Rígido	₡ 661.102.346,70	₡ 72.585.484,04

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

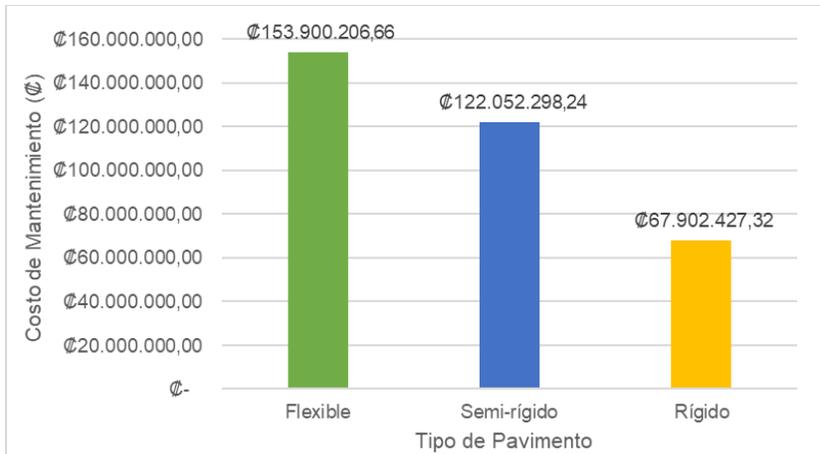


Figura 159. Costo de mantenimiento ruta INA según tipo de pavimento.
 Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Análisis de resultados

El diseño de las estructuras de pavimentos flexibles, semi-rígido y rígido fue hecho con base en el procedimiento de la guía de diseño de la AASHTO-93 y verificado mediante la metodología Mecánica Empírica para determinar si cada diseño cumplía o no con los parámetros de aceptación de dicha metodología.

Para que un diseño sea el idóneo y que la estructura de pavimento tenga un adecuado desempeño es de suma importancia analizar primeramente las características de los parámetros de diseño de los materiales o tránsito.

Las rutas a intervenir son tres, para el desarrollo de este proyecto se denominaron con los nombres de La Cecilia, Parque el Silencio e INA, dichas vías no se encuentran en buen estado a simple vista se encuentran lastreadas (Ver Apéndice P) y en algunos sectores en condiciones no tan favorables, el ancho del carril no es muy variado entre las rutas por lo que se decidió usar un ancho de carril de 3,00 m (6,00 m total ambos sentidos) para los diseños realizados porque son rutas cantonales donde el volumen del tráfico no es tan excesivo.

Con respecto al tema del TPD en las tres rutas no supera los 500 vehículos por día, por lo que estas se clasifican como carreteras terciarias según el Oficio DVOP-5170-07 del Ing. Pedro Castro (2007), sin embargo la ruta INA que da acceso a una carretera nacional terciaria (RVN 411) y que servirá como ruta alterna al nuevo hospital de Turrialba podría clasificarse la ruta INA como una carretera cantonal del tipo secundario cuando las obras del hospital culminen y las carreteras alrededor sean intervenidas también, porque habría un aumento del tránsito con el tiempo, este aumento se tomó en cuenta en el diseño en el cálculo de los ejes equivalentes con el uso de un factor de expansión de 20,00 %.

En cuanto a los suelos de las sub-rasantes, la U.T.G.V de la Municipalidad de Turrialba conservaba los datos del suelo de la ruta La Cecilia, mientras que para las otras dos rutas se hizo la extracción de materiales para su

respectivo estudio por parte de los encargados del laboratorio CIVCO, las pruebas ejecutadas a los suelos de estas dos vías fueron: Clasificación de suelos, Próctor Estándar, Índice de Soporte de California CBR y Gravedad Específica, dichos ensayos son muy importantes porque permiten obtener el tipo de suelo presente de las carreteras y parámetros de entrada para los programas utilizados, sin embargo la duración de estas pruebas en el laboratorio es considerable de ahí que se deba de realizar una buena planificación tomando en cuenta dicho tiempo o la realización de pruebas de campos las cuales duran menos tiempo en comparación a las pruebas de laboratorio como lo es el DCP que consiste en una prueba eficaz para obtener las propiedades del suelo y a partir de los resultados de esta prueba se estima el CBR "in situ" y se puede correlacionar con el CBR de laboratorio, la densidad, el módulo resiliente y la capacidad de carga del suelo.

Los informes obtenidos por parte de la U.T.G.V y el CIVCO indican que se hicieron varias extracciones de materiales en diferentes puntos de las rutas respectivas por lo que es difícil indicar un valor único para cada uno de los parámetros, porque cada sondeo muestra las diferencias que tienen los suelos en las diferentes secciones, al existir algunas diferencias significativas y otras no, una opción es escoger los valores más representativos de las perforaciones, pero esto limita el diseño porque no en todos los sectores es el mismo tipo de suelo y no se comporta de la misma manera, ante tal situación se utilizó un percentil 90 de los datos con el fin de obtener un 90,00 % de los escenarios evaluados esto permite obtener un diseño menos conservador y más adecuado a la realidad de los suelos de cada una de las rutas.

La clasificación AASHTO de los suelos, ya aplicado el percentil 90 (Ver Anexo A), indican que el suelo de La Cecilia es del tipo A-2-6 (0), mientras que los suelos de las restantes dos carreteras se clasifican ambos como un A-2-5 (0), son suelos granulares como gravas y arenas

limosas, pueden considerarse adecuados para una sub-rasante cuando presentan un buen drenaje y están compactados bajo una estructura de pavimento con espesores adecuados, esto también se ve reflejado en el porcentaje de CBR porque para la sub-rasante de La Cecilia el CBR fue de 5,95 %, para el Parque el Silencio fue de 5,68 % y para el INA fue de 7,85 % estos corresponden a datos característicos de sub-rasantes que se pueden clasificar como regulares.

Con la base y sub-base granular los datos fueron suministrados por un proveedor de la U.T.G.V (Quebrador Atirro-Tracmory) la base posee un CBR de 82,00 % y la sub-base un CBR de 58,00 % y ambos materiales cumplen con los límites mínimos que indica el CR-2010, son materiales adecuados para el diseño y el proyecto a realizar (Ver cuadro 3 y 5), sin embargo el CBR no es la única prueba para obtener módulo resiliente, existen los ensayos de compresión triaxial el cual simula la condiciones a las que puede estar expuesto el suelo y es una de las pruebas más confiables, los ensayos en sitio como el ensayo de placa con carga o un ensayo directo de módulo resiliente el cual facilita la relación que existe entre el esfuerzo y deformación de los materiales que constituyen un pavimento para su uso en el diseño de la estructura de pavimento.

La base estabilizada con cemento hidráulico usada en los pavimentos semi-rígidos y rígidos es del tipo BE-25 posee una resistencia a la compresión de 30,00 kg/cm² esto según los lineamientos mínimos que indica el CR-2010, usando un 7,00 % de cemento hidráulico y 93,00 % de agregado esto resulta en un incremento de la resistencia mecánica de la estructura de pavimentos.

Sobre la mezcla asfáltica los datos también fueron proporcionados por un proveedor de la confianza de la Municipalidad (Asfaltos CBZ), la mezcla posee un máximo nominal de 12,50 mm, con un porcentaje de vacíos de 5,50 % tomando en cuenta que la compactación de la mezcla se hace a un 7,00 % de vacíos en sitio menos una reducción de 1,50 % sobre la compactación lo cual deriva el porcentaje de 5,50 %, la mezcla posee un 6,10 % de asfalto óptimo y un 4,50 % de asfalto efectivo (Ver cuadro 1) estas son las características que presenta la planta, esta mezcla tendría un buen desempeño, no obstante una mezcla con un tamaño de grano de 19,00 mm podría tener mejores rendimientos, mayor resistencia, estabilidad, durabilidad entre otros.

Ruta La Cecilia

Periodo de diseño de 10 años

Para el diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos el cálculo de los ejes equivalentes fue de 50.714,66 con un factor de expansión de 20,00 % porque el tránsito está propenso a aumentar en el futuro según el Ing. Fabricio Leiva en su informe sobre el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito. Para los pavimentos rígidos se usó la correlación de la AASHTO-93 esta indica que al dividir los ejes equivalentes para los pavimentos flexibles y semi-rígidos entre 0,67 se obtienen los ejes para la estructura rígida, para este caso el resultado fue de 75.693,52 ejes.

Para esta ruta los espesores obtenidos con la guía de diseño AASHTO-93 para el pavimento flexible del periodo de diseño de 10 años es de 6,00 cm para la capa asfáltica, 15,00 cm para la base granular y 15,00 cm para la sub-base granular para un total de 36,00 cm, estos espesores respetan lo espesores mínimos que son establecidos en el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (Ver figura A-10) y también los espesores obtenidos de cada una de las capas toma en cuenta el tamaño nominal del agregado típicamente el espesor mínimo debe de ser al menos 3 veces el tamaño nominal máximo según las AASHTO-93, por lo que para la carpeta asfáltica se puede usar una mezcla de asfalto con granos 19,00 mm de tamaño como máximo y para las bases y sub-bases granulares el tamaño máximo del agregado es de 5,00 cm.

La estructura obtenida se evaluó en el programa CR-ME®, los módulos resilientes de las capas no ligadas como indican Trejos, Aguiar & Loria (2016) son afectadas por las condiciones climatológicas y el índice de humedad de Thornwaite, algunas de las capas se verán afectadas en mayor o menor grado por los cambios climáticos de la zona según sus propiedades físicas, en la figura 52 se muestra que los módulos resilientes de la base y sub-base se mantienen constantes, pero el comportamiento de estas debería de ser un mayor módulo teórico en los meses de menor precipitación, por su parte el módulo de la sub-rasante si es variable según lo explicado anteriormente y se le agrega que los materiales granulares también depende directamente de su contenido de humedad.

En la figura 53 se muestra el módulo dinámico de la capa asfáltica y es afectado por las temperaturas mensuales de esta capa, el porcentaje de fatiga en la fibra inferior es 3,92 %, mientras que la grieta en la fibra superior es de 8,01 % (Ver figura 54).

El paquete estructural obtenido se verificó que cumpliera con los parámetros de aceptación del programa CR-ME ®, el área agrietada o agrietamiento por piel de cocodrilo es prácticamente nula porque el valor es de 0,58 % mucho menor al valor límite de 75,00 %, por su parte el agrietamiento longitudinal tiene un valor de 222,62 pies/milla, en cambio el ahuellamiento total es de 14,75 mm y es el deterioro que rige el pavimento flexible porque es el más cercano al valor límite el cual corresponde a 25,00 mm, este deterioro es una falla estructural que generará una deformación permanente con el pasar del tiempo.

Para el caso del pavimento semi-rígido los espesores utilizados son para la capa asfáltica 6,00 cm; el SN de dicha capa es muy bajo puesto que al tener una base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) la rigidez es mayor en esta y por ende la capa asfáltica no aporta en mucho en la parte estructural y trabaja específicamente por compresión en este tipo de pavimento, el mínimo espesor para la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) es de 15,00 cm según Leiva, Arce & Castro (2005) porque es el adecuado para calles cantonales de bajo volumen de tránsito, sin embargo este espesor mínimo no cumplía con los módulos de desempeño para este pavimento por lo que se usó una base estabilizada de 20,00 cm y a diferencia de la capa asfáltica esta trabaja por fatiga o tensión, por su parte la sub-base granular tiene un espesor es de 20,00 cm para un total 46,00 cm de estructura semi-rígida.

Al ser un pavimento semi-rígido los parámetros de área agrietada, agrietamiento longitudinal y daño por fatiga en la capa asfáltica son nulos porque la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) es la que amortigua el efecto de las cargas debido a su alta rigidez, genera una mayor duración y da mayor resistencia. Las figuras 58 y 59 muestran el mismo comportamiento de los módulos resilientes y el módulo dinámico respectivamente del pavimento flexible con la única diferencia que la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) no presenta ninguna modificación por las condiciones climáticas.

El ahuellamiento total de pavimento es menor al pavimento anterior por el uso y las características de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25), el ahuellamiento total es de 8,28 mm cumpliendo con el valor límite, sin embargo, es un parámetro para tomar en cuenta para cualquier intervención a futuro.

Los modelos de fatiga de la PCA y del Oficio DVOP-5170-07 usados en esta estructura semi-rígida indica que las repeticiones de carga que puede soportar el pavimento son mayores a las repeticiones de carga de diseño indicando que los espesores de las capas de la estructura propuesta son adecuados y resisten más de lo previsto (Ver cuadros 24 y 25), en este caso el modelo de fatiga de la PCA es el que rige la estructura, el esfuerzo a tensión de la última fibra de la base estabilizada es de 49,73 psi y la deformación unitaria es de $1,31 \times 10^{-5}$, ambos se obtiene del programa PITRA PAVE ® del LanammeUCR.

El pavimento rígido está compuesto por dos capas únicamente, la losa de concreto hidráulico y la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25), no utiliza una sub-base porque este tipo de pavimento permite prescindir de esta capa, ya que la losa y la base estabilizada presentan rigideces bastante altas que permiten una buena transmisión de las cargas, la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) también permite disminuir el bombeo de finos de las capas inferiores, da una mejor resistencia a la erosión, evita daños durante la construcción de la losa de concreto, además de las otras ventajas ya mencionadas anteriormente.

El espesor de losa calculado con la metodología AASHTO-93 no cumplía con el mínimo espesor de 15,00 cm con base en lo recomendado por Huang (2004) y la guía de diseño AASHTO-93, por lo que el espesor supuesto o proyectado fue el usado para la losa de concreto y equivale a un espesor de 15,00 cm, para la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) se utilizó el mismo criterio para los pavimentos semi-rígidos un mínimo de 15,00 cm.

En este pavimento se verificó su respuesta mediante tres modelos de desempeño, el primero el modelo de escalonamiento de Huang el cual dio 0,014 in (0,036 cm) el cual es menor al máximo permitido de 0,12 in (0,30 cm), el segundo modelo es de Huang también y corresponde al modelo de bombeo y erosión para este caso la estructura tiene un índice menor a 1,00 generando una

severidad nula por lo que la estructura se acepta y por último el modelo de fatiga del Ing. Sukti Monge indica que la estructura soportará más repeticiones de carga en comparación a los que los ejes equivalentes de diseño, el esfuerzo que se ejerce en la estructura rígida es de 180,40 psi obtenida del ApRIGID © del LanammeUCR.

El diseño de la estructura rígida se completa con el diseño del acero de refuerzo, dovelas de varilla # 6 con un separación de 30,00 cm con un largo de 35,00 cm, por otro lado las barras de amarre de varilla # 4, separadas a cada 60,00 cm y con una longitud de 56,00 cm; según Huang (2004) la PCA define que el diámetro de las dovelas debe de ser al menos un octavo del espesor de la losa y que el largo de estas dependería del diámetro de la varilla seleccionada (Ver figura A-16), también este mismo autor indica que a las barras de amarre se les debe de añadir 3,00 in (7,50 cm) al largo debido a la desalineación que podrían sufrir las barras.

En la figura 64 se muestra que la primera dovela de la losa calculada es la que recibe mayor fracción de carga total en función de su ubicación respecto al punto de carga, en total recibe 1.948,67 lb de una carga aplicada de 4.500,00 lb por llanta debido a que se usa un eje dual de 18.000,00 lb (8,18 ton) para el diseño de estar.

El acero de refuerzo tiene la función de disminuir los esfuerzos en la losa de concreto, así como la transferencia de cargas entre las losas adyacentes por lo que las dovelas deben de ser de varilla lisa de grado 60, mientras que las barras de amarre son de acero deformado y grado 40 según los lineamientos del CR-2010, también es importante mencionar que el acero de refuerzo debe de ser colocado a la mitad del espesor de losa para evitar inconvenientes con su funcionalidad.

Con respecto a la separación de las juntas transversales fue usado el criterio que la separación puede ser 18 - 21 veces el espesor de losa (Castro, 2019), para este diseño se utilizó una separación de 21 veces el espesor dando un largo de 3,20 m, además se verificó también la relación del longitud / ancho, donde el ancho no debe de ser 1,25 veces el largo según la AASHTO-93, en este caso se cumple, ya que el ancho de carril es de 3,00 m, el espaciado entre juntas debe de basarse en la experiencia del diseñador, ya que algún cambio de material podría tener algún efecto en el coeficiente de expansión térmica y

Periodo de diseño de 15 años

El diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos se hizo con un total de 84,581.08 ejes y para los pavimentos rígidos se hizo con un total de 126,240.42 ejes, cabe resaltar que en la ruta no pasan buses ni vehículos del tipo T3-S2 debido a las condiciones en la que se encuentra la ruta.

El pavimento flexible del periodo de diseño de 15 años posee un paquete estructural de 7,00 cm para la capa asfáltica, 15,00 cm para la base granular y 15,00 cm para la sub-base granular para un total de 37,00 cm, base y sub-base granular usan los espesores mínimos.

Al verificar la estructura en el programa CR-ME ©, los módulos resilientes de las capas no ligadas y el módulo dinámico (Ver figuras 72 y 73 respectivamente) tienen el mismo comportamiento que los modelos del pavimento flexible del periodo de diseño anterior. El porcentaje de daño en la fibra inferior es de 9,33 % debido a la fatiga y en la fibra superior es de 17,31 % ocasionado por la contracción del cemento asfáltico debido a los constantes cambios de temperatura que puede sufrir o también al envejecimiento de la capa.

Los espesores calculados con la AASHTO-93 cumplen satisfactoriamente con los modelos de desempeño del programa CR-ME ©, el ahuellamiento es el deterioro que registraría, el valor obtenido es de 14,59 mm, muy parecido al del pavimento flexible del periodo anterior, hay diferencias entre los ahuellamientos de las capas por ejemplo el ahuellamiento de la capa asfáltica es mayor en el periodo de 15 años a la del periodo de 10 años, ya que el tiempo de funcionalidad es mayor y también debe de soportar mayores cargas vehiculares que generaran un mayor deterioro de algunas de las capas.

Para el pavimento semi-rígido mediante la AASHTO-93 se obtiene para la capa asfáltica un espesor de 6,00 cm; para la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) 20,00 cm y para la sub-base 20,00 cm, una estructura con las mismas dimensiones a la del periodo anterior, esto se da porque los ejes equivalentes entre ambos periodos son muy parecidos y no van a generar diferencias considerables en los espesores teóricos.

Con respecto a los módulos resilientes y dinámico presentan el mismo comportamiento que los módulos del periodo anterior siendo afectados por las condiciones climáticas, índice de humedad y temperatura mensual respectivamente, la base

estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) no se ve afectada por esas condiciones.

El ahuellamiento total de pavimento cumple con el umbral establecido y los modelos de fatiga de la PCA y el Oficio del 2007 indica que las repeticiones de carga son mayores a las repeticiones de carga para el diseño el esfuerzo a tensión de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) es de 49,73 psi y la deformación unitaria tiene un valor de $1,31 \times 10^{-5}$, tanto para este periodo como para el anterior tienen el mismo valor, al cumplir con estos modelos de desempeño la estructura cumple con lo establecido.

En el pavimento rígido pasa la misma situación que los pavimentos semi-rígidos de que los ejes equivalentes y las características del suelo van a generar estructuras con los mínimos espesores, para este pavimento al igual que el pavimento rígido anterior la losa de concreto es de 15,00 cm y la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) también es de 15,00 cm.

Se verificó la estructura calculada con los modelos de desempeño, el modelo de escalonamiento cumple con el máximo permitido, el modelo de bombeo y erosión para este caso la estructura tiene un índice de 0,80 menor a 1,00, por lo tanto la severidad es nula y por último el modelo de fatiga revela que la estructura supera las repeticiones de carga de diseño. Al ser la misma estructura rígida del periodo anterior el acero de refuerzo cumple con las mismas dimensiones y separaciones (dovelas de varilla # 6 a cada 30,00 cm de 35,00 cm de largo y barras de amarre de varilla # 4 a cada 60,00 cm y con una longitud de 56,00 cm).

Ruta Parque el Silencio

Esta ruta como se mencionó en la sección de la metodología se divide en dos secciones una que corresponde al Parque el Silencio y la otra sección que pasa al frente del Liceo Bilingüe Experimental de Turrialba, el TPD de esta ruta fue realizado en la primera sección debido a que la cantidad de vehículos que circulaban por el Liceo era escasa debido a las malas condiciones de la vía, por lo que el diseño realizado corresponde a las dos secciones.

Periodo de diseño de 10 años

Para el pavimento flexible se obtienen para las capas de la base y sub-base granular 15,00 de espesor para cada una, por su parte la capa asfáltica posee un espesor de 8,00 cm según el diseño AASHTO-93.

Los módulos resilientes (figura 88) de la base y sub-base tienen un comportamiento similar a los módulos de la ruta anterior, son constantes durante todos los meses, en cambio el módulo resiliente de la sub-rasante si es variable debido a que a mayor precipitación menor será el módulo y a esto se le suma que a los materiales granulares dependen de su contenido de humedad, el módulo dinámico de la superficie de ruedo si tiene el mismo comportamiento al igual que en la ruta anterior.

El daño por fatiga (figura 90) es de 23,60 % mientras que la grieta es de 27,25 % debido a la exposición de la capa asfáltica a los cambios bruscos de temperatura, con el tiempo es mayor y puede llegar a ocasionar daño como grietas, piel de cocodrilo, reflejo de grietas entre otros deterioros en la capa asfáltica. Los datos del programa CR-ME ® indican que se cumplen con los límites, el agrietamiento longitudinal es el deterioro que rige, ya que es el que se encuentra más cercano al límite, en comparación el área agrietada y el ahuellamiento están por debajo de sus respectivos límites los cuales son 75,00 % y 25,00 mm (Ver cuadro 55).

Los espesores del pavimento semi-rígido mediante la AASHTO-93 para el caso de la capa de ruedo el espesor mínimo es de 6,50 cm, sin embargo, por cuestiones de construcción es más fácil construir un espesor con un número redondo por lo que el espesor mínimo para la capa asfáltica se redondea a 7,00 cm, la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) se diseñó con un espesor de 20,00 cm y para la sub-base de 20,00 cm para un total de 47,00 cm.

El módulo de la base estabilizada como ya se ha mencionado no se ve afectado por las condiciones de la temperatura y el índice de Thornwaite, los módulos resilientes de la sub-base y sub-rasante, así como el dinámico presentan el mismo comportamiento al igual que en el pavimento flexible. El ahuellamiento total es de 5,09 mm y cumple con lo establecido y ambos modelos de fatiga superan las repeticiones de carga para el diseño, cabe resaltar que el esfuerzo a tensión de la última fibra de la base estabilizada

con cemento hidráulico (BE-25) es de 46,48 psi y la deformación unitaria a la tensión de la capa asfáltica es de $1,19 \times 10^{-5}$.

El pavimento rígido usando la ecuación de la metodología AASHTO-93 muestra que el espesor de la losa de concreto es de 11,32 cm como no cumple con el mínimo señalado se concluye usar un espesor de 15,00 cm mismo espesor de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25), por lo que la estructura es de 30,00 cm en total. El esfuerzo que se ejerce en la estructura rígida es de 181,40 psi, con este se calcularon los modelos de trabajo y los tres cumplieron con los valores límites con esto se asegura que la estructura trabaje de buena manera a futuro.

El diseño se completa con la propuesta del acero de refuerzo, dovelas de varilla # 6 a cada 30,00 cm de 35,00 cm de largo y barras de amarre de varilla # 4 a cada 55,00 cm y con una longitud de 56,00 cm, cumpliendo además con las especificaciones técnicas del CR-2010 y PCA para que la transferencia de cargas entre losa sea a un 100,00 %, también para este diseño la primera dovela de la losa diseñada es la que mayor carga recibe concretamente un total de 1.940,34 lb, ya que en el diseño realizado esta se encontraba por debajo de la carga lo cual hace que tenga una contribución relativa de 1,00.

Periodo de diseño de 15 años

El diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos se hizo con un total de 361.429,74 ejes equivalentes, mientras que para los pavimentos rígidos se hizo con un total de 539.447,37 ejes. La estructura flexible posee 9,00 cm de capa asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular, para un total de 39,00 cm.

Los módulos resilientes de las capas no ligadas y el módulo dinámico conservan el mismo comportamiento de los pavimentos flexibles del primer periodo (Ver figuras 108 y 109). El daño de abajo hacia arriba y el daño de arriba hacia abajo son parecidos 42,42 % y 46,89 % respectivamente, siendo el agrietamiento un poco más susceptible para afectar la capa asfáltica. Al utilizar el CR-ME ® para verificar la estructura la misma cumple con los umbrales límites, el agrietamiento longitudinal rige este diseño.

La estructura del pavimento semi-rígido mediante la AASHTO-93 es la misma al del periodo anterior únicamente lo que cambian son

los espesores teóricos, pero al ser tan bajas la capa asfáltica se diseñó con el espesor mínimo y la base estabilizada y la sub-base se diseñó con 20,00 cm de espesor cada una, no hay un aporte estructural tan definido de la capa asfáltica porque la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) aporta mucha rigidez a la estructura y esto produce que la estructura se dimensione igual a la del periodo anterior.

Los módulos resilientes de la sub-base y sub-rasante, así como el dinámico presentan el mismo comportamiento al igual que en el pavimento flexible. El ahuellamiento total es de 6,13 mm y es mayor al del periodo anterior por lo que esta estructura sufriría un poco más de deformaciones permanentes, los modelos para la fatiga indican que las repeticiones de carga obtenidas tanto en la base estabilizada como en la carpeta asfáltica son mayores al número de repeticiones de diseño.

El pavimento rígido tiene un paquete estructural de 30,00 cm divididos entre 15,00 cm de losa de concreto y 15,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25). Las dovelas diseñadas tienen las siguientes características varilla # 6 lisa para mejorar la transmisión de las cargas entre las losas, con una separación de 30,00 cm de 35,00 cm de largo y barras de amarre de varilla # 4 corrugado a cada 55,00 cm con una longitud de 56,00 cm, esta longitud ya tiene incorporado 3,00 in (7,50 cm) para evitar la desalineación, tanto las barras de amarre y dovelas se colocan a la mitad del espesor de la losa.

La estructura rígida es aceptable, ya que cumple con los modelos de desempeño, el modelo de escalonamiento es de 0,040 in (0,10 cm) menor al límite de 0,12 in (0,30 cm), el índice de bombeo y erosión brinda una severidad baja porque está entre 1,00 y 2,00 y por último la fatiga da como resultado que la estructura soporta los ejes equivalentes de diseño.

Ruta INA

Periodo de diseño de 10 años

Para este periodo los ejes equivalentes para los pavimentos flexibles y semi-rígidos rondan los 251.882.64 mientras que para los pavimentos

rígidos el cálculo da como resultado 375.944,24 esto aplicado el criterio de la AASHTO-93.

El pavimento flexible tiene una estructura parecida a las anteriores, una capa de ruedo de 9,00 cm, una base granular de 15,00 cm y una sub-base de 15,00 cm, para un total de 39,00 cm.

El daño por grieta (figura 126) indica que la estructura se ve más afectada en la parte superior de la capa asfáltica con un daño de 25,96 %, mientras que el daño por debajo de esta capa es de 17,81 %. Los modelos de desempeño que se verifican en el CR-ME ® cumplen con los límites establecidos, el agrietamiento longitudinal el cual es de 1.775,75 pies/milla y el ahuellamiento total de 14,58 mm se encuentran cercanos a sus límites por lo que podrían generar algunos deterioros en la estructura de pavimento.

Por su parte para la estructura del pavimento semi-rígido mediante la AASHTO-93 corresponde a 7,00 cm capa asfáltica, 20,00 cm base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y 20,00 cm sub-base granular. Los módulos resilientes de las capas no ligadas y el módulo dinámico conservan el mismo comportamiento de los pavimentos flexibles anteriormente diseñados. El ahuellamiento total en este pavimento llega a ser de 8,55 mm y cumple el límite, el esfuerzo a tensión de la última fibra de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) es de 45,11 psi y se usa en el modelo de fatiga de la PCA el cual prevalece ante las repeticiones de carga para el diseño, el modelo de fatiga de la capa asfáltica da como resultado repeticiones mayores a las de diseño con una deformación unitaria de $1,27 \times 10^{-5}$.

El pavimento rígido según la guía de la AASHTO-93 tiene un espesor de losa de concreto de 11,10 cm, pero se propone el uso de una losa de 15,00 cm mismo espesor de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25). El esfuerzo de la estructura es de 172,20 psi obtenido del ApRIGID ®, con ello y los modelos de desempeño se determina que la estructura es segura y puede ser considerada para su construcción.

El acero de refuerzo se compone de, dovelas de varilla # 6 lisa grado 60 a cada 30,00 cm y de 35,00 cm de largo y las barras de amarre de varilla # 4 deformada a cada 50,00 cm y con una longitud de 56,00 cm, además de esto la primera dovela es la que se encuentra por debajo de la carga recibiendo un total de 2.020,66 lb y la cuarta dovela es la que menos recibe de las diez

dovelas colocadas en la losa de diseño (Ver figura 136).

Periodo de diseño de 15 años

Para este periodo y el diseño de los pavimentos flexibles y semi-rígidos se calcularon un total de 420.085,72 ejes, mientras que para los pavimentos rígidos se calculó un total de 626.993,61 ejes. La estructura de pavimento flexible está compuesta por igual 10,00 cm de capa asfáltica, 15,00 cm de base granular y 15,00 cm de sub-base granular. El daño de arriba hacia abajo es 47,66 % y el daño de abajo hacia arriba es aproximadamente un 34,79 %, el agrietamiento longitudinal es de 1.814,97 pies/milla y el ahuellamiento total de 14,98 mm ambos se encuentran cercanos a sus límites, pero estos dos deterioros podrían generar las mayores fallas en el pavimento (Ver cuadro 114).

La estructura semi-rígido mediante la AASHTO-93 comparte los mismos espesores de capa de la estructura semi-rígida del periodo anterior, la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) aporta mucha rigidez lo que produce que el SN de la capa asfáltica sea bajo y no aporte tanto estructuralmente. El módulo de la base estabilizada es constante y no se ve afectado, por su parte los módulos resilientes de la sub-base y sub-rasante, así como el dinámico presentan el mismo comportamiento al igual que en el pavimento (Ver figuras 150 y 151). El ahuellamiento total es de 9,39 mm y cumple con el umbral establecido, mismo caso para los modelos de fatiga de la base estabilizada y la capa asfáltica ambos cumplen con el número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga.

El pavimento rígido tiene un paquete estructural compuesto por 15,00 cm de losa de concreto y 15,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25). Las dovelas diseñadas tienen las mismas características y dimensiones del periodo anterior varilla # 6 lisa grado 60, con una separación de 30,00 cm de 35,00 cm de largo y barras de amarre varilla # 4 grado 40 corrugado a cada 50,00 cm con una longitud de 56,00 cm, esta longitud cumpliendo con los parámetros del CR-2010.

La estructura rígida se acepta porque cumple con los modelos de desempeño, el modelo de escalonamiento es de 0,048 in (0,12 cm), el índice de bombeo y erosión brinda una severidad baja porque está entre 1,00 y 2,00 y por último la

fatiga da como resultado que la estructura soporta los ejes equivalentes de diseño.

Costo de construcción

Para determinar qué tipo de estructura se debe de construir se calcularon los costos de inversión que debe de realizar la Municipalidad de Turrialba para tomar la decisión de cual pavimento se adecúa al presupuesto de la institución y las necesidades de la comunidad.

Los costos de construcción obtenidos de las estructuras por periodo de diseño en algunos de los casos eran iguales para una misma ruta, esto se debe a que los pavimentos compartían un mismo paquete estructural debido principalmente al uso de los espesores mínimos por capa y al uso de los mismos tipos de materiales, mano de obra y equipo.

Para la primer ruta La Cecilia y para el periodo de diseño de 10 años los pavimentos flexibles tienen un costo de ₡ 143.802.144,28, el costo de construcción del pavimento semi-rígido es de ₡ 185.820.185,75 y el costo del pavimento rígido es de ₡ 247.832.881,28, la estructura flexible es 23,00 % más económica que el pavimento semi-rígido y 42,27 % menor al rígido, mientras que el pavimento semi-rígido es 25,02 % más barato que el rígido, lo cual confirma según la bibliografía consultada que los pavimentos flexibles tienen un costo de inversión menor y los pavimentos rígidos mayor debido al uso y costo materiales distintos y técnicas constructivas.

En el periodo de diseño de 15 años de esta misma ruta la estructura flexible tiene un costo de ₡ 155.820.685,17, los costos del pavimento semi-rígido y rígido son los mismos del periodo anterior, ya que comparten las mismas dimensiones de capas (₡ 185.850.185,75 y ₡ 247.832.881,28 respectivamente), por lo tanto la estructura flexible es 16,14 % más económico que el pavimento semi-rígido y es 37,13 % menor al rígido.

En la ruta del Parque el Silencio los costos de las estructuras se disminuyen, para el periodo de diseño de 10 años el pavimento flexible tiene un costo construcción de ₡ 76.403.167,11, el costo del pavimento semi-rígido es de ₡ 89.284.061,47 y el del pavimento rígido es de ₡ 110.564.107,17, la estructura flexible es 14,43 % más económico que el pavimento semi-rígido y 30,90 % menor al rígido, por su parte el pavimento semi-rígido es 19,25 % menor al rígido.

Para el periodo de diseño de 15 años de la ruta Parque el Silencio se obtuvieron los siguientes costos de inversión, la estructura flexible tiene un costo de ₡ 81.871.405,35, el precio del pavimento semi-rígido y rígido son los mismos del periodo anterior, ya que comparten las mismas dimensiones de capas, siendo el flexible el más económico de los tres específicamente con un 8,30 % más económico que pavimento semi-rígido y un 25,95 % menor al rígido, no obstante el semi-rígido es 19,25 % más barato que el rígido.

En la ruta tres INA los precios obtenidos son los más costosos debido a que es la ruta con mayor longitud de las diseñadas; para el periodo de 10 años el costo de construcción del pavimento flexible es de ₡ 454.836.946,57, el del semi-rígido es de ₡ 499.213.709,19 y el rígido tiene un costo de ₡ 626.434.198,47, el flexible es 8,89 % menor al semi-rígido y 27,39 % con respecto al rígido, por otro lado el pavimento semi-rígido es 20,31 % menor al rígido.

Para el periodo de diseño de 15 años de la ruta se alcanzaron los siguientes costos de construcción, el pavimento flexible tiene un costo de ₡ 487.576.747,71, el precio del pavimento semi-rígido y rígido son los mismos del periodo anterior, el flexible el más económico de los tres un 2,33 % más barato que el pavimento semi-rígido y un 22,17 % menor al rígido.

Plan de Conservación y costo de mantenimiento

La elaboración de un plan de conservación no es tarea sencilla, ya que depende mucho del comportamiento de la estructura según las cargas de tránsito y ambiente así como las condiciones climáticas a las que estará expuesta la carretera y a su vez depende de la experiencia del diseñador por lo que fue importante tomar en cuenta lo consultado en la bibliografía.

Teniendo en cuenta esto se formularon diferentes cuadros en la sección de resultados donde se especifica algunos de los deterioros posibles a los que puede estar expuesto cada una de las estructuras, así como la mejor intervención y el costo total del mantenimiento durante el periodo de vida del pavimento, también se indicó cuando es necesario realizar un mantenimiento rutinario como la limpia de cunetas, drenajes, zonas verdes entre otros porque si no se realizan

estas actividades el pavimento se deteriora no al ritmo de una deformación o un fisuramiento por poner un ejemplo, pero si tiene un porcentaje de deterioro considerable.

Con respecto a los daños más comunes en la sección del Apéndice O se muestra los posibles deterioros a los cuales puede ser más propenso cada uno de los tres pavimentos, destacan daños como fisuramiento, agrietamiento bajo, cuero de lagarto bajo, huecos, bacheo, deformaciones para los pavimentos flexibles y semi-rígido, en el caso de los pavimentos rígidos destaca fisuramiento, fracturas en esquinas y juntas, grietas en losa y escalonamiento, esto según las características a las que estará expuesta la estructura de pavimento, el porcentaje de daño depende de muchos factores, por lo que no se puede establecer de una manera tan precisa la cantidad de daño presente en los pavimentos.

Los costos de intervención o mantenimiento son variados entre rutas debido a sus respectivas características por ejemplo para la ruta la Cecilia en su periodo de diseño de 10 años los costos de mantenimiento del pavimento flexible son ₡ 36.809.068,65, para el pavimento semi-rígido es de ₡ 21.530.958,50 y por último el pavimento rígido el costo de mantenimiento es de ₡ 16.248.322,74, en este caso el pavimento rígido es el de menor costos de mantenimiento, es 55,86 % más económico que el pavimento flexible y 24,54 % más barato que el semi-rígido, mientras que este último es 41,51 % más barato que el flexible, en este caso de los costos de mantenimiento de los pavimentos rígidos son menores debido a que los materiales que lo componen poseen características que le dan a la estructuras más resistencia, más durabilidad y estabilidad que se ve reflejada en estos costos.

Para el periodo de 15 años el costo posible de las intervenciones del pavimento flexible es de ₡ 51.556.772,02, el pavimento semi-rígido ronda los ₡ 44.886.295,97 y para el pavimento rígido es de ₡ 26.419.519,89, este último es 48,76 % menor al pavimento flexible, mientras que es un 41,14 % menor al semi-rígido, por otra parte el pavimento semi-rígido es 12,94 % más económico en el aspecto del mantenimiento al pavimento flexible.

En la ruta del Parque el Silencio los costos de mantenimiento para el pavimento flexible son de ₡ 15.801.183,26, para el pavimento semi-rígido ₡ 10.516.921,79 y para el pavimento rígido el costo es de ₡ 6.974.985,64, en referencia a este pavimento rígido es 55,86 % menor al pavimento

flexible y un 33,68 % menor al semi-rígido, el pavimento semi-rígido es 33,44 % más económico que el pavimento flexible. En el periodo de 15 años los costos de intervención del pavimento flexible son de ₡ 27.644.987,80, el costo del semi-rígido es ₡ 20.492.391,58 y para el pavimento rígido ronda los ₡ 11.341.218,09, por lo que el costo de mantenimiento del pavimento rígido es 58,98 % menor al flexible y 44,66 % menor al semi-rígido, por su parte el semi-rígido es 25,87 % menor al flexible, siendo el pavimento flexible el de mayor costo de mantenimiento.

En la ruta INA los costos de intervención para el pavimento flexible son de ₡ 94.605.243,38, para el pavimento semi-rígido ₡ 62.971.567,84 y para el pavimento rígido ₡ 42.553.996,97, el pavimento rígido es el más barato en costos de mantenimiento específicamente 55,02 % menor al flexible y un 32,42 % menor al semi-rígido, el pavimento semi-rígido es 33,44 % más económico que el pavimento flexible.

El pavimento flexible del periodo de 15 años se invierte para el mantenimiento ₡ 153.900.206,66, mientras que para el pavimento semi-rígido ₡ 122.052.298,24 y para el pavimento rígido ₡ 67.902.427,32 siendo el pavimento rígido con el costo de mantenimiento más económico, 55,88 % más barato que el flexible y 44,37 % menor al semi-rígido, mientras que el semi-rígido es 20,69 % más económico que el flexible

Para que la conservación de las estructuras de pavimentos sea la más correcta se deben de hacer inspecciones periódicas no mayores a un año, para ello se adjuntó un formulario en el Apéndice O para que la Municipalidad tenga a mano a la hora de realizar dicha actividad y con ello determinar el rendimiento actual del pavimento, tomar las medidas necesarias y tener un estudio de como se ha comportado el pavimento en cada una de las visitas a campo, esto se hace para que los encargados obtengan mayor experiencia con esta tarea y puedan aplicarlo a otros proyectos de su interés.

Pavimento elegido

En la escogencia de cual estructura de pavimento es la mejor para la comunidad no solo se debe de hacer énfasis en los criterios de los costos de construcción y mantenimiento y en el criterio del diseño, sino hay que tomar en cuenta el

comportamiento de la estructura, aspectos técnicos entre otros.

Técnicamente las estructuras de pavimentos tienen sus ventajas y desventajas por ejemplo, el pavimento flexible tiene como ventajas que su costo de construcción es el más económico, también el tiempo de construcción es corto comparado a los otros dos pavimentos, además de que la reconstrucción o rehabilitación es más rápida, no obstante algunas de las desventajas de este pavimento son que el costo de mantenimiento es mayor como se especificó anteriormente, a temperaturas altas, como las que son comunes en Turrialba, puede sufrir de mayores deformaciones permanentes por lo que es importante usar una capa asfáltica con un buen diseño de mezcla o agregarle algún aditivo que permite aumentar la rigidez de la capa para evitar este inconveniente, también las lluvias de la zona pueden generarle una pérdida de durabilidad a la capa asfáltica que podría ocasionar algunos huecos o depresiones en la capa.

Por su parte los pavimentos semi-rígidos poseen como ventaja el uso de la base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25), ya que da mayor rigidez y resistencia a la estructura, esto genera que el agrietamiento y el ahuellamiento total sean menores al del pavimento flexible, pero el problema está en el proceso constructivo de la base porque al ser estabilizada con cemento hidráulico debe de tener la cantidad adecuada de cemento porque entre mayor sea la cantidad de este podría generar mayores grietas por contracción o fatiga, debe de darse un tiempo para que la base logre alcanzar una resistencia adecuada para continuar con el proceso constructivo aproximadamente unos siete días, este es un periodo que puede llegar a afectar el tránsito de los usuarios, pero sin el respectivo periodo de ganancia de resistencia puede ocasionar que la base estabilizada no funcione adecuadamente y se generen grietas por debajo que se reflejen en la capa asfáltica.

El pavimento rígido por presentar capas con altas rigideces genera una estructura más duradera, resistente y más estable, ocasionando que los costos de mantenimiento sean menores, pero el costo de construcción es mayor debido a la calidad de los materiales y que además el tiempo para construirlo y el de los trabajos de mantenimiento sea mayor y más complejo.

Para la determinación de cual estructura es la mejor se analizaron y tomaron en cuenta los siguientes puntos:

1. El primero punto a tomar en cuenta y uno de los más importantes es el compromiso que tendrá la Municipalidad con el funcionamiento y construcción del pavimento, porque el diseño de una estructura de pavimento se puede realizar para cualquier periodo, pero si no hay responsabilidad de la Municipalidad de realizar las inspecciones periódicas cada cierto tiempo, cumplir con los debidos procesos de mantenimiento rutinario, preventivo o correctivos de una forma correcta, y si no hay un proceso de control de calidad de materiales, técnicas constructivas durante la construcción, se puede escoger el mejor pavimento técnicamente, estructuralmente y económicamente, pero sin la ayuda de la institución difícilmente un pavimento logre cumplir con su funcionalidad por la cual fue diseñado.

2. En cuanto a los aspectos técnicos, como ya se mencionaron los pavimentos tienen sus ventajas y desventajas siendo el pavimento flexible el más sencillo de construir, es el que menor tiempo toma para desarrollar y se adecua más a los tránsitos de bajo volumen como son estas tres rutas, pero el semi-rígido puede dar mejores beneficios de resistencia que un flexible, un mejor control de erosión y eso lo más hace más adecuado, pero el problema está en el proceso constructivo, por su parte el rígido da mayor durabilidad y resistencia que los otros dos pavimentos, sin embargo al igual que el semi-rígido su problema se concentra en la duración y las técnicas constructivas.

3. En relación con el tema de los costos de construcción las diferencias entre los costos de los pavimentos flexibles y semi-rígidos entre uno y otro periodo no son tan significativas, lo cual permite analizar que si se construyen los pavimentos flexibles el precio es más cómodo, pero se tendrá una estructura menos resistente, si se construye el semi-rígido el costo es mayor pero como se puede observar las diferencias de costos entre ambos pavimentos no es tan significativa, por su parte el pavimento rígido si se descartaría en el tema de los costos de construcción, ya que su costo es mucho mayor al de los otros dos.

4. Con respecto al Costo Anual Uniforme Equivalente este indica que las estructuras de pavimentos del periodo de diseño de 15 años presentan un menor CAUE con respecto a las

estructuras del periodo de diseño de 10 años, cabe resaltar que este criterio permite comparar proyectos cuando tienen una vida útil distinta, teniendo en cuenta esto los pavimentos del segundo periodo son la mejor alternativa para invertir por generar los menores costos anuales para la Municipalidad de Turrialba

5. En el tema de los costos de intervención o mantenimiento la mejor opción son los pavimentos rígidos por presentar los menores costos, pero si suman los costos iniciales y los de mantenimiento y tomando en cuenta los resultados del CAUE los pavimentos flexibles son los más accesibles.

Tomando en cuenta los aspectos anteriores se decide usar las estructuras semi-rígidas del periodo de diseño de 15 años para las tres rutas, ya que a pesar de que los costos son mayores a los de un pavimento flexible son costos accesibles y el rendimiento de la estructura es mejor gracias a la mayor resistencia y rigidez del pavimento.

Conclusiones

1. Los parámetros de diseño de los suelos presentes en las rutas indican que son adecuados para una sub-rasante según los ensayos de laboratorio realizados con los materiales extraídos, esto permitirá que la construcción de las estructuras se asiente sobre materiales resistentes y duraderos.

2. Las diferencias entre periodos con respecto a los resultados de la MEPDG no son tan significativas debido a que la diferencia de tiempo es de tan solo 5 años, además de que las características de los materiales, las cargas de diseño y espesores de capas no variaban tanto en ese lapso.

3. Cualquiera de las tres alternativas de pavimentos diseñadas que logre escoger las Municipalidad de Turrialba va a mejorar las actuales condiciones en las que se encuentra las rutas y la decisión que tomen no solo debe hacerse con base en los costos de inversión, de intervención y CAUE sino deben de considerarse también el impacto a la sociedad y las ventajas y desventajas técnicas de construir uno u otro pavimento.

4. Con respecto a los costos de construcción, al no usar los materiales existentes de las rutas como algún tipo de base o sub-base según los requerimientos del CR-2010 los costos de construcción hubiesen disminuidos al usar el material existente como material granular reciclado.

5. Los pavimentos semi-rígidos del periodo de 15 años son las estructuras más adecuadas para construirse en las tres rutas, esto tomando en cuenta que la suma de los costos de construcción y de mantenimiento no generan una diferencia tan significativa con respecto a los pavimentos flexibles, además de que la estructura semi-rígida genera una mayor resistencia que permite que no se vea deformada en un periodo muy temprano y también previendo de que en muchas ocasiones los gobiernos locales no tienen una cultura de mantenimiento tan marcada como lo tienen otras instituciones.

6. La ruta La Cecilia se diseñará con un pavimento semi-rígido compuesto por 6,00 cm de capa asfáltica, 20,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y 20,00 cm de sub-base granular, por su parte para las rutas Parque el Silencio e INA comparten los mismos espesores 7,00 cm de capa asfáltica, 20,00 cm de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) y 20,00 cm de sub-base granular.

7. El plan de conservación se elaboró con el fin de establecer una herramienta de ayuda para que la Municipalidad pueda conocer más del comportamiento al cual estaría expuesto cada estructura en la comunidad, pero si no existe el debido compromiso de la institución a cumplir con los mantenimientos rutinarios, preventivos y correctivos expuestos en el plan de conservación el mismo no cumplirá con el fin por el cual fue elaborado.

Recomendaciones

1. Como el TPD fue realizado de manera manual se recomienda hacer estas pruebas con los contadores vehiculares, ya que genera una mejor aproximación de los vehículos de la ruta a intervenir, tomando en cuenta que al final se debe de calibrarlo manualmente.

2. Para el cálculo de la variable tránsito en el programa CR-ME ® lo mejor es usar espectros de carga, ya que estos ayudan de mejor manera a sumar el daño que genera cada una de las cargas por tipo de eje.

3. Cuando se realice la extracción de suelo para su respectivo estudio en laboratorio obtener una cantidad representativa de pruebas que permitan obtener datos con mayor confiabilidad para ejecutar un mejor diseño de las estructuras de pavimento.

4. Con respecto a la mezcla asfáltica, lo mejor es utilizar una mezcla que tenga como tamaño máximo nominal de grano de 19,00 mm porque genera un mejor diseño con mejores características de resistencia y durabilidad en la capa de ruedo del pavimento.

5. Tener una base de datos de los precios de los materiales más comunes para la construcción de los tres tipos de pavimentos, esto permite obtener un promedio de precios de un mismo material y generar un costo más acorde a las necesidades del proyecto.

6. Tomar en cuenta los lineamientos que dicta el Ministerio de Obras Públicas y Transporte en documentos como el CR-2010 y otros acerca de las recomendaciones técnicas de los materiales para la construcción, técnicas constructivas, formas de pago, equipo recomendado según etapa constructiva entre otros.

7. Con respecto a los deterioros más comunes es de suma importancia realizar la consulta a personas con experiencia en este campo, esto con el fin de generar una mejor aproximación de los costos de mantenimiento y de conocer más de los deterioros a los que estará expuesto el pavimento.

8. Tener en cuenta que en los diseños no se tomaron en cuenta los sistemas de drenaje que pueden tener las vías, de no tener los drenajes es imprescindible la construcción de estos para evitar la acumulación de agua o algún otro fluido que pueda resultar en daños a futuro en la estructura de pavimento como para los usuarios, sin un adecuado drenaje la estructura de pavimento esta más propensa a más fallas o deterioros de lo común y además su vida útil se acortara.

9. Una vez hecho la estructura de pavimento la Municipalidad de Turrialba debe de inspeccionar constantemente las vías para evitar cualquier deterioro que ocurra de manera imprevista, esto permitirá obtener una gráfica de rendimiento de cada una de las tres rutas y servirá como base para futuros proyecto de la misma índole.

Apéndices

Apéndice A

Tránsito promedio diario (TPD) por ruta a diseñar.

Apéndice B

Daño relativo e Índice de Thornwaite según los datos de la estación climatológica del CATIE.

Apéndice C

Diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta La Cecilia según la AASHTO-93 para el periodo de diseño de 10 años.

Apéndice D

Costo inicial de construcción de las estructuras de pavimentos de la ruta La Cecilia para el periodo de diseño de 10 años.

Apéndice E

Diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta La Cecilia según la AASHTO-93 para el periodo de diseño de 15 años.

Apéndice F

Costo inicial de construcción de las estructuras de pavimentos de la ruta La Cecilia para el periodo de diseño de 15 años.

Apéndice G

Diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta Parque el Silencio según la AASHTO-93 para el periodo de diseño de 10 años.

Apéndice H

Costo inicial de construcción de las estructuras de pavimentos de la ruta Parque el Silencio para el periodo de diseño de 10 años.

Apéndice I

Diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta Parque el Silencio según la AASHTO-93 para el periodo de diseño de 15 años.

Apéndice J

Costo inicial de construcción de las estructuras de pavimentos de la ruta Parque el Silencio para el periodo de diseño de 15 años.

Apéndice K

Diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta INA según la AASHTO-93 para el periodo de diseño de 10 años.

Apéndice L

Costo inicial de construcción de las estructuras de pavimentos de la ruta INA para el periodo de diseño de 10 años.

Apéndice M

Diseño del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta INA según la AASHTO-93 para el periodo de diseño de 15 años.

Apéndice N

Costo inicial de construcción de las estructuras de pavimentos de la ruta INA para el periodo de diseño de 15 años.

Apéndice O

Detalle de deterioros de pavimentos y formulario de inspección de deterioros de estructuras de pavimento.

Apéndice P

Apartado de fotografías de las rutas

Apéndice A

Datos del conteo vehicular realizado en las tres rutas cantonales de Turrialba, estos datos se dividen por día de contero y también están divididos por tipo de vehículo, además se detalla la cantidad de vehículos por hora de estudio.

APÉNDICE A-1. TPD "LA CECILIA"								
Día 1								
Hora		Tipo de Vehículo						Total
Inicio	Final	Liviano	CL	C2	C3	T3-S2	Buses	
06:00 a.m.	07:00 a.m.	25,00	10,00	3,00	0,00	0,00	0,00	38,00
07:00 a.m.	08:00 a.m.	20,00	7,00	3,00	0,00	0,00	0,00	30,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	14,00	5,00	1,00	1,00	0,00	0,00	21,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	16,00	3,00	1,00	1,00	0,00	0,00	21,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	16,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	27,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	20,00	8,00	2,00	0,00	0,00	0,00	30,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	18,00	6,00	0,00	1,00	0,00	0,00	25,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	20,00	9,00	1,00	0,00	0,00	0,00	30,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	19,00	6,00	2,00	0,00	0,00	0,00	27,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	20,00	8,00	1,00	0,00	0,00	0,00	29,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	25,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,00
Total		240	240,00	85,00	14,00	3,00	0,00	342,00
Día 2								
06:00 a.m.	07:00 a.m.	22,00	8,00	4,00	0,00	0,00	0,00	34,00
07:00 a.m.	08:00 a.m.	21,00	7,00	2,00	0,00	0,00	0,00	30,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	19,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	17,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	18,00	6,00	2,00	0,00	0,00	0,00	26,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	19,00	8,00	2,00	0,00	0,00	0,00	29,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	23,00	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	29,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	20,00	9,00	0,00	1,00	0,00	0,00	30,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	18,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	17,00	7,00	1,00	0,00	0,00	0,00	25,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	26,00	7,00	1,00	0,00	0,00	0,00	34,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	27,00	9,00	2,00	1,00	0,00	0,00	39,00
Total		247,00	85,00	15,00	2,00	0,00	0,00	349,00
Día 3								
06:00 a.m.	07:00 a.m.	24,00	10,00	3,00	0,00	0,00	0,00	37,00

07:00 a.m.	08:00 a.m.	19,00	8,00	3,00	0,00	0,00	0,00	30,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	17,00	7,00	2,00	1,00	0,00	0,00	27,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	18,00	9,00	2,00	0,00	0,00	0,00	29,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	19,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	22,00	8,00	2,00	1,00	0,00	0,00	33,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	25,00	10,00	2,00	0,00	0,00	0,00	37,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	22,00	7,00	0,00	1,00	0,00	0,00	30,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	17,00	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	20,00	8,00	2,00	0,00	0,00	0,00	30,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	15,00	7,00	3,00	0,00	0,00	0,00	25,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	20,00	9,00	2,00	0,00	0,00	0,00	31,00
Total		238,00	99,00	21,00	3,00	0,00	0,00	361,00

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

APÉNDICE A-2. TPD "PARQUE EL SILENCIO"								
Día 1								
Hora		Tipo de Vehículo						Total
Inicio	Final	Liviano	CL	C2	C3	T3-S2	Buses	
06:00 a.m.	07:00 a.m.	23,00	3,00	1,00	2,00	1,00	0,00	30,00
07:00 a.m.	08:00 a.m.	21,00	5,00	2,00	1,00	2,00	0,00	31,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	19,00	6,00	1,00	1,00	1,00	0,00	28,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	11,00	6,00	0,00	0,00	2,00	0,00	19,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	9,00	4,00	0,00	1,00	0,00	0,00	14,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	13,00	7,00	2,00	1,00	0,00	1,00	24,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	11,00	4,00	1,00	1,00	0,00	1,00	18,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	13,00	6,00	2,00	0,00	3,00	0,00	24,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	16,00	8,00	3,00	2,00	0,00	0,00	29,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	21,00	10,00	2,00	1,00	1,00	0,00	35,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	23,00	5,00	2,00	1,00	2,00	0,00	33,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	20,00	3,00	1,00	0,00	0,00	1,00	25,00
Total		200,00	67,00	17,00	11,00	12,00	3,00	310,00
Día 2								
06:00 a.m.	07:00 a.m.	23,00	3,00	5,00	1,00	1,00	0,00	33,00
07:00 a.m.	08:00 a.m.	21,00	8,00	1,00	2,00	0,00	1,00	33,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	21,00	5,00	3,00	1,00	2,00	0,00	32,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	10,00	5,00	1,00	1,00	0,00	0,00	17,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	11,00	6,00	2,00	2,00	2,00	0,00	23,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	14,00	8,00	1,00	0,00	1,00	0,00	24,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	13,00	6,00	0,00	0,00	1,00	0,00	20,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	11,00	4,00	3,00	2,00	0,00	0,00	20,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	18,00	5,00	0,00	2,00	3,00	0,00	28,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	18,00	7,00	1,00	0,00	2,00	0,00	28,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	16,00	9,00	2,00	1,00	2,00	0,00	30,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	22,00	8,00	3,00	0,00	1,00	2,00	36,00
Total		198	23,00	3,00	5,00	1,00	1,00	0,00
Día 3								
06:00 a.m.	07:00 a.m.	21,00	5,00	2,00	0,00	1,00	0,00	29,00

07:00 a.m.	08:00 a.m.	19,00	6,00	1,00	0,00	2,00	2,00	30,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	17,00	8,00	0,00	0,00	2,00	0,00	27,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	12,00	6,00	5,00	2,00	0,00	0,00	25,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	14,00	7,00	6,00	2,00	0,00	0,00	29,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	12,00	5,00	4,00	0,00	0,00	0,00	21,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	13,00	8,00	3,00	2,00	0,00	0,00	26,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	15,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	24,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	13,00	4,00	3,00	3,00	2,00	0,00	25,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	18,00	7,00	6,00	4,00	3,00	0,00	38,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	22,00	9,00	2,00	0,00	0,00	0,00	33,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	25,00	6,00	2,00	1,00	1,00	2,00	37,00
Total		201,00	76,00	36,00	14,00	13,00	4,00	344,00

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

APÉNDICE A-3. TPD "INA "								
Día 1								
Hora		Tipo de Vehículo						Total
Inicio	Final	Liviano	CL	C2	C3	T3-S2	Buses	
06:00 a.m.	07:00 a.m.	30,00	4,00	1,00	3,00	1,00	2,00	41,00
07:00 a.m.	08:00 a.m.	25,00	5,00	3,00	2,00	0,00	2,00	37,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	23,00	6,00	2,00	4,00	0,00	1,00	36,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	19,00	4,00	3,00	5,00	1,00	1,00	33,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	22,00	5,00	3,00	5,00	0,00	1,00	36,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	20,00	4,00	4,00	2,00	0,00	1,00	31,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	22,00	4,00	2,00	1,00	0,00	2,00	31,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	23,00	5,00	2,00	0,00	0,00	2,00	32,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	23,00	7,00	1,00	1,00	0,00	2,00	34,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	31,00	5,00	3,00	1,00	0,00	2,00	42,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	27,00	5,00	2,00	0,00	0,00	1,00	35,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	32,00	4,00	2,00	0,00	0,00	1,00	39,00
Total		297,00	58,00	28,00	24,00	2,00	18,00	427,00
Día 2								
06:00 a.m.	07:00 a.m.	25,00	5,00	2,00	5,00	0,00	2,00	39,00
07:00 a.m.	08:00 a.m.	22,00	2,00	2,00	5,00	1,00	2,00	34,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	23,00	6,00	4,00	2,00	1,00	1,00	37,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	20,00	4,00	3,00	3,00	0,00	1,00	31,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	17,00	5,00	3,00	4,00	0,00	1,00	30,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	19,00	4,00	1,00	0,00	0,00	1,00	25,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	21,00	6,00	2,00	0,00	0,00	1,00	30,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	20,00	4,00	3,00	2,00	1,00	1,00	31,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	23,00	5,00	1,00	2,00	0,00	2,00	33,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	22,00	3,00	3,00	0,00	0,00	2,00	30,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	25,00	4,00	2,00	2,00	0,00	1,00	34,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	36,00	6,00	3,00	3,00	1,00	2,00	51,00
Total		273,00	54,00	29,00	28,00	4,00	17,00	405,00
Día 3								
06:00 a.m.	07:00 a.m.	26,00	7,00	3,00	5,00	0,00	2,00	43,00

07:00 a.m.	08:00 a.m.	24,00	6,00	2,00	5,00	1,00	2,00	40,00
08:00 a.m.	09:00 a.m.	26,00	6,00	2,00	2,00	1,00	1,00	38,00
09:00 a.m.	10:00 a.m.	20,00	5,00	3,00	3,00	0,00	1,00	32,00
10:00 a.m.	11:00 a.m.	18,00	4,00	5,00	4,00	0,00	1,00	32,00
11:00 a.m.	12:00 p.m.	17,00	5,00	3,00	0,00	0,00	1,00	26,00
12:00 p.m.	01:00 p.m.	18,00	6,00	3,00	0,00	0,00	1,00	28,00
01:00 p.m.	02:00 p.m.	16,00	5,00	4,00	2,00	1,00	1,00	29,00
02:00 p.m.	03:00 p.m.	18,00	6,00	4,00	3,00	0,00	2,00	33,00
03:00 p.m.	04:00 p.m.	21,00	7,00	5,00	1,00	0,00	2,00	36,00
04:00 p.m.	05:00 p.m.	24,00	6,00	3,00	2,00	0,00	1,00	36,00
05:00 p.m.	06:00 p.m.	31,00	5,00	5,00	3,00	1,00	1,00	46,00
Total		259,00	68,00	42,00	30,00	4,00	16,00	419,00

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice B

A continuación, se detallan los datos del daño relativo mensual por ruta según los datos meteorológicos de la estación CATIE, así como los resultados del índice de Thornwaite para el uso del programa CR-ME ®.

APÉNDICE B-1. DAÑO RELATIVO "LA CECILIA"			
Mes	CBR	MR	ur
Enero	7,14	10710,00	0,053
Febrero	5,95	8925,00	0,081
Marzo	7,14	10710,00	0,053
Abril	7,14	10710,00	0,053
Mayo	7,14	10710,00	0,053
Junio	5,95	8925,00	0,081
Julio	5,95	8925,00	0,081
Agosto	7,14	10710,00	0,053
Septiembre	7,14	10710,00	0,053
Octubre	5,95	8925,00	0,081
Noviembre	5,95	8925,00	0,081
Diciembre	7,14	10710,00	0,053
Σ			0,773
Promedio			0,064

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE B-2. DAÑO RELATIVO "PARQUE EL SILENCIO"			
Mes	CBR	MR	ur
Enero	6,82	10224,00	0,059
Febrero	5,68	8520,00	0,090
Marzo	6,82	10224,00	0,059
Abril	6,82	10224,00	0,059
Mayo	6,82	10224,00	0,059
Junio	5,68	8520,00	0,090
Julio	5,68	8520,00	0,090
Agosto	6,82	10224,00	0,059
Septiembre	6,82	10224,00	0,059
Octubre	5,68	8520,00	0,090
Noviembre	5,68	8520,00	0,090

Diciembre	6,82	10224,00	0,059
Σ			0,861
Promedio			0,072

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE B-3. DAÑO RELATIVO "INA"			
Mes	CBR	MR	ur
Enero	9,42	14130,00	0,028
Febrero	7,85	11775,00	0,042
Marzo	9,42	14130,00	0,028
Abril	9,42	14130,00	0,028
Mayo	9,42	14130,00	0,028
Junio	7,85	11775,00	0,042
Julio	7,85	11775,00	0,042
Agosto	9,42	14130,00	0,028
Septiembre	9,42	14130,00	0,028
Octubre	7,85	11775,00	0,042
Noviembre	7,85	11775,00	0,042
Diciembre	9,42	14130,00	0,028
Σ			0,406
Promedio			0,034

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE B-4. ÍNDICE DE THORNWAITE							
Mes	I	EPT	EPTc	Ai	Ri	DFi	TMI
Enero	10,11	89,72	89,72	0,00	15,78	0,00	17,59
Febrero	9,59	80,78	80,78	100,00	223,02	0,00	276,06
Marzo	10,72	100,53	100,53	28,47	0,00	-43,05	-25,70
Abril	11,09	107,54	107,54	0,00	0,00	-75,84	-42,31
Mayo	11,68	119,00	119,00	60,10	20,20	0,00	16,97
Junio	11,16	108,85	108,85	100,00	159,05	0,00	146,12
Julio	10,72	100,53	100,53	100,00	117,07	0,00	116,46
Agosto	10,99	105,60	105,60	100,00	76,20	0,00	72,17
Septiembre	10,95	104,95	104,95	100,00	10,85	0,00	10,34
Octubre	11,09	107,54	107,54	100,00	200,66	0,00	186,59
Noviembre	10,51	96,83	96,83	100,00	252,87	0,00	261,13
Diciembre	10,38	94,42	94,42	100,00	93,88	0,00	99,42
hi anual	128,98		Enero	100,00			
a	2,97						

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice C

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta La Cecilia según la metodología AASHTO-93 para el periodo de diseño de 10 años.

APÉNDICE C-1. DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93 "LA CECILIA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base Granular	28000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9750,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	50714,66
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,20
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,20
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base granular "a ₂ "	0,133
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	1,039
Número estructural base granular "SN ₂ "	1,264
Número estructural sub-base "SN ₃ "	1,655

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	2,36	5,99	6,00	1,04	1,04
Base Granular	1,67	4,25	15,00	0,22	0,79
Sub-base Granular	-1,35	-3,43	15,00	-0,17	0,76
Total			36,00	1,09	2,58
				SN Total > SN Requerido	Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,705	0,000	2,500	5,000	6,861	-2,1554	No cumple
2	4,705	0,000	1,250	2,500	5,103	-0,3976	No cumple
3	4,705	0,000	0,625	1,250	3,784	0,9209	No cumple
4	4,705	0,625	0,938	1,250	4,498	0,2074	No cumple

5	4,705	0,938	1,094	1,250	4,812	-0,1066	No cumple
6	4,705	0,938	1,016	1,094	4,658	0,0473	No cumple
7	4,705	1,016	1,055	1,094	4,736	-0,0304	No cumple
8	4,705	1,016	1,035	1,055	4,697	0,0083	No cumple
9	4,705	1,035	1,045	1,055	4,716	-0,0111	No cumple
10	4,705	1,035	1,040	1,045	4,707	-0,0014	No cumple
11	4,705	1,035	1,038	1,040	4,702	0,0034	No cumple
12	4,705	1,038	1,039	1,040	4,704	0,0010	No cumple
13	4,705	1,039	1,039	1,040	4,705	-0,0002	Cumple
14	4,705	1,039	1,039	1,039	4,705	0,0004	Cumple
15	4,705	1,039	1,039	1,039	4,705	0,0001	Cumple

Número Estructural de la base granular (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	4,705	0,000	2,500	5,000	6,437	-1,7324	No cumple
2	4,705	0,000	1,250	2,500	4,680	0,0255	No cumple
3	4,705	1,250	1,875	2,500	5,663	-0,9584	No cumple
4	4,705	1,250	1,563	1,875	5,203	-0,4983	No cumple
5	4,705	1,250	1,406	1,563	4,950	-0,2453	No cumple
6	4,705	1,250	1,328	1,406	4,817	-0,1123	No cumple
7	4,705	1,250	1,289	1,328	4,749	-0,0440	No cumple
8	4,705	1,250	1,270	1,289	4,715	-0,0094	No cumple
9	4,705	1,250	1,260	1,270	4,697	0,0080	No cumple
10	4,705	1,260	1,265	1,270	4,706	-0,0007	Cumple
11	4,705	1,260	1,262	1,265	4,702	0,0036	No cumple
12	4,705	1,262	1,263	1,265	4,704	0,0014	No cumple
13	4,705	1,263	1,264	1,265	4,705	0,0004	Cumple
14	4,705	1,264	1,264	1,265	4,705	-0,0002	Cumple
15	4,705	1,264	1,264	1,264	4,705	0,0001	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	4,705	0,000	2,500	5,000	5,798	-1,0925	No cumple
2	4,705	0,000	1,250	2,500	4,040	0,6654	No cumple
3	4,705	1,250	1,875	2,500	5,024	-0,3185	No cumple
4	4,705	1,250	1,563	1,875	4,564	0,1416	No cumple
5	4,705	1,563	1,719	1,875	4,801	-0,0955	No cumple
6	4,705	1,563	1,641	1,719	4,684	0,0211	No cumple
7	4,705	1,641	1,680	1,719	4,743	-0,0377	No cumple
8	4,705	1,641	1,660	1,680	4,714	-0,0084	No cumple
9	4,705	1,641	1,650	1,660	4,699	0,0064	No cumple
10	4,705	1,650	1,655	1,660	4,706	-0,0010	No cumple
11	4,705	1,650	1,653	1,655	4,702	0,0027	No cumple
12	4,705	1,653	1,654	1,655	4,704	0,0008	Cumple

13	4,705	1,654	1,655	1,655	4,705	-0,0001	Cumple
14	4,705	1,654	1,654	1,655	4,705	0,0004	Cumple
15	4,705	1,654	1,655	1,655	4,705	0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE C-2. DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93 "LA CECILIA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base estabilizada con cemento hidráulico	615000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9750,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a1"	0,441
Coeficiente estructural base est. cemento hidráulico "a2"	0,158
Coeficiente estructural sub-base "a3"	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m2"	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m3"	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	50714,66
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,30
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,30
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	0,001
Número estructural base est. cemento hidráulico "SN ₂ "	1,264
Número estructural sub-base "SN ₃ "	1,653

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	0,002	0,004	6,00	0,001	1,04
Base est. con cemento hidráulico	1,40	3,57	20,00	0,22	1,24
Sub-base Granular	4,94	12,56	20,00	0,63	1,01
Total			46,00	0,86	3,29
				SN Total > SN Requerido	Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,705	0,000	2,500	5,000	9,983	-5,2776	No cumple
2	4,705	0,000	1,250	2,500	8,217	-3,5115	No cumple
3	4,705	0,000	0,625	1,250	6,897	-2,1921	No cumple
4	4,705	0,000	0,313	0,625	6,030	-1,3244	No cumple
5	4,705	0,000	0,156	0,313	5,514	-0,8093	No cumple
6	4,705	0,000	0,078	0,156	5,230	-0,5249	No cumple
7	4,705	0,000	0,039	0,078	5,080	-0,3749	No cumple
8	4,705	0,000	0,020	0,039	5,003	-0,2978	No cumple
9	4,705	0,000	0,010	0,020	4,964	-0,2587	No cumple
10	4,705	0,000	0,005	0,010	4,721	-0,0162	No cumple
11	4,705	0,000	0,002	0,005	4,711	-0,0063	No cumple
12	4,705	0,000	0,001	0,002	4,706	-0,0014	No cumple

13	4,705	0,000	0,001	0,001	4,704	0,0011	No cumple
14	4,705	0,001	0,001	0,001	4,705	-0,0001	Cumple
15	4,705	0,001	0,001	0,001	4,705	0,0005	Cumple

Número Estructural de la base estabilizada con cemento (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	4,705	0,000	2,500	5,000	6,447	-1,7418	No cumple
2	4,705	0,000	1,250	2,500	4,681	0,0243	No cumple
3	4,705	1,250	1,875	2,500	5,667	-0,9622	No cumple
4	4,705	1,250	1,563	1,875	5,206	-0,5005	No cumple
5	4,705	1,250	1,406	1,563	4,952	-0,2469	No cumple
6	4,705	1,250	1,328	1,406	4,819	-0,1137	No cumple
7	4,705	1,250	1,289	1,328	4,750	-0,0453	No cumple
8	4,705	1,250	1,270	1,289	4,716	-0,0106	No cumple
9	4,705	1,250	1,260	1,270	4,698	0,0068	No cumple
10	4,705	1,260	1,265	1,270	4,707	-0,0019	No cumple
11	4,705	1,260	1,262	1,265	4,703	0,0024	No cumple
12	4,705	1,262	1,263	1,265	4,705	0,0002	Cumple
13	4,705	1,263	1,264	1,265	4,706	-0,0008	Cumple
14	4,705	1,263	1,264	1,264	4,705	-0,0003	Cumple
15	4,705	1,263	1,264	1,264	4,705	0,0000	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	4,705	0,000	2,500	5,000	5,807	-1,1019	No cumple
2	4,705	0,000	1,250	2,500	4,041	0,6642	No cumple
3	4,705	1,250	1,875	2,500	5,027	-0,3224	No cumple
4	4,705	1,250	1,563	1,875	4,566	0,1394	No cumple
5	4,705	1,563	1,719	1,875	4,804	-0,0985	No cumple
6	4,705	1,563	1,641	1,719	4,687	0,0186	No cumple
7	4,705	1,641	1,680	1,719	4,746	-0,0404	No cumple
8	4,705	1,641	1,660	1,680	4,716	-0,0110	No cumple
9	4,705	1,641	1,650	1,660	4,701	0,0037	No cumple
10	4,705	1,650	1,655	1,660	4,709	-0,0037	No cumple
11	4,705	1,650	1,653	1,655	4,705	0,0000	Cumple
12	4,705	1,653	1,654	1,655	4,707	-0,0018	No cumple
13	4,705	1,653	1,653	1,654	4,706	-0,0009	Cumple
14	4,705	1,653	1,653	1,653	4,706	-0,0004	Cumple
15	4,705	1,653	1,653	1,653	4,705	-0,0002	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE C-3. DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93 "LA CECILIA"

a. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	75693,52
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,35
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,50
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,50
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

b. Propiedades del concreto hidráulico	
f'c 28 días (kg/cm ²)	255,00
f'c 28 días (psi)	3626,94
Módulo Resiliente "MR" (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura "Sc"(psi)	640,00

c. Coeficientes de drenaje (Cd)	
Calidad de drenaje	Bueno
Tiempo de exposición (%)	30,00%
Coeficiente de drenaje "Cd"	1,00

d. Coeficiente de transferencia de carga (J)	
Tipo de espaldón	Asfalto
Dovelas	Si
Tipo de pavimento rígido	JPCP
Coeficiente de transferencia de carga "J"	3,20

e. Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto "h" (in)	6,00
Espesor de base supuesto "h" (in)	6,00
MR sub-rasante (psi)	9750,00
MR Base est. cemento hidráulico (psi)	615000,00
k compuesto de la sub-rasante "kc" (pci)	839,30
Estrato rígido	No
Profundidad del estrato rígido (in)	0,00
k sub-rasante corregido "kcr" (pci)	839,30
Daño relativo "ur"	6,58
k sub-rasante efectivo "ke" (pci)	860,00
Factor de pérdida de soporte "LS"	1,00
k sub-rasante efectivo corregido por el factor LS "k" (pci)	215,00

Espesor de losa de concreto hidráulico (D)							
Iteración	log W ₁₈ Total	D Inicial	D Promedio	D Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,879	0,000	2,500	5,000	4,865	0,0143	No cumple
2	4,879	2,500	3,750	5,000	5,163	-0,2839	No cumple
3	4,879	2,500	3,125	3,750	4,914	-0,0350	No cumple
4	4,879	2,500	2,813	3,125	4,839	0,0405	No cumple
5	4,879	2,813	2,969	3,125	4,869	0,0103	No cumple
6	4,879	2,969	3,047	3,125	4,890	-0,0109	No cumple
7	4,879	2,969	3,008	3,047	4,879	0,0001	Cumple
8	4,879	3,008	3,027	3,047	4,884	-0,0053	No cumple
9	4,879	3,008	3,018	3,027	4,882	-0,0026	No cumple
10	4,879	3,008	3,013	3,018	4,880	-0,0012	No cumple
11	4,879	3,008	3,010	3,013	4,880	-0,0006	Cumple
12	4,879	3,008	3,009	3,010	4,879	-0,0002	Cumple
13	4,879	3,008	3,008	3,009	4,879	-0,0001	Cumple
14	4,879	3,008	3,008	3,008	4,879	0,0000	Cumple
15	4,879	3,008	3,008	3,008	4,879	0,0000	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE C-4. CÁLCULO DE DOVELAS "LA CECILIA"

a. Parámetros de diseño			
Varilla	6	Ancho de la losa (cm)	300,00
Grado	60	Recubrimiento (cm)	15,00
d (in)	0,75	Separación (cm)	30,00
1/8 espesor de losa	Si	Cantidad	10,00
Largo dovela (in)	14	Es (psi)	29000000,00
f'c (psi)	3626,94	kd (pci)	300000,00
MR (psi)	3432773,36	z (in)	0,25
k (pci)	215,00	P máx. (lb)	18000,00
μ	0,15	Separación llantas (cm)	180,00
h (in)	6,00	P por llanta (lb)	4500,00

Rigidez relativa "I" (in)	23,29
1.8 I	41,91
Inercia "I" (in ⁴)	0,02
β (in)	0,59
σ_b (psi)	3318,67
fb (psi)	3929,19
fb>rb	Cumple

Dovela	Distancia (in)	Rc	P1	Dovela	Distancia (in)	Rc	P2
1	0,00	1,00	1948,67	7	0,00	1,00	1243,60
2	11,81	0,72	1399,56	8	11,81	0,72	893,17
3	23,62	0,44	850,44	9	23,62	0,44	542,73
4	35,43	0,15	301,33	10	35,43	0,15	192,30
	ND	2,31		6	11,81	0,72	893,17
				5	23,62	0,44	542,73
				4	35,43	0,15	192,30
					ND	3,62	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE C-5. CÁLCULO DE BARRAS DE AMARRE "LA CECILIA"

Acero requerido	
Yc (pcf)	0,087
h (in)	6,00
L' (in)	118,11
fa	1,5
fs	27000,00
As (in ² /in)	0,0034
As (in ² /ft)	0,0410

As prop > As req
Cumple

Acero propuesto	
Varilla	4
Grado	40
d (in)	0,50
Área (in ²)	0,20
Separación (cm)	60,00
Largo de losa (cm)	320,04
Cantidad	6,00
Largo barra (in)	22,29
As (in ² /ft)	0,100

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice D

Seguidamente, se detalla el costo inicial del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de ruta La Cecilia por actividad a desarrollar para su construcción para el periodo de diseño de 10 años.

APÉNDICE D- 1. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE "LA CECILIA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		2254,32 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	45,09	₡ 1.176,18	₡ 53.029,54
Ayudante de Operario	45,09	₡ 1.154,92	₡ 52.070,96
Peón	78,90	₡ 1.062,06	₡ 83.797,97
Maestro de obras	45,09	₡ 1.387,27	₡ 62.547,01
Ingeniero	13,53	₡ 3.402,83	₡ 46.026,38
Subtotal Personal			₡ 297.471,86
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 446.207,79
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/HH	Monto total
Excavadora	146,53	₡ 32.000,00	₡ 4.688.985,6
Motoniveladora	45,09	₡ 37.000,00	₡ 1.668.196,80
Vagoneta	338,15	₡ 23.000,00	₡ 7.777.404,00
Compactadora Vibratoria	45,09	₡ 31.000,00	₡ 1.397.678,40
Subtotal Equipo			₡ 15.532.264,80
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	15.978.472,59
Costo Unitario	-	₡	7.087,93
Imprevistos	5,00%	₡	354,40
Gastos Administrativos	5,00%	₡	354,40
Utilidad	20,00%	₡	1.417,59
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD		₡	20.772.014,36

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)		1127,16 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	1127,16	₡ 8.500,00	₡ 9.580.860,00
Subtotal Materiales			₡ 9.580.860,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	33,81	₡ 1.176,18	₡ 39.772,16
Ayudante de Operario	33,81	₡ 1.154,92	₡ 39.053,22
Peón	56,36	₡ 1.062,06	₡ 59.855,69
Maestro de obras	33,81	₡ 1.387,27	₡ 46.910,26
Ingeniero	11,27	₡ 3.402,83	₡ 38.355,32
Subtotal Personal			₡ 223.946,64
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 335.919,96
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	39,45	₡ 23.000,00	₡ 907.363,80
Motoniveladora	22,54	₡ 37.000,00	₡ 834.098,40
Tanque de agua	22,54	₡ 20.000,00	₡ 450.864,00
Compactadora Vibratoria	28,18	₡ 31.000,00	₡ 873.549,00
Subtotal Equipo			₡ 3.065.875,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 12.982.655,16	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 16.877.451,71	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)		1127,2 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	1127,16	₡ 8.500,00	₡ 9.580.860,00
Subtotal Materiales			₡ 9.580.860,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	33,81	₡ 1.176,18	₡ 39.772,16
Ayudante de Operario	33,81	₡ 1.154,92	₡ 39.053,22
Peón	56,36	₡ 1.062,06	₡ 59.855,69
Maestro de obras	33,81	₡ 1.387,27	₡ 46.910,26

Ingeniero	11,27	₡ 3.402,83	₡ 38.355,32
Subtotal Personal			₡ 223.946,64
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 335.919,96
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	39,45	₡ 23.000,00	₡ 907.363,80
Motoniveladora	22,54	₡ 37.000,00	₡ 834.098,40
Tanque de agua	22,54	₡ 20.000,00	₡ 450.864,00
Compactadora Vibratoria	28,18	₡ 31.000,00	₡ 873.549,00
Subtotal Equipo			₡ 3.065.875,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 12.982.655,16	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	14.973,43
TOTAL ACTIVIDAD		₡	16.877.451,71

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		6762,96 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	6762,96	₡ 200,00	₡ 1.352.592,00
Subtotal Materiales			₡ 1.352.592,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	20,29	₡ 1.176,18	₡ 23.863,29
Ayudante de Operario	20,29	₡ 1.154,92	₡ 23.431,93
Peón	33,81	₡ 1.062,06	₡ 35.913,41
Maestro de obras	20,29	₡ 1.387,27	₡ 28.146,15
Ingeniero	10,14	₡ 3.402,83	₡ 34.519,78
Subtotal Personal			₡ 145.874,58
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 218.811,87
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	10,14	₡ 14.000,00	₡ 142.022,16
Distribuidor de asfalto	20,29	₡ 20.000,00	₡ 405.777,60
Subtotal Equipo			₡ 547.799,76
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 2.119.203,63	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	
Utilidad	20,00%	₡ 62,67	

TOTAL COSTO UNITARIO	₡	407,36
TOTAL ACTIVIDAD	₡	2.754.964,72

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		1108,67 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	1108,67	₡ 50.000,00	₡ 55.433.500,00
Subtotal Materiales			₡ 55.433.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	11,09	₡ 1.176,18	₡ 13.039,91
Ayudante de Operario	11,09	₡ 1.154,92	₡ 12.804,20
Peón	24,39	₡ 1.062,06	₡ 25.904,48
Maestro de obras	11,09	₡ 1.387,27	₡ 15.380,25
Ingeniero	4,99	₡ 3.402,83	₡ 16.976,76
Subtotal Personal			₡ 84.105,59
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 126.158,39
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto
Vagoneta	8,87	₡ 23.000,00	₡ 203.995,28
Pavimentadora	8,87	₡ 33.000,00	₡ 292.688,88
Compactadora Estática	8,87	₡ 15.000,00	₡ 133.040,40
Compactadora Vibratoria	7,76	₡ 31.000,00	₡ 240.581,39
Compactadora Neumáticos	4,99	₡ 22.000,00	₡ 109.758,33
Subtotal Equipo			₡ 980.064,28
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 56.539.722,67	
Costo Unitario	-	₡ 50.997,79	
Imprevistos	5,00%	₡ 2.549,89	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 2.549,89	
Utilidad	20,00%	₡ 10.199,56	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₡	73.501.639,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

APÉNDICE D- 2. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO "LA CECILIA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		3005,76 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -

MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	60,12	₡ 1.176,18	₡ 70.706,06
Ayudante de Operario	60,12	₡ 1.154,92	₡ 69.427,95
Peón	105,20	₡ 1.062,06	₡ 111.730,62
Maestro de obras	60,12	₡ 1.387,27	₡ 83.396,01
Ingeniero	18,03	₡ 3.402,83	₡ 61.368,51
Subtotal Personal			₡ 396.629,14
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 594.943,71
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Excavadora	195,37	₡ 32.000,00	₡ 6.251.980,80
Motoniveladora	60,12	₡ 37.000,00	₡ 2.224.262,40
Vagoneta	450,86	₡ 23.000,00	₡ 10.369.872,00
Compactadora Vibratoria	60,12	₡ 31.000,00	₡ 1.863.571,20
Subtotal Equipo			₡ 20.709.686,40
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 21.304.630,11	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 9.214,31	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 27.696.019,15	

Actividad	Cantidad		
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	1502,90 m³		
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m³)	1502,90	₡ 8.500,00	₡ 12.774.650,00
Subtotal Materiales			₡ 12.774.650,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	45,09	₡ 1.176,18	₡ 53.030,25
Ayudante de Operario	45,09	₡ 1.154,92	₡ 52.071,65
Peón	75,15	₡ 1.062,06	₡ 79.808,65
Maestro de obras	45,09	₡ 1.387,27	₡ 62.547,84
Ingeniero	15,03	₡ 3.402,83	₡ 51.141,10
Subtotal Personal			₡ 298.599,49
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 447.899,24
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	52,60	₡ 23.000,00	₡ 1.209.834,50
Motoniveladora	30,06	₡ 37.000,00	₡ 1.112.146,00

Tanque de agua	30,06	₡ 20.000,00	₡ 601.160,00
Compactadora Vibratoria	37,57	₡ 31.000,00	₡ 1.164.747,50
Subtotal Equipo			₡ 4.087.888,00
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto	
Total	-	₡	17.310.437,24
Costo Unitario	-	₡	11.518,02
Imprevistos	5,00%	₡	575,90
Gastos Administrativos	5,00%	₡	575,90
Utilidad	20,00%	₡	2.303,60
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	14.973,43
TOTAL ACTIVIDAD		₡	22.503.568,41

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)		1502,90 m³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m³)	1397,70	₡ 8.500,00	₡ 11.880.424,50
Saco de cemento hidráulico 50 kg (und)	2946,00	₡ 6.000,00	₡ 17.676.000,00
Subtotal Materiales			₡ 29.556.424,50
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	45,09	₡ 1.176,18	₡ 53.030,25
Ayudante de Operario	45,09	₡ 1.154,92	₡ 52.071,65
Peón	82,66	₡ 1.062,06	₡ 87.789,51
Maestro de obras	45,09	₡ 1.387,27	₡ 62.547,84
Ingeniero	15,03	₡ 3.402,83	₡ 51.141,10
Subtotal Personal			₡ 306.580,36
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 459.870,54
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	57,11	₡ 23.000,00	₡ 1.313.534,60
Motoniveladora	30,06	₡ 37.000,00	₡ 1.112.146,00
Tanque de agua	30,06	₡ 20.000,00	₡ 601.160,00
Compactadora Vibratoria	37,57	₡ 31.000,00	₡ 1.164.747,50
Back-Hoe	52,60	₡ 14.000,00	₡ 736.421,00
Subtotal Equipo			₡ 4.928.009,10
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	34.944.304,14
Costo Unitario	-	₡	23.251,25
Imprevistos	5,00%	₡	1.162,56
Gastos Administrativos	5,00%	₡	1.162,56
Utilidad	20,00%	₡	4.650,25
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	30.226,63
TOTAL ACTIVIDAD		₡	45.427.595,38

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		6762,96 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	6762,96	₡ 200,00	₡ 1.352.592,00
Subtotal Materiales			₡ 1.352.592,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	20,29	₡ 1.176,18	₡ 23.863,29
Ayudante de Operario	20,29	₡ 1.154,92	₡ 23.431,93
Peón	33,81	₡ 1.062,06	₡ 35.913,41
Maestro de obras	20,29	₡ 1.387,27	₡ 28.146,15
Ingeniero	10,14	₡ 3.402,83	₡ 34.519,78
Subtotal Personal			₡ 145.874,58
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 218.811,87
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	10,14	₡ 14.000,00	₡ 142.022,16
Distribuidor de asfalto	20,29	₡ 20.000,00	₡ 405.777,60
Subtotal Equipo			₡ 547.799,76
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
Total	Porcentaje	Monto total	
	-	₡ 2.119.203,63	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	
Utilidad	20,00%	₡ 62,67	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 407,36	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 2.754.964,72	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		1108,67 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	1108,67	₡ 50.000,00	₡ 55.433.500,00
Subtotal Materiales			₡ 55.433.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	11,09	₡ 1.176,18	₡ 13.039,91
Ayudante de Operario	11,09	₡ 1.154,92	₡ 12.804,20
Peón	24,39	₡ 1.062,06	₡ 25.904,48
Maestro de obras	11,09	₡ 1.387,27	₡ 15.380,25
Ingeniero	4,99	₡ 3.402,83	₡ 16.976,76
Subtotal Personal			₡ 84.105,59
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 126.158,39
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	8,87	₡ 23.000,00	₡ 203.995,28

Pavimentadora	8,87	₺ 33.000,00	₺ 292.688,88
Compactadora Estática	8,87	₺ 15.000,00	₺ 133.040,40
Compactadora Vibratoria	7,76	₺ 31.000,00	₺ 240.581,39
Compactadora Neumáticos	4,99	₺ 22.000,00	₺ 109.758,33
Subtotal Equipo			₺ 980.064,28
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₺	56.539.722,67
Costo Unitario	-	₺	50.997,79
Imprevistos	5,00%	₺	2.549,89
Gastos Administrativos	5,00%	₺	2.549,89
Utilidad	20,00%	₺	10.199,56
TOTAL COSTO UNITARIO		₺	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₺	73.501.639,47

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE D- 3. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO RÍGIDO "LA CECILIA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		1127,16 m³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₺ -
Subtotal Materiales			₺ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	22,54	₺ 1.176,18	₺ 26.514,77
Ayudante de Operario	22,54	₺ 1.154,92	₺ 26.035,48
Peón	39,45	₺ 1.062,06	₺ 41.898,98
Maestro de obras	22,54	₺ 1.387,27	₺ 31.273,51
Ingeniero	6,76	₺ 3.402,83	₺ 23.013,19
Subtotal Personal			₺ 148.735,93
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₺ 223.103,89
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Excavadora	73,27	₺ 32.000,00	₺ 2.344.492,80
Motoniveladora	22,54	₺ 37.000,00	₺ 834.098,40
Vagoneta	169,07	₺ 23.000,00	₺ 3.888.702,00
Compactadora Vibratoria	22,54	₺ 31.000,00	₺ 698.839,20
Subtotal Equipo			₺ 7.766.132,40
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₺	7.989.236,29
Costo Unitario	-	₺	7.087,93
Imprevistos	5,00%	₺	354,40
Gastos Administrativos	5,00%	₺	354,40
Utilidad	20,00%	₺	1.417,59

TOTAL COSTO UNITARIO	₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD	₡	10.386.007,18

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)		1127,16 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	1048,26	₡ 8.500,00	₡ 8.910.199,80
Saco de cemento hidráulico 50 kg (und)	2210,00	₡ 6.000,00	₡ 13.260.000,00
Subtotal Materiales			₡ 22.170.199,80
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	33,81	₡ 1.176,18	₡ 39.772,16
Ayudante de Operario	33,81	₡ 1.154,92	₡ 39.053,22
Peón	61,99	₡ 1.062,06	₡ 65.841,26
Maestro de obras	33,81	₡ 1.387,27	₡ 46.910,26
Ingeniero	11,27	₡ 3.402,83	₡ 38.355,32
Subtotal Personal			₡ 229.932,21
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 344.898,31
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	42,83	₡ 23.000,00	₡ 985.137,84
Motoniveladora	22,54	₡ 37.000,00	₡ 834.098,40
Tanque de agua	22,54	₡ 20.000,00	₡ 450.864,00
Compactadora Vibratoria	28,18	₡ 31.000,00	₡ 873.549,00
Back-Hoe	39,45	₡ 14.000,00	₡ 552.308,40
Subtotal Equipo			₡ 3.695.957,64
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 26.211.055,75	
Costo Unitario	-	₡ 23.254,07	
Imprevistos	5,00%	₡ 1.162,70	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 1.162,70	
Utilidad	20,00%	₡ 4.650,81	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	30.230,29
TOTAL ACTIVIDAD		₡	34.074.372,48

Actividad		Cantidad	
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)		7514,40 m ²	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Concreto Hidráulico (m ³)	1127,16	₡120.000,00	₡ 135.259.200,00
Varilla lisa # 6 de 6 m (und) G 60	457,00	₡ 7.800,00	₡ 3.564.600,00
Varilla corrugada # 4 de 6 m (und) G 40	439,00	₡ 2.540,00	₡ 1.115.060,00
Backer-road para juntas (und)	12,00	₡ 23.745,00	₡ 284.940,00

Sellador para juntas (cubeta)	19,00	₡107.708,00	₡ 2.046.452,00
Subtotal Materiales			₡ 142.270.252,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	60,12	₡ 1.176,18	₡ 70.706,06
Ayudante de Operario	60,12	₡ 1.154,92	₡ 69.427,95
Peón	90,17	₡ 1.062,06	₡ 95.769,10
Maestro de obras	60,12	₡ 1.387,27	₡ 83.396,01
Ingeniero	37,57	₡ 3.402,83	₡ 127.851,05
Subtotal Personal			₡ 447.150,17
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 670.725,26
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Bomba estacionaria	75,14	₡ 12.000,00	₡ 901.728,00
Sierra de concreto	6,76	₡ 7.300,00	₡ 49.369,61
Subtotal Equipo			₡ 951.097,61
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 143.892.074,87	
Costo Unitario	-	₡ 19.148,84	
Imprevistos	5,00%	₡ 957,44	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 957,44	
Utilidad	20,00%	₡ 3.829,77	
TOTAL COSTO UNITARIO			₡ 24.893,50
TOTAL ACTIVIDAD			₡ 187.059.697,33

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice E

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta La Cecilia según la metodología AASHTO-93 para el periodo de diseño de 15 años.

APÉNDICE E-1. DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93 "LA CECILIA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base Granular	28000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9750,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	84581,08
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,20
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,20
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base granular "a ₂ "	0,133
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	1,154
Número estructural base granular "SN ₂ "	1,392
Número estructural sub-base "SN ₃ "	1,806

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	2,62	6,65	7,00	1,15	1,22
Base Granular	1,33	3,38	15,00	0,18	0,79
Sub-base Granular	-1,52	-3,86	15,00	-0,19	0,76
Total			37,00	1,14	2,76
				SN Total > SN Requerido	Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,927	0,000	2,500	5,000	6,861	-1,9332	No cumple
2	4,927	0,000	1,250	2,500	5,103	-0,1754	No cumple
3	4,927	0,000	0,625	1,250	3,784	1,1431	No cumple
4	4,927	0,625	0,938	1,250	4,498	0,4296	No cumple

5	4,927	0,938	1,094	1,250	4,812	0,1155	No cumple
6	4,927	1,094	1,172	1,250	4,960	-0,0326	No cumple
7	4,927	1,094	1,133	1,172	4,887	0,0407	No cumple
8	4,927	1,133	1,152	1,172	4,923	0,0039	No cumple
9	4,927	1,152	1,162	1,172	4,942	-0,0144	No cumple
10	4,927	1,152	1,157	1,162	4,933	-0,0053	No cumple
11	4,927	1,152	1,155	1,157	4,928	-0,0007	Cumple
12	4,927	1,152	1,154	1,155	4,926	0,0016	No cumple
13	4,927	1,154	1,154	1,155	4,927	0,0004	Cumple
14	4,927	1,154	1,154	1,155	4,927	-0,0001	Cumple
15	4,927	1,154	1,154	1,154	4,927	0,0001	Cumple

Número Estructural de la base granular (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	4,927	0,000	2,500	5,000	6,437	-1,5102	No cumple
2	4,927	0,000	1,250	2,500	4,680	0,2476	No cumple
3	4,927	1,250	1,875	2,500	5,663	-0,7362	No cumple
4	4,927	1,250	1,563	1,875	5,203	-0,2762	No cumple
5	4,927	1,250	1,406	1,563	4,950	-0,0232	No cumple
6	4,927	1,250	1,328	1,406	4,817	0,1099	No cumple
7	4,927	1,328	1,367	1,406	4,884	0,0428	No cumple
8	4,927	1,367	1,387	1,406	4,918	0,0097	No cumple
9	4,927	1,387	1,396	1,406	4,934	-0,0068	No cumple
10	4,927	1,387	1,392	1,396	4,926	0,0014	No cumple
11	4,927	1,392	1,394	1,396	4,930	-0,0027	No cumple
12	4,927	1,392	1,393	1,394	4,928	-0,0006	Cumple
13	4,927	1,392	1,392	1,393	4,927	0,0004	Cumple
14	4,927	1,392	1,393	1,393	4,927	-0,0001	Cumple
15	4,927	1,392	1,392	1,393	4,927	0,0001	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	4,927	0,000	2,500	5,000	5,798	-0,8703	No cumple
2	4,927	0,000	1,250	2,500	4,040	0,8875	No cumple
3	4,927	1,250	1,875	2,500	5,024	-0,0963	No cumple
4	4,927	1,250	1,563	1,875	4,564	0,3637	No cumple
5	4,927	1,563	1,719	1,875	4,801	0,1266	No cumple
6	4,927	1,719	1,797	1,875	4,914	0,0134	No cumple
7	4,927	1,797	1,836	1,875	4,969	-0,0419	No cumple
8	4,927	1,797	1,816	1,836	4,942	-0,0143	No cumple
9	4,927	1,797	1,807	1,816	4,928	-0,0005	Cumple
10	4,927	1,797	1,802	1,807	4,921	0,0065	No cumple
11	4,927	1,802	1,804	1,807	4,924	0,0030	No cumple
12	4,927	1,804	1,805	1,807	4,926	0,0013	No cumple

13	4,927	1,805	1,806	1,807	4,927	0,0004	Cumple
14	4,927	1,806	1,806	1,807	4,927	0,0000	Cumple
15	4,927	1,806	1,806	1,806	4,927	0,0002	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE E-2. DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93 "LA CECILIA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base estabilizada. con cemento hidráulico	615000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9750,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base est. cemento hidráulico "a ₂ "	0,158
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	84581,08
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,30
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,30
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	0,001
Número estructural base est. cemento hidráulico "SN ₂ "	1,391
Número estructural sub-base "SN ₃ "	1,804

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	0,002	0,004	6,00	0,001	1,04
Base es con cemento hidráulico	2,21	5,62	20,00	0,35	1,24
Sub-base Granular	3,77	9,57	20,00	0,48	1,01
Total			46,00	0,83	3,29
SN Total > SN Requerido					Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,927	0,000	2,500	5,000	9,983	-5,0555	No cumple
2	4,927	0,000	1,250	2,500	8,217	-3,2894	No cumple
3	4,927	0,000	0,625	1,250	6,897	-1,9699	No cumple
4	4,927	0,000	0,313	0,625	6,030	-1,1023	No cumple
5	4,927	0,000	0,156	0,313	5,514	-0,5871	No cumple
6	4,927	0,000	0,078	0,156	5,230	-0,3028	No cumple
7	4,927	0,000	0,039	0,078	5,080	-0,1528	No cumple
8	4,927	0,000	0,020	0,039	5,003	-0,0757	No cumple
9	4,927	0,000	0,010	0,020	4,964	-0,0366	No cumple
10	4,927	0,000	0,005	0,010	4,944	-0,0169	No cumple
11	4,927	0,000	0,002	0,005	4,934	-0,0070	No cumple
12	4,927	0,000	0,001	0,002	4,929	-0,0020	No cumple

13	4,927	0,000	0,001	0,001	4,927	0,0005	Cumple
14	4,927	0,001	0,001	0,001	4,928	-0,0008	Cumple
15	4,927	0,001	0,001	0,001	4,927	-0,0002	Cumple

Número Estructural de la base estabilizada con cemento (SN₂)

Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,927	0,000	2,500	5,000	6,447	-1,5197	No cumple
2	4,927	0,000	1,250	2,500	4,681	0,2464	No cumple
3	4,927	1,250	1,875	2,500	5,667	-0,7401	No cumple
4	4,927	1,250	1,563	1,875	5,206	-0,2784	No cumple
5	4,927	1,250	1,406	1,563	4,952	-0,0248	No cumple
6	4,927	1,250	1,328	1,406	4,819	0,1085	No cumple
7	4,927	1,328	1,367	1,406	4,886	0,0413	No cumple
8	4,927	1,367	1,387	1,406	4,919	0,0081	No cumple
9	4,927	1,387	1,396	1,406	4,936	-0,0084	No cumple
10	4,927	1,387	1,392	1,396	4,927	-0,0001	Cumple
11	4,927	1,387	1,389	1,392	4,923	0,0040	No cumple
12	4,927	1,389	1,390	1,392	4,925	0,0019	No cumple
13	4,927	1,390	1,391	1,392	4,926	0,0009	Cumple
14	4,927	1,391	1,391	1,392	4,927	0,0004	Cumple
15	4,927	1,391	1,391	1,392	4,927	0,0001	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)

Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	4,927	0,000	2,500	5,000	5,807	-0,8798	No cumple
2	4,927	0,000	1,250	2,500	4,041	0,8863	No cumple
3	4,927	1,250	1,875	2,500	5,027	-0,1002	No cumple
4	4,927	1,250	1,563	1,875	4,566	0,3615	No cumple
5	4,927	1,563	1,719	1,875	4,804	0,1236	No cumple
6	4,927	1,719	1,797	1,875	4,917	0,0100	No cumple
7	4,927	1,797	1,836	1,875	4,973	-0,0455	No cumple
8	4,927	1,797	1,816	1,836	4,945	-0,0178	No cumple
9	4,927	1,797	1,807	1,816	4,931	-0,0039	No cumple
10	4,927	1,797	1,802	1,807	4,924	0,0030	No cumple
11	4,927	1,802	1,804	1,807	4,928	-0,0004	Cumple
12	4,927	1,802	1,803	1,804	4,926	0,0013	No cumple
13	4,927	1,803	1,804	1,804	4,927	0,0004	Cumple
14	4,927	1,804	1,804	1,804	4,927	0,0000	Cumple
15	4,927	1,804	1,804	1,804	4,927	0,0002	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE E-3. DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93 "LA CECILIA"

a. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	126240,42
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,35
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,50
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,50
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

b. Propiedades del concreto hidráulico	
f'c 28 días (kg/cm ²)	255,00
f'c 28 días (psi)	3626,94
Módulo Resiliente "MR" (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura "Sc"(psi)	640,00

c. Coeficientes de drenaje (Cd)	
Calidad de drenaje	Bueno
Tiempo de exposición (%)	30,00%
Coeficiente de drenaje "Cd"	1,00

d. Coeficiente de transferencia de carga (J)	
Tipo de espaldón	Asfalto
Dovelas	Si
Tipo de pavimento rígido	JPCP
Coeficiente de transferencia de carga "J"	3,20

e. Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto "h" (in)	6,00
Espesor de base supuesto "h" (in)	6,00
MR sub-rasante (psi)	9750,00
MR Base est. cemento hidráulico (psi)	615000,00
k compuesto de la sub-rasante "kc" (pci)	839,30
Estrato rígido	No
Profundidad del estrato rígido (in)	0,00
k sub-rasante corregido "kcr" (pci)	839,30
Daño relativo "ur"	6,58
k sub-rasante efectivo "ke" (pci)	860,00
Factor de pérdida de soporte "LS"	1,00
k sub-rasante efectivo corregido por el factor LS "k" (pci)	215,00

Espesor de losa de concreto hidráulico (D)							
Iteración	log W ₁₈ Total	D Inicial	D Promedio	D Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,101	0,000	2,500	5,000	5,031	0,0699	No cumple
2	5,101	2,500	3,750	5,000	5,220	-0,1189	No cumple
3	5,101	2,500	3,125	3,750	4,998	0,1032	No cumple
4	5,101	3,125	3,438	3,750	5,098	0,0033	No cumple
5	5,101	3,438	3,594	3,750	5,157	-0,0560	No cumple
6	5,101	3,438	3,516	3,594	5,127	-0,0258	No cumple
7	5,101	3,438	3,477	3,516	5,112	-0,0111	No cumple
8	5,101	3,438	3,457	3,477	5,105	-0,0038	No cumple
9	5,101	3,438	3,447	3,457	5,101	-0,0002	Cumple
10	5,101	3,438	3,442	3,447	5,100	0,0015	No cumple
11	5,101	3,442	3,445	3,447	5,101	0,0006	Cumple
12	5,101	3,445	3,446	3,447	5,101	0,0002	Cumple
13	5,101	3,446	3,447	3,447	5,101	0,0000	Cumple
14	5,101	3,446	3,446	3,447	5,101	0,0001	Cumple
15	5,101	3,446	3,447	3,447	5,101	0,0000	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE E-4. CÁLCULO DE DOVELAS "LA CECILIA"

a. Parámetros de diseño			
Varilla	6	Ancho de la losa (cm)	300,00
Grado	60	Recubrimiento (cm)	15,00
d (in)	0,75	Separación (cm)	30,00
1/8 espesor de losa	Si	Cantidad	10,00
Largo dovela (in)	14,00	Es (psi)	29000000,00
f'c (psi)	3626,94	kd (pci)	300000,00
MR (psi)	3432773,36	z (in)	0,25
k (pci)	215,00	P máx. (lb)	18000,00
μ	0,15	Separación llantas (cm)	180,00
h (in)	6,00	P por llanta (lb)	4500,00

Rigidez relativa "I" (in)	23,29
1.8 I	41,91
Inercia "I" (in ⁴)	0,02
β (in)	0,59
σ_b (psi)	3318,67
fb (psi)	3929,19
fb>rb	Cumple

Dovela	Distancia (in)	Rc	P1	Dovela	Distancia (in)	Rc	P2
1	0,00	1,00	1948,67	7	0,00	1,00	1243,60
2	11,81	0,72	1399,56	8	11,81	0,72	893,17
3	23,62	0,44	850,44	9	23,62	0,44	542,73
4	35,43	0,15	301,33	10	35,43	0,15	192,30
	ND	2,31		6	11,81	0,72	893,17
				5	23,62	0,44	542,73
				4	35,43	0,15	192,30
					ND	3,62	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE E-5. CÁLCULO DE BARRAS DE AMARRE "LA CECILIA"

Acero requerido		Acero propuesto	
Yc (pcf)	0,087	Varilla	4
h (in)	6,00	Grado	40
L' (in)	118,11	d (in)	0,50
fa	1,50	Área (in ²)	0,20
fs	27000,00	Separación (cm)	60,00
As (in ² /in)	0,0034	Largo de losa (cm)	320,04
As (in ² /ft)	0,0410	Cantidad	6,00
		Largo barra (in)	22,29
		As (in ² /ft)	0,100
As prop > As req			
Cumple			

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice F

Seguidamente, se detalla el costo inicial del pavimento flexible de ruta La Cecilia por actividad a desarrollar para su construcción para el periodo de diseño de 15 años. El detalle del costo de los

pavimentos semi-rígido y rígidos se encuentran en los apéndices D-2 y D-3 respectivamente, ya que presentan los mismos espesores de capa que los pavimentos del periodo anterior.

APÉNDICE F-1. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE "LA CECILIA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		2254,32 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
			₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	45,09	₡ 1.176,18	₡ 53.029,54
Ayudante de Operario	45,09	₡ 1.154,92	₡ 52.070,96
Peón	78,90	₡ 1.062,06	₡ 83.797,97
Maestro de obras	45,09	₡ 1.387,27	₡ 62.547,01
Ingeniero	13,53	₡ 3.402,83	₡ 46.026,38
Subtotal Personal			₡ 297.471,86
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 446.207,79
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/HH	Monto total
Excavadora	146,53	₡ 32.000,00	₡ 4.688.985,6
Motoniveladora	45,09	₡ 37.000,00	₡ 1.668.196,80
Vagoneta	338,15	₡ 23.000,00	₡ 7.777.404,00
Compactadora Vibratoria	45,09	₡ 31.000,00	₡ 1.397.678,40
Subtotal Equipo			₡ 15.532.264,80
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 15.978.472,59	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 9.214,31	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 20.772.014,36	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)		1127,16 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	1127,16	₡ 8.500,00	₡ 9.580.860,00
Subtotal Materiales			₡ 9.580.860,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	33,81	₡ 1.176,18	₡ 39.772,16
Ayudante de Operario	33,81	₡ 1.154,92	₡ 39.053,22
Peón	56,36	₡ 1.062,06	₡ 59.855,69
Maestro de obras	33,81	₡ 1.387,27	₡ 46.910,26
Ingeniero	11,27	₡ 3.402,83	₡ 38.355,32
Subtotal Personal			₡ 223.946,64
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 335.919,96
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	39,45	₡ 23.000,00	₡ 907.363,80
Motoniveladora	22,54	₡ 37.000,00	₡ 834.098,40
Tanque de agua	22,54	₡ 20.000,00	₡ 450.864,00
Compactadora Vibratoria	28,18	₡ 31.000,00	₡ 873.549,00
Subtotal Equipo			₡ 3.065.875,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 12.982.655,16	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 16.877.451,71	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)		1127,2 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	1127,16	₡ 8.500,00	₡ 9.580.860,00
Subtotal Materiales			₡ 9.580.860,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	33,81	₡ 1.176,18	₡ 39.772,16
Ayudante de Operario	33,81	₡ 1.154,92	₡ 39.053,22
Peón	56,36	₡ 1.062,06	₡ 59.855,69
Maestro de obras	33,81	₡ 1.387,27	₡ 46.910,26

Ingeniero	11,27	₡ 3.402,83	₡ 38.355,32
Subtotal Personal			₡ 223.946,64
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 335.919,96
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	39,45	₡ 23.000,00	₡ 907.363,80
Motoniveladora	22,54	₡ 37.000,00	₡ 834.098,40
Tanque de agua	22,54	₡ 20.000,00	₡ 450.864,00
Compactadora Vibratoria	28,18	₡ 31.000,00	₡ 873.549,00
Subtotal Equipo			₡ 3.065.875,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 12.982.655,16	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	14.973,43
TOTAL ACTIVIDAD		₡	16.877.451,71

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		6762,96 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	6762,96	₡ 200,00	₡ 1.352.592,00
Subtotal Materiales			₡ 1.352.592,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	20,29	₡ 1.176,18	₡ 23.863,29
Ayudante de Operario	20,29	₡ 1.154,92	₡ 23.431,93
Peón	33,81	₡ 1.062,06	₡ 35.913,41
Maestro de obras	20,29	₡ 1.387,27	₡ 28.146,15
Ingeniero	10,14	₡ 3.402,83	₡ 34.519,78
Subtotal Personal			₡ 145.874,58
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 218.811,87
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	10,14	₡ 14.000,00	₡ 142.022,16
Distribuidor de asfalto	20,29	₡ 20.000,00	₡ 405.777,60
Subtotal Equipo			₡ 547.799,76
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 2.119.203,63	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	

Utilidad	20,00%	₡	62,67
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	407,36
TOTAL ACTIVIDAD		₡	2.754.964,72

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		1293,45 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	1293,45	₡ 50.000,00	₡ 64.672.500,00
Subtotal Materiales			₡ 64.672.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	12,93	₡ 1.176,18	₡ 15.213,25
Ayudante de Operario	12,93	₡ 1.154,92	₡ 14.938,25
Peón	28,46	₡ 1.062,06	₡ 30.221,93
Maestro de obras	12,93	₡ 1.387,27	₡ 17.943,64
Ingeniero	5,82	₡ 3.402,83	₡ 19.806,25
Subtotal Personal			₡ 98.123,32
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 147.184,97
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto
Vagoneta	10,35	₡ 23.000,00	₡ 237.994,80
Pavimentadora	10,35	₡ 33.000,00	₡ 341.470,80
Compactadora Estática	10,35	₡ 15.000,00	₡ 155.214,00
Compactadora Vibratoria	9,05	₡ 31.000,00	₡ 280.678,65
Compactadora Neumáticos	5,82	₡ 22.000,00	₡ 128.051,55
Subtotal Equipo			₡ 1.143.409,80
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	65.963.094,77
Costo Unitario	-	₡	50.997,79
Imprevistos	5,00%	₡	2.549,89
Gastos Administrativos	5,00%	₡	2.549,89
Utilidad	20,00%	₡	10.199,56
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₡	85.752.023,21

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice G

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta Parque el Silencio según la metodología AASHTO-93 para el periodo de diseño de 10 años.

APÉNDICE G-1. DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93 "PARQUE EL SILENCIO"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base Granular	28000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9300,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base granular "a ₂ "	0,133
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	216712,62
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,20
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,20
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	1,384
Número estructural base granular "SN ₂ "	1,648
Número estructural sub-base "SN ₃ "	2,149

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido	SN Total
Carpeta Asfáltica	3,14	7,97	8,00	1,38	1,39
Base Granular	1,95	4,95	15,00	0,26	0,79
Sub-base Granular	-0,20	-0,51	15,00	-0,03	0,76
Total			38,00	1,62	2,93
				SN Total > SN Requerido	Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,336	0,000	2,500	5,000	6,861	-1,5246	No cumple
2	5,336	0,000	1,250	2,500	5,103	0,2332	No cumple
3	5,336	1,250	1,875	2,500	6,087	-0,7506	No cumple

4	5,336	1,250	1,563	1,875	5,626	-0,2906	No cumple
5	5,336	1,250	1,406	1,563	5,373	-0,0376	No cumple
6	5,336	1,250	1,328	1,406	5,240	0,0954	No cumple
7	5,336	1,328	1,367	1,406	5,308	0,0284	No cumple
8	5,336	1,367	1,387	1,406	5,341	-0,0048	No cumple
9	5,336	1,367	1,377	1,387	5,324	0,0118	No cumple
10	5,336	1,377	1,382	1,387	5,332	0,0035	No cumple
11	5,336	1,382	1,384	1,387	5,337	-0,0006	Cumple
12	5,336	1,382	1,383	1,384	5,334	0,0014	No cumple
13	5,336	1,383	1,384	1,384	5,335	0,0004	Cumple
14	5,336	1,384	1,384	1,384	5,336	-0,0001	Cumple
15	5,336	1,384	1,384	1,384	5,336	0,0001	Cumple

Número Estructural de la base granular (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,336	0,000	2,500	5,000	6,437	-1,1016	No cumple
2	5,336	0,000	1,250	2,500	4,680	0,6562	No cumple
3	5,336	1,250	1,875	2,500	5,663	-0,3276	No cumple
4	5,336	1,250	1,563	1,875	5,203	0,1325	No cumple
5	5,336	1,563	1,719	1,875	5,441	-0,1047	No cumple
6	5,336	1,563	1,641	1,719	5,324	0,0120	No cumple
7	5,336	1,641	1,680	1,719	5,383	-0,0468	No cumple
8	5,336	1,641	1,660	1,680	5,353	-0,0175	No cumple
9	5,336	1,641	1,650	1,660	5,339	-0,0028	No cumple
10	5,336	1,641	1,646	1,650	5,331	0,0046	No cumple
11	5,336	1,646	1,648	1,650	5,335	0,0009	No cumple
12	5,336	1,648	1,649	1,650	5,337	-0,0009	No cumple
13	5,336	1,648	1,649	1,649	5,336	0,0000	Cumple
14	5,336	1,648	1,648	1,649	5,335	0,0005	Cumple
15	5,336	1,648	1,648	1,649	5,336	0,0002	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,336	0,000	2,500	5,000	5,750	-0,4141	No cumple
2	5,336	0,000	1,250	2,500	3,992	1,3437	No cumple
3	5,336	1,250	1,875	2,500	4,976	0,3599	No cumple
4	5,336	1,875	2,188	2,500	5,384	-0,0485	No cumple
5	5,336	1,875	2,031	2,188	5,186	0,1499	No cumple
6	5,336	2,031	2,109	2,188	5,287	0,0493	No cumple
7	5,336	2,109	2,148	2,188	5,336	0,0001	Cumple
8	5,336	2,148	2,168	2,188	5,360	-0,0243	No cumple
9	5,336	2,148	2,158	2,168	5,348	-0,0121	No cumple
10	5,336	2,148	2,153	2,158	5,342	-0,0061	No cumple
11	5,336	2,148	2,151	2,153	5,339	-0,0030	No cumple
12	5,336	2,148	2,150	2,151	5,337	-0,0015	No cumple

13	5,336	2,148	2,149	2,150	5,337	-0,0007	Cumple
14	5,336	2,148	2,149	2,149	5,336	-0,0003	Cumple
15	5,336	2,148	2,149	2,149	5,336	-0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE G-2. DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93 "PARQUE EL SILENCIO"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base estabilizada. con cemento hidráulico	615000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9300,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a1"	0,441
Coeficiente estructural base est. cemento hidráulico "a2"	0,158
Coeficiente estructural sub-base "a3"	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m2"	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m3"	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	216712,62
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,30
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,30
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	0,107
Número estructural base est. cemento hidráulico "SN ₂ "	1,647
Número estructural sub-base "SN ₃ "	2,144

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	0,24	0,61	7,00	0,11	1,22
Base es con cemento hidráulico	2,73	6,94	20,00	0,43	1,24
Sub-base Granular	2,47	6,27	20,00	0,32	1,01
Total			47,00	0,85	3,47
				SN Total > SN Requerido	Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,336	0,000	2,500	5,000	9,983	-4,6469	No cumple
2	5,336	0,000	1,250	2,500	8,217	-2,8808	No cumple
3	5,336	0,000	0,625	1,250	6,897	-1,5613	No cumple
4	5,336	0,000	0,313	0,625	6,030	-0,6937	No cumple
5	5,336	0,000	0,156	0,313	5,514	-0,1785	No cumple
6	5,336	0,000	0,078	0,156	5,230	0,1058	No cumple
7	5,336	0,078	0,117	0,156	5,375	-0,0389	No cumple
8	5,336	0,078	0,098	0,117	5,303	0,0328	No cumple
9	5,336	0,098	0,107	0,117	5,339	-0,0032	No cumple
10	5,336	0,098	0,103	0,107	5,321	0,0148	No cumple
11	5,336	0,103	0,105	0,107	5,330	0,0058	No cumple

12	5,336	0,105	0,106	0,107	5,335	0,0013	No cumple
13	5,336	0,106	0,107	0,107	5,337	-0,0009	No cumple
14	5,336	0,106	0,107	0,107	5,336	0,0002	Cumple
15	5,336	0,107	0,107	0,107	5,336	-0,0004	Cumple

Número Estructural de la base estabilizada con cemento (SN₂)

Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,336	0,000	2,500	5,000	6,447	-1,1111	No cumple
2	5,336	0,000	1,250	2,500	4,681	0,6551	No cumple
3	5,336	1,250	1,875	2,500	5,667	-0,3315	No cumple
4	5,336	1,250	1,563	1,875	5,206	0,1302	No cumple
5	5,336	1,563	1,719	1,875	5,444	-0,1077	No cumple
6	5,336	1,563	1,641	1,719	5,326	0,0094	No cumple
7	5,336	1,641	1,680	1,719	5,385	-0,0496	No cumple
8	5,336	1,641	1,660	1,680	5,356	-0,0202	No cumple
9	5,336	1,641	1,650	1,660	5,341	-0,0054	No cumple
10	5,336	1,641	1,646	1,650	5,334	0,0020	No cumple
11	5,336	1,646	1,648	1,650	5,338	-0,0017	No cumple
12	5,336	1,646	1,647	1,648	5,336	0,0002	Cumple
13	5,336	1,647	1,647	1,648	5,337	-0,0008	Cumple
14	5,336	1,647	1,647	1,647	5,336	-0,0003	Cumple
15	5,336	1,647	1,647	1,647	5,336	-0,0001	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)

Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,336	0,000	2,500	5,000	5,759	-0,4236	No cumple
2	5,336	0,000	1,250	2,500	3,993	1,3426	No cumple
3	5,336	1,250	1,875	2,500	4,980	0,3560	No cumple
4	5,336	1,875	2,188	2,500	5,391	-0,0548	No cumple
5	5,336	1,875	2,031	2,188	5,191	0,1449	No cumple
6	5,336	2,031	2,109	2,188	5,292	0,0437	No cumple
7	5,336	2,109	2,148	2,188	5,342	-0,0059	No cumple
8	5,336	2,109	2,129	2,148	5,317	0,0188	No cumple
9	5,336	2,129	2,139	2,148	5,329	0,0064	No cumple
10	5,336	2,139	2,144	2,148	5,336	0,0003	Cumple
11	5,336	2,144	2,146	2,148	5,339	-0,0028	No cumple
12	5,336	2,144	2,145	2,146	5,337	-0,0013	No cumple
13	5,336	2,144	2,144	2,145	5,336	-0,0005	Cumple
14	5,336	2,144	2,144	2,144	5,336	-0,0001	Cumple
15	5,336	2,144	2,144	2,144	5,336	0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE G-3. DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93 "PARQUE EL SILENCIO"

a. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	323451,67
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,35
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,50
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,50
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

b. Propiedades del concreto hidráulico	
f'c 28 días (kg/cm ²)	255,00
f'c 28 días (psi)	3626,94
Módulo Resiliente "MR" (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura "Sc"(psi)	640,00

c. Coeficientes de drenaje (Cd)	
Calidad de drenaje	Bueno
Tiempo de exposición (%)	30,00%
Coeficiente de drenaje "Cd"	1,00

d. Coeficiente de transferencia de carga (J)	
Tipo de espaldón	Asfalto
Dovelas	Si
Tipo de pavimento rígido	JPCP
Coeficiente de transferencia de carga "J"	3,20

e. Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto "h" (in)	6,00
Espesor de base supuesto "h" (in)	6,00
MR sub-rasante (psi)	9300,00
MR Base est. cemento hidráulico (psi)	615000,00
k compuesto de la sub-rasante "kc" (pci)	807,17
Estrato rígido	No
Profundidad del estrato rígido (in)	0,00
k sub-rasante corregido "kcr" (pci)	807,17
Daño relativo "ur"	6,84
k sub-rasante efectivo "ke" (pci)	800,00
Factor de pérdida de soporte "LS"	1,00
k sub-rasante efectivo corregido por el factor LS "k" (pci)	210,00

Espesor de losa de concreto hidráulico (D)							
Iteración	log W ₁₈ Total	D Inicial	D Promedio	D Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,510	0,000	2,500	5,000	4,989	0,5207	No cumple
2	5,510	2,500	3,750	5,000	5,206	0,3038	No cumple
3	5,510	3,750	4,375	5,000	5,475	0,0351	No cumple
4	5,510	4,375	4,688	5,000	5,609	-0,0990	No cumple
5	5,510	4,375	4,531	4,688	5,542	-0,0322	No cumple
6	5,510	4,375	4,453	4,531	5,508	0,0014	No cumple
7	5,510	4,453	4,492	4,531	5,525	-0,0155	No cumple
8	5,510	4,453	4,473	4,492	5,517	-0,0070	No cumple
9	5,510	4,453	4,463	4,473	5,513	-0,0028	No cumple
10	5,510	4,453	4,458	4,463	5,511	-0,0007	Cumple
11	5,510	4,453	4,456	4,458	5,509	0,0003	Cumple
12	5,510	4,456	4,457	4,458	5,510	-0,0002	Cumple
13	5,510	4,456	4,456	4,457	5,510	0,0001	Cumple
14	5,510	4,456	4,456	4,457	5,510	-0,0001	Cumple
15	5,510	4,456	4,456	4,456	5,510	0,0000	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE G- 4. CÁLCULO DE DOVELAS "PARQUE EL SILENCIO"

a. Parámetros de diseño			
Varilla	6	Ancho de la losa (cm)	300,00
Grado	60	Recubrimiento (cm)	15,00
d (in)	0,75	Separación (cm)	30,00
1/8 espesor de losa	Si	Cantidad	10,00
Largo dovela (in)	14,00	Es (psi)	29000000,00
f'c (psi)	3626,94	kd (pci)	300000,00
MR (psi)	3432773,36	z (in)	0,25
k (pci)	210,00	P máx. (lb)	18000,00
μ	0,15	Separación llantas (cm)	180,00
h (in)	6,00	P por llanta (lb)	4500,00

Rigidez relativa "I" (in)	23,42
1.8 I	42,16
Inercia "I" (in ⁴)	0,02
β (in)	0,59
σ_b (psi)	3304,48
fb (psi)	3929,19
fb>rb	Cumple

Dovela	Distancia (in)	Rc	P1
1	0,00	1,00	1940,34
2	11,81	0,72	1396,78
3	23,62	0,44	853,22
4	35,43	0,16	309,66
	ND	2,32	

Dovela	Distancia (in)	Rc	P2
7	0,00	1,00	1236,82
8	11,81	0,72	890,34
9	23,62	0,44	543,86
10	35,43	0,16	197,38
6	11,81	0,72	890,34
5	23,62	0,44	543,86
4	35,43	0,16	197,38
	ND	3,64	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE G- 5. CÁLCULO DE BARRAS DE AMARRE "PARQUE EL SILENCIO"

Acero requerido		Acero propuesto	
Yc (pcf)	0,087	Varilla	4
h (in)	6,00	Grado	40
L' (in)	118,11	d (in)	0,50
fa	1,5	Área (in ²)	0,20
fs	27000,00	Separación (cm)	55,00
As (in ² /in)	0,0034	Largo de losa (cm)	320,04
As (in ² /ft)	0,0410	Cantidad	6,00
		Largo barra (in)	22,29
		As (in ² /ft)	0,109
As prop > As req			
Cumple			

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice H

Seguidamente, se detalla el costo inicial del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de ruta Parque el Silencio por actividad a desarrollar para su construcción para el periodo de diseño de 10 años.

APÉNDICE H-1. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE "PARQUE EL SILENCIO"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		967,72 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	19,35	₡ 1.176,18	₡ 22.764,18
Ayudante de Operario	19,35	₡ 1.154,92	₡ 22.352,69
Peón	33,87	₡ 1.062,06	₡ 35.972,25
Maestro de obras	19,35	₡ 1.387,27	₡ 26.849,78
Ingeniero	5,81	₡ 3.402,83	₡ 19.757,91
Subtotal Personal			₡ 127.696,81
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 191.545,21
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/HH	Monto total
Excavadora	62,90	₡ 32.000,00	₡ 2.012.857,6
Motoniveladora	19,35	₡ 37.000,00	₡ 716.112,80
Vagoneta	145,16	₡ 23.000,00	₡ 3.338.634,00
Compactadora Vibratoria	19,35	₡ 31.000,00	₡ 599.986,40
Subtotal Equipo			₡ 6.667.590,80
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 6.859.136,01	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 9.214,31	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 8.916.876,81	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)		483,86 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	483,86	₡ 8.500,00	₡ 4.112.810,00
Subtotal Materiales			₡ 4.112.810,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	14,52	₡ 1.176,18	₡ 17.073,14
Ayudante de Operario	14,52	₡ 1.154,92	₡ 16.764,52
Peón	24,19	₡ 1.062,06	₡ 25.694,47
Maestro de obras	14,52	₡ 1.387,27	₡ 20.137,33
Ingeniero	4,84	₡ 3.402,83	₡ 16.464,92
Subtotal Personal			₡ 96.134,37
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 144.201,56
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	16,94	₡ 23.000,00	₡ 389.507,30
Motoniveladora	9,68	₡ 37.000,00	₡ 358.056,40
Tanque de agua	9,68	₡ 20.000,00	₡ 193.544,00
Compactadora Vibratoria	12,10	₡ 31.000,00	₡ 374.991,50
Subtotal Equipo			₡ 1.316.099,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.573.110,76	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 7.245.043,99	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)		483,86 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	483,86	₡ 8.500,00	₡ 4.112.810,00
Subtotal Materiales			₡ 4.112.810,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	14,52	₡ 1.176,18	₡ 17.073,14
Ayudante de Operario	14,52	₡ 1.154,92	₡ 16.764,52
Peón	24,19	₡ 1.062,06	₡ 25.694,47
Maestro de obras	14,52	₡ 1.387,27	₡ 20.137,33

Ingeniero	4,84	₡ 3.402,83	₡ 16.464,92
Subtotal Personal			₡ 96.134,37
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 144.201,56
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	16,94	₡ 23.000,00	₡ 389.507,30
Motoniveladora	9,68	₡ 37.000,00	₡ 358.056,40
Tanque de agua	9,68	₡ 20.000,00	₡ 193.544,00
Compactadora Vibratoria	12,10	₡ 31.000,00	₡ 374.991,50
Subtotal Equipo			₡ 1.316.099,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.573.110,76	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 7.245.043,99	

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		2903,16 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	2903,16	₡ 200,00	₡ 580.632,00
Subtotal Materiales			₡ 580.632,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	8,71	₡ 1.176,18	₡ 10.243,88
Ayudante de Operario	8,71	₡ 1.154,92	₡ 10.058,71
Peón	14,52	₡ 1.062,06	₡ 15.416,68
Maestro de obras	8,71	₡ 1.387,27	₡ 12.082,40
Ingeniero	4,35	₡ 3.402,83	₡ 14.818,43
Subtotal Personal			₡ 62.620,10
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 93.930,15
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	4,35	₡ 14.000,00	₡ 60.966,36
Distribuidor de asfalto	8,71	₡ 20.000,00	₡ 174.189,60
Subtotal Equipo			₡ 235.155,96
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 909.718,11	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	
Utilidad	20,00%	₡ 62,67	

TOTAL COSTO UNITARIO	₡	407,36
TOTAL ACTIVIDAD	₡	1.182.633,55

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		634,57 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	634,57	₡ 50.000,00	₡ 31.728.500,00
Subtotal Materiales			₡ 31.728.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	6,35	₡ 1.176,18	₡ 7.463,66
Ayudante de Operario	6,35	₡ 1.154,92	₡ 7.328,74
Peón	13,96	₡ 1.062,06	₡ 14.826,96
Maestro de obras	6,35	₡ 1.387,27	₡ 8.803,20
Ingeniero	2,86	₡ 3.402,83	₡ 9.717,00
Subtotal Personal			₡ 48.139,56
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 72.209,34
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto
Vagoneta	5,08	₡ 23.000,00	₡ 116.760,88
Pavimentadora	5,08	₡ 33.000,00	₡ 167.526,48
Compactadora Estática	5,08	₡ 15.000,00	₡ 76.148,40
Compactadora Vibratoria	4,44	₡ 31.000,00	₡ 137.701,69
Compactadora Neumáticos	2,86	₡ 22.000,00	₡ 62.822,43
Subtotal Equipo			₡ 560.959,88
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 32.361.669,22	
Costo Unitario	-	₡ 50.997,79	
Imprevistos	5,00%	₡ 2.549,89	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 2.549,89	
Utilidad	20,00%	₡ 10.199,56	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₡	42.070.169,98

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE H- 2. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO "PARQUE EL SILENCIO"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		1290,30 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -

MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	25,81	₡ 1.176,18	₡ 30.352,40
Ayudante de Operario	25,81	₡ 1.154,92	₡ 29.803,74
Peón	45,16	₡ 1.062,06	₡ 47.963,25
Maestro de obras	25,81	₡ 1.387,27	₡ 35.799,89
Ingeniero	7,74	₡ 3.402,83	₡ 26.344,01
Subtotal Personal			₡ 170.263,29
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 255.394,93
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Excavadora	83,87	₡ 32.000,00	₡ 2.683.824,00
Motoniveladora	25,81	₡ 37.000,00	₡ 954.822,00
Vagoneta	193,55	₡ 23.000,00	₡ 4.451.535,00
Compactadora Vibratoria	25,81	₡ 31.000,00	₡ 799.986,00
Subtotal Equipo			₡ 8.890.167,00
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 9.145.561,93	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 9.214,31	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 11.889.230,51	

Actividad	Cantidad		
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	645,15 m ³		
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	645,15	₡ 8.500,00	₡ 5.483.775,00
Subtotal Materiales			₡ 5.483.775,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	19,35	₡ 1.176,18	₡ 22.764,30
Ayudante de Operario	19,35	₡ 1.154,92	₡ 22.352,80
Peón	32,26	₡ 1.062,06	₡ 34.259,46
Maestro de obras	19,35	₡ 1.387,27	₡ 26.849,92
Ingeniero	6,45	₡ 3.402,83	₡ 21.953,34
Subtotal Personal			₡ 128.179,83
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 192.269,74
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	22,58	₡ 23.000,00	₡ 519.345,75
Motoniveladora	12,90	₡ 37.000,00	₡ 477.411,00
Tanque de agua	12,90	₡ 20.000,00	₡ 258.060,00

Compactadora Vibratoria	16,13	₡ 31.000,00	₡ 499.991,25
Subtotal Equipo			₡ 1.754.808,00
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto	
Total	-	₡ 7.430.852,74	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 9.660.108,56	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)		645,15 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	599,99	₡ 8.500,00	₡ 5.099.910,75
Saco de cemento hidráulico 50 kg (und)	1265,00	₡ 6.000,00	₡ 7.590.000,00
Subtotal Materiales			₡ 12.689.910,75
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	19,35	₡ 1.176,18	₡ 22.764,30
Ayudante de Operario	19,35	₡ 1.154,92	₡ 22.352,80
Peón	35,48	₡ 1.062,06	₡ 37.685,41
Maestro de obras	19,35	₡ 1.387,27	₡ 26.849,92
Ingeniero	6,45	₡ 3.402,83	₡ 21.953,34
Subtotal Personal			₡ 131.605,77
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 197.408,66
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	24,52	₡ 23.000,00	₡ 563.861,10
Motoniveladora	12,90	₡ 37.000,00	₡ 477.411,00
Tanque de agua	12,90	₡ 20.000,00	₡ 258.060,00
Compactadora Vibratoria	16,13	₡ 31.000,00	₡ 499.991,25
Back-Hoe	22,58	₡ 14.000,00	₡ 316.123,50
Subtotal Equipo			₡ 2.115.446,85
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 15.002.766,26	
Costo Unitario	-	₡ 23.254,69	
Imprevistos	5,00%	₡ 1.162,73	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 1.162,73	
Utilidad	20,00%	₡ 4.650,94	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 30.231,10	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 19.503.596,14	

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		2903,16 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	2903,16	₡ 200,00	₡ 580.632,00
Subtotal Materiales			₡ 580.632,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	8,71	₡ 1.176,18	₡ 10.243,88
Ayudante de Operario	8,71	₡ 1.154,92	₡ 10.058,71
Peón	14,52	₡ 1.062,06	₡ 15.416,68
Maestro de obras	8,71	₡ 1.387,27	₡ 12.082,40
Ingeniero	4,35	₡ 3.402,83	₡ 14.818,43
Subtotal Personal			₡ 62.620,10
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 93.930,15
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	4,35	₡ 14.000,00	₡ 60.966,36
Distribuidor de asfalto	8,71	₡ 20.000,00	₡ 174.189,60
Subtotal Equipo			₡ 235.155,96
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
Total	Porcentaje	Monto total	
	-	₡ 909.718,11	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	
Utilidad	20,00%	₡ 62,67	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 407,36	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 1.182.633,55	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		555,25 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	555,25	₡ 50.000,00	₡ 27.762.500,00
Subtotal Materiales			₡ 27.762.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	5,55	₡ 1.176,18	₡ 6.530,72
Ayudante de Operario	5,55	₡ 1.154,92	₡ 6.412,67
Peón	12,22	₡ 1.062,06	₡ 12.973,62
Maestro de obras	5,55	₡ 1.387,27	₡ 7.702,82
Ingeniero	2,50	₡ 3.402,83	₡ 8.502,39
Subtotal Personal			₡ 42.122,21
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 63.183,31

EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	4,44	₡ 23.000,00	₡ 102.166,00
Pavimentadora	4,44	₡ 33.000,00	₡ 146.586,00
Compactadora Estática	4,44	₡ 15.000,00	₡ 66.630,00
Compactadora Vibratoria	3,89	₡ 31.000,00	₡ 120.489,25
Compactadora Neumáticos	2,50	₡ 22.000,00	₡ 54.969,75
Subtotal Equipo			₡ 490.841,00
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 28.316.524,31	
Costo Unitario	-	₡ 50.997,79	
Imprevistos	5,00%	₡ 2.549,89	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 2.549,89	
Utilidad	20,00%	₡ 10.199,56	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 66.297,13	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 36.811.481,61	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE H- 3. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO RÍGIDO "PARQUE EL SILENCIO"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		483,86 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	9,68	₡ 1.176,18	₡ 11.382,09
Ayudante de Operario	9,68	₡ 1.154,92	₡ 11.176,34
Peón	16,94	₡ 1.062,06	₡ 17.986,13
Maestro de obras	9,68	₡ 1.387,27	₡ 13.424,89
Ingeniero	2,90	₡ 3.402,83	₡ 9.878,95
Subtotal Personal			₡ 63.848,40
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 95.772,61
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Excavadora	31,45	₡ 32.000,00	₡ 1.006.428,80
Motoniveladora	9,68	₡ 37.000,00	₡ 358.056,40
Vagoneta	72,58	₡ 23.000,00	₡ 1.669.317,00
Compactadora Vibratoria	9,68	₡ 31.000,00	₡ 299.993,20
Subtotal Equipo			₡ 3.333.795,40
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 3.429.568,01	

Costo Unitario	-	₡	7.087,93
Imprevistos	5,00%	₡	354,40
Gastos Administrativos	5,00%	₡	354,40
Utilidad	20,00%	₡	1.417,59
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD		₡	4.458.438,41

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)		483,86 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	449,99	₡ 8.500,00	₡ 3.824.913,30
Saco de cemento hidráulico 50 kg (und)	949,00	₡ 6.000,00	₡ 5.694.000,00
Subtotal Materiales			₡ 9.518.913,30
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	14,52	₡ 1.176,18	₡ 17.073,14
Ayudante de Operario	14,52	₡ 1.154,92	₡ 16.764,52
Peón	26,61	₡ 1.062,06	₡ 28.263,91
Maestro de obras	14,52	₡ 1.387,27	₡ 20.137,33
Ingeniero	4,84	₡ 3.402,83	₡ 16.464,92
Subtotal Personal			₡ 98.703,82
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 148.055,73
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	18,39	₡ 23.000,00	₡ 422.893,64
Motoniveladora	9,68	₡ 37.000,00	₡ 358.056,40
Tanque de agua	9,68	₡ 20.000,00	₡ 193.544,00
Compactadora Vibratoria	12,10	₡ 31.000,00	₡ 374.991,50
Back-Hoe	16,94	₡ 14.000,00	₡ 237.091,40
Subtotal Equipo			₡ 1.586.576,94
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje		Monto total
Total	-	₡	11.253.545,97
Costo Unitario	-	₡	23.257,86
Imprevistos	5,00%	₡	1.162,89
Gastos Administrativos	5,00%	₡	1.162,89
Utilidad	20,00%	₡	4.651,57
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	30.235,21
TOTAL ACTIVIDAD		₡	14.629.609,76

Actividad		Cantidad	
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)		3225,74 m ²	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Concreto Hidráulico (m ³)	483,86	₡120.000,00	₡ 58.063.320,00

Varilla lisa # 6 de 6 m (und) G 60	197,00	₺ 7.800,00	₺ 1.536.600,00
Varilla corrugada # 4 de 6 m (und) G 40	189,00	₺ 2.540,00	₺ 480.060,00
Backer-road para juntas (und)	5,00	₺ 23.745,00	₺ 118.725,00
Sellador para juntas (cubeta)	9,00	₺107.708,00	₺ 969.372,00
Subtotal Materiales			₺ 61.168.077,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	25,81	₺ 1.176,18	₺ 30.352,30
Ayudante de Operario	25,81	₺ 1.154,92	₺ 29.803,64
Peón	38,71	₺ 1.062,06	₺ 41.111,23
Maestro de obras	25,81	₺ 1.387,27	₺ 35.799,78
Ingeniero	16,13	₺ 3.402,83	₺ 54.883,19
Subtotal Personal			₺ 191.950,15
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₺ 287.925,22
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Bomba estacionaria	32,26	₺ 12.000,00	₺ 387.088,80
Sierra de concreto	2,90	₺ 7.300,00	₺ 21.193,11
Subtotal Equipo			₺ 408.281,91
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₺ 61.864.284,14	
Costo Unitario	-	₺ 19.178,32	
Imprevistos	5,00%	₺ 958,92	
Gastos Administrativos	5,00%	₺ 958,92	
Utilidad	20,00%	₺ 3.835,66	
TOTAL COSTO UNITARIO		₺	24.931,82
TOTAL ACTIVIDAD		₺	80.423.569,38

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice I

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta Parque el Silencio según la metodología AASHTO-93 para el periodo de diseño de 15 años.

APÉNDICE I-1. DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93 "PARQUE EL SILENCIO"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base Granular	28000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9300,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño " W_{18} "	361429,74
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño " S_o "	0,45
Índice de servicio inicial " PSI_o "	4,20
Índice de servicio final " PSI_f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,20
Estadístico Z " Z_r "	-0,524

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica " a_1 "	0,441
Coeficiente estructural base granular " a_2 "	0,133
Coeficiente estructural sub-base " a_3 "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular " m_2 "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base " m_3 "	1,00

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica " SN_1 "	1,519
Número estructural base granular " SN_2 "	1,800
Número estructural sub-base " SN_3 "	2,332

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	3,45	8,75	9,00	1,52	1,56
Base Granular	1,78	4,53	15,00	0,24	0,79
Sub-base Granular	-0,13	-0,32	15,00	-0,02	0,76
		Total	39,00	1,74	3,10
			SN Total > SN Requerido		Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN_1)							
Iteración	log W_{18} Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W_{18}	log W_{18} Total - log W_{18}	Condición
1	5,558	0,000	2,500	5,000	6,861	-1,3025	No cumple
2	5,558	0,000	1,250	2,500	5,103	0,4553	No cumple
3	5,558	1,250	1,875	2,500	6,087	-0,5285	No cumple

4	5,558	1,250	1,563	1,875	5,626	-0,0684	No cumple
5	5,558	1,250	1,406	1,563	5,373	0,1846	No cumple
6	5,558	1,406	1,484	1,563	5,502	0,0560	No cumple
7	5,558	1,484	1,523	1,563	5,565	-0,0067	No cumple
8	5,558	1,484	1,504	1,523	5,534	0,0245	No cumple
9	5,558	1,504	1,514	1,523	5,549	0,0088	No cumple
10	5,558	1,514	1,519	1,523	5,557	0,0010	No cumple
11	5,558	1,519	1,521	1,523	5,561	-0,0028	No cumple
12	5,558	1,519	1,520	1,521	5,559	-0,0009	No cumple
13	5,558	1,519	1,519	1,520	5,558	0,0001	Cumple
14	5,558	1,519	1,519	1,520	5,558	-0,0004	Cumple
15	5,558	1,519	1,519	1,519	5,558	-0,0002	Cumple

Número Estructural de la base granular (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,558	0,000	2,500	5,000	6,437	-0,8795	No cumple
2	5,558	0,000	1,250	2,500	4,680	0,8784	No cumple
3	5,558	1,250	1,875	2,500	5,663	-0,1055	No cumple
4	5,558	1,250	1,563	1,875	5,203	0,3546	No cumple
5	5,558	1,563	1,719	1,875	5,441	0,1175	No cumple
6	5,558	1,719	1,797	1,875	5,554	0,0043	No cumple
7	5,558	1,797	1,836	1,875	5,609	-0,0510	No cumple
8	5,558	1,797	1,816	1,836	5,581	-0,0234	No cumple
9	5,558	1,797	1,807	1,816	5,568	-0,0096	No cumple
10	5,558	1,797	1,802	1,807	5,561	-0,0027	No cumple
11	5,558	1,797	1,799	1,802	5,557	0,0008	Cumple
12	5,558	1,799	1,801	1,802	5,559	-0,0009	No cumple
13	5,558	1,799	1,800	1,801	5,558	0,0000	Cumple
14	5,558	1,799	1,800	1,800	5,558	0,0004	Cumple
15	5,558	1,800	1,800	1,800	5,558	0,0002	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,558	0,000	2,500	5,000	5,750	-0,1920	No cumple
2	5,558	0,000	1,250	2,500	3,992	1,5659	No cumple
3	5,558	1,250	1,875	2,500	4,976	0,5820	No cumple
4	5,558	1,875	2,188	2,500	5,384	0,1736	No cumple
5	5,558	2,188	2,344	2,500	5,572	-0,0140	No cumple
6	5,558	2,188	2,266	2,344	5,479	0,0785	No cumple
7	5,558	2,266	2,305	2,344	5,526	0,0319	No cumple
8	5,558	2,305	2,324	2,344	5,549	0,0089	No cumple
9	5,558	2,324	2,334	2,344	5,561	-0,0026	No cumple
10	5,558	2,324	2,329	2,334	5,555	0,0031	No cumple
11	5,558	2,329	2,332	2,334	5,558	0,0003	Cumple
12	5,558	2,332	2,333	2,334	5,559	-0,0012	No cumple

13	5,558	2,332	2,332	2,333	5,558	-0,0005	Cumple
14	5,558	2,332	2,332	2,332	5,558	-0,0001	Cumple
15	5,558	2,332	2,332	2,332	5,558	0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE I-2. DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93 "PARQUE EL SILENCIO"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base estabilizada. con cemento hidráulico	615000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	9300,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base est. cemento hidráulico "a ₂ "	0,158
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	361429,74
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,30
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,30
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	0,169
Número estructural base est. cemento hidráulico "SN ₂ "	1,798
Número estructural sub-base "SN ₃ "	2,325

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	0,38	0,97	7,00	0,169	1,22
Base es con cemento hidráulico	3,69	9,36	20,00	0,58	1,24
Sub-base Granular	1,05	2,66	20,00	0,13	1,01
Total			47,00	0,89	3,47
SN Total > SN Requerido					Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,558	0,000	2,500	5,000	9,983	-4,4247	No cumple
2	5,558	0,000	1,250	2,500	8,217	-2,6586	No cumple
3	5,558	0,000	0,625	1,250	6,897	-1,3392	No cumple
4	5,558	0,000	0,313	0,625	6,030	-0,4715	No cumple
5	5,558	0,000	0,156	0,313	5,514	0,0436	No cumple
6	5,558	0,156	0,234	0,313	5,780	-0,2221	No cumple
7	5,558	0,156	0,195	0,234	5,649	-0,0914	No cumple
8	5,558	0,156	0,176	0,195	5,582	-0,0245	No cumple
9	5,558	0,156	0,166	0,176	5,549	0,0094	No cumple
10	5,558	0,166	0,171	0,176	5,566	-0,0076	No cumple
11	5,558	0,166	0,168	0,171	5,557	0,0009	No cumple

12	5,558	0,168	0,170	0,171	5,561	-0,0033	No cumple
13	5,558	0,168	0,169	0,170	5,559	-0,0012	No cumple
14	5,558	0,168	0,169	0,169	5,558	-0,0001	Cumple
15	5,558	0,168	0,169	0,169	5,558	0,0004	Cumple

Número Estructural de la base estabilizada con cemento (SN₂)

Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,558	0,000	2,500	5,000	6,447	-0,8889	No cumple
2	5,558	0,000	1,250	2,500	4,681	0,8772	No cumple
3	5,558	1,250	1,875	2,500	5,667	-0,1094	No cumple
4	5,558	1,250	1,563	1,875	5,206	0,3524	No cumple
5	5,558	1,563	1,719	1,875	5,444	0,1145	No cumple
6	5,558	1,719	1,797	1,875	5,557	0,0009	Cumple
7	5,558	1,797	1,836	1,875	5,613	-0,0546	No cumple
8	5,558	1,797	1,816	1,836	5,585	-0,0270	No cumple
9	5,558	1,797	1,807	1,816	5,571	-0,0131	No cumple
10	5,558	1,797	1,802	1,807	5,564	-0,0061	No cumple
11	5,558	1,797	1,799	1,802	5,561	-0,0026	No cumple
12	5,558	1,797	1,798	1,799	5,559	-0,0009	Cumple
13	5,558	1,797	1,797	1,798	5,558	0,0000	Cumple
14	5,558	1,797	1,798	1,798	5,558	-0,0004	Cumple
15	5,558	1,797	1,798	1,798	5,558	-0,0002	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)

Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,558	0,000	2,500	5,000	5,759	-0,2014	No cumple
2	5,558	0,000	1,250	2,500	3,993	1,5647	No cumple
3	5,558	1,250	1,875	2,500	4,980	0,5781	No cumple
4	5,558	1,875	2,188	2,500	5,391	0,1674	No cumple
5	5,558	2,188	2,344	2,500	5,580	-0,0218	No cumple
6	5,558	2,188	2,266	2,344	5,487	0,0715	No cumple
7	5,558	2,266	2,305	2,344	5,533	0,0245	No cumple
8	5,558	2,305	2,324	2,344	5,557	0,0013	No cumple
9	5,558	2,324	2,334	2,344	5,568	-0,0103	No cumple
10	5,558	2,324	2,329	2,334	5,563	-0,0045	No cumple
11	5,558	2,324	2,327	2,329	5,560	-0,0016	No cumple
12	5,558	2,324	2,325	2,327	5,558	-0,0002	Cumple
13	5,558	2,324	2,325	2,325	5,557	0,0006	Cumple
14	5,558	2,325	2,325	2,325	5,558	0,0002	Cumple
15	5,558	2,325	2,325	2,325	5,558	0,0000	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE I-3. DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93 "PARQUE EL SILENCIO"

a. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	534944,37
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,35
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,50
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,50
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

b. Propiedades del concreto hidráulico	
f'c 28 días (kg/cm ²)	255,00
f'c 28 días (psi)	3626,94
Módulo Resiliente "MR" (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura "Sc"(psi)	640,00

c. Coeficientes de drenaje (Cd)	
Calidad de drenaje	Bueno
Tiempo de exposición (%)	30,00%
Coeficiente de drenaje "Cd"	1,00

d. Coeficiente de transferencia de carga (J)	
Tipo de espaldón	Asfalto
Dovelas	Si
Tipo de pavimento rígido	JPCP
Coeficiente de transferencia de carga "J"	3,20

e. Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto "h" (in)	6,00
Espesor de base supuesto "h" (in)	6,00
MR sub-rasante (psi)	9300,00
MR Base est. cemento hidráulico (psi)	615000,00
k compuesto de la sub-rasante "kc" (pci)	807,17
Estrato rígido	No
Profundidad del estrato rígido (in)	0,00
k sub-rasante corregido "kcr" (pci)	807,17
Daño relativo "ur"	6,84
k sub-rasante efectivo "ke" (pci)	800,00
Factor de pérdida de soporte "LS"	1,00
k sub-rasante efectivo corregido por el factor LS "k" (pci)	210,00

Espesor de losa de concreto hidráulico (D)							
Iteración	log W ₁₈ Total	D Inicial	D Promedio	D Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,732	0,000	2,500	5,000	4,989	0,7429	No cumple
2	5,732	2,500	3,750	5,000	5,206	0,5260	No cumple
3	5,732	3,750	4,375	5,000	5,475	0,2573	No cumple
4	5,732	4,375	4,688	5,000	5,609	0,1232	No cumple
5	5,732	4,688	4,844	5,000	5,675	0,0572	No cumple
6	5,732	4,844	4,922	5,000	5,707	0,0246	No cumple
7	5,732	4,922	4,961	5,000	5,724	0,0084	No cumple
8	5,732	4,961	4,980	5,000	5,732	0,0003	Cumple
9	5,732	4,980	4,990	5,000	5,736	-0,0037	No cumple
10	5,732	4,980	4,985	4,990	5,734	-0,0017	No cumple
11	5,732	4,980	4,983	4,985	5,733	-0,0007	Cumple
12	5,732	4,980	4,982	4,983	5,732	-0,0002	Cumple
13	5,732	4,980	4,981	4,982	5,732	0,0001	Cumple
14	5,732	4,981	4,981	4,982	5,732	0,0000	Cumple
15	5,732	4,981	4,981	4,981	5,732	0,0000	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE I-4. CÁLCULO DE DOVELAS "PARQUE EL SILENCIO"

a. Parámetros de diseño			
Varilla	6	Ancho de la losa (cm)	300,00
Grado	60	Recubrimiento (cm)	15,00
d (in)	0,75	Separación (cm)	30,00
1/8 espesor de losa	Si	Cantidad	10,00
Largo dovela (in)	14,00	Es (psi)	29000000,00
f'c (psi)	3626,94	kd (pci)	300000,00
MR (psi)	3432773,36	z (in)	0,25
k (pci)	210,00	P máx. (lb)	18000,00
μ	0,15	Separación llantas (cm)	180,00
h (in)	6,00	P por llanta (lb)	4500,00

Rigidez relativa "I" (in)	23,42
1.8 I	42,16
Inercia "I" (in ⁴)	0,02
β (in)	0,59
σ_b (psi)	3304,48
fb (psi)	3929,19
fb>rb	Cumple

Dovela	Distancia (in)	Rc	P1	Dovela	Distancia (in)	Rc	P2
1	0,00	1,00	1940,34	7	0,00	1,00	1236,82
2	11,81	0,72	1396,78	8	11,81	0,72	890,34
3	23,62	0,44	853,22	9	23,62	0,44	543,86
4	35,43	0,16	309,66	10	35,43	0,16	197,38
	ND	2,32		6	11,81	0,72	890,34
				5	23,62	0,44	543,86
				4	35,43	0,16	197,38
					ND	3,64	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE I- 5. CÁLCULO DE BARRAS DE AMARRE "PARQUE EL SILENCIO"

Acero requerido		Acero propuesto	
Yc (pcf)	0,087	Varilla	4
h (in)	6,00	Grado	40
L' (in)	118,11	d (in)	0,50
fa	1,5	Área (in ²)	0,20
fs	27000,00	Separación (cm)	55,00
As (in ² /in)	0,0034	Largo de losa (cm)	320,04
As (in ² /ft)	0,0410	Cantidad	6,00
		Largo barra (in)	22,29
		As (in ² /ft)	0,109
As prop > As req			
Cumple			

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice J

Consecutivamente, se define el costo inicial del pavimento flexible de ruta Parque el Silencio por actividad a desarrollar para su construcción para el periodo de diseño de 15 años. El detalle del costo de los pavimentos semi-rígido y rígidos se

encuentran en los apéndices H-2 y H-3 respectivamente, ya que presentan los mismos espesores de capa que los pavimentos del periodo anterior.

APÉNDICE J- 1. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE "PARQUE EL SILENCIO"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		967,72 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
			₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	19,35	₡ 1.176,18	₡ 22.764,18
Ayudante de Operario	19,35	₡ 1.154,92	₡ 22.352,69
Peón	33,87	₡ 1.062,06	₡ 35.972,25
Maestro de obras	19,35	₡ 1.387,27	₡ 26.849,78
Ingeniero	5,81	₡ 3.402,83	₡ 19.757,91
Subtotal Personal			₡ 127.696,81
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 191.545,21
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/HH	Monto total
Excavadora	62,90	₡ 32.000,00	₡ 2.012.857,6
Motoniveladora	19,35	₡ 37.000,00	₡ 716.112,80
Vagoneta	145,16	₡ 23.000,00	₡ 3.338.634,00
Compactadora Vibratoria	19,35	₡ 31.000,00	₡ 599.986,40
Subtotal Equipo			₡ 6.667.590,80
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 6.859.136,01	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD		₡	8.916.876,81

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)		483,86 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	483,86	₡ 8.500,00	₡ 4.112.810,00
Subtotal Materiales			₡ 4.112.810,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	14,52	₡ 1.176,18	₡ 17.073,14
Ayudante de Operario	14,52	₡ 1.154,92	₡ 16.764,52
Peón	24,19	₡ 1.062,06	₡ 25.694,47
Maestro de obras	14,52	₡ 1.387,27	₡ 20.137,33
Ingeniero	4,84	₡ 3.402,83	₡ 16.464,92
Subtotal Personal			₡ 96.134,37
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 144.201,56
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	16,94	₡ 23.000,00	₡ 389.507,30
Motoniveladora	9,68	₡ 37.000,00	₡ 358.056,40
Tanque de agua	9,68	₡ 20.000,00	₡ 193.544,00
Compactadora Vibratoria	12,10	₡ 31.000,00	₡ 374.991,50
Subtotal Equipo			₡ 1.316.099,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.573.110,76	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 7.245.043,99	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)		483,86 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	483,86	₡ 8.500,00	₡ 4.112.810,00
Subtotal Materiales			₡ 4.112.810,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	14,52	₡ 1.176,18	₡ 17.073,14
Ayudante de Operario	14,52	₡ 1.154,92	₡ 16.764,52
Peón	24,19	₡ 1.062,06	₡ 25.694,47
Maestro de obras	14,52	₡ 1.387,27	₡ 20.137,33

Ingeniero	4,84	₡ 3.402,83	₡ 16.464,92
Subtotal Personal			₡ 96.134,37
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 144.201,56
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	16,94	₡ 23.000,00	₡ 389.507,30
Motoniveladora	9,68	₡ 37.000,00	₡ 358.056,40
Tanque de agua	9,68	₡ 20.000,00	₡ 193.544,00
Compactadora Vibratoria	12,10	₡ 31.000,00	₡ 374.991,50
Subtotal Equipo			₡ 1.316.099,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.573.110,76	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	14.973,43
TOTAL ACTIVIDAD		₡	7.245.043,99

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		2903,16 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	2903,16	₡ 200,00	₡ 580.632,00
Subtotal Materiales			₡ 580.632,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	8,71	₡ 1.176,18	₡ 10.243,88
Ayudante de Operario	8,71	₡ 1.154,92	₡ 10.058,71
Peón	14,52	₡ 1.062,06	₡ 15.416,68
Maestro de obras	8,71	₡ 1.387,27	₡ 12.082,40
Ingeniero	4,35	₡ 3.402,83	₡ 14.818,43
Subtotal Personal			₡ 62.620,10
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 93.930,15
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	4,35	₡ 14.000,00	₡ 60.966,36
Distribuidor de asfalto	8,71	₡ 20.000,00	₡ 174.189,60
Subtotal Equipo			₡ 235.155,96
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 909.718,11	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	

Utilidad	20,00%	₡	62,67
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	407,36
TOTAL ACTIVIDAD		₡	1.182.633,55

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		713,89 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	713,89	₡ 50.000,00	₡ 35.694.500,00
Subtotal Materiales			₡ 35.694.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	7,14	₡ 1.176,18	₡ 8.396,60
Ayudante de Operario	7,14	₡ 1.154,92	₡ 8.244,82
Peón	15,71	₡ 1.062,06	₡ 16.680,30
Maestro de obras	7,14	₡ 1.387,27	₡ 9.903,58
Ingeniero	3,21	₡ 3.402,83	₡ 10.931,60
Subtotal Personal			₡ 54.156,91
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 81.235,36
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto
Vagoneta	5,71	₡ 23.000,00	₡ 131.355,76
Pavimentadora	5,71	₡ 33.000,00	₡ 188.466,96
Compactadora Estática	5,71	₡ 15.000,00	₡ 85.666,80
Compactadora Vibratoria	5,00	₡ 31.000,00	₡ 154.914,13
Compactadora Neumáticos	3,21	₡ 22.000,00	₡ 70.675,11
Subtotal Equipo			₡ 631.078,76
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	36.406.814,12
Costo Unitario	-	₡	50.997,79
Imprevistos	5,00%	₡	2.549,89
Gastos Administrativos	5,00%	₡	2.549,89
Utilidad	20,00%	₡	10.199,56
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₡	47.328.858,36

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice K

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta INA según la metodología AASHTO-93 para el periodo de diseño de 10 años.

APÉNDICE K-1. DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93 "INA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base Granular	28000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	13000,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño " W_{18} "	251882,64
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño " S_o "	0,45
Índice de servicio inicial " PSI_o "	4,20
Índice de servicio final " PSI_f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,20
Estadístico Z " Z_r "	-0,524

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica " a_1 "	0,441
Coeficiente estructural base granular " a_2 "	0,133
Coeficiente estructural sub-base " a_3 "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular " m_2 "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base " m_3 "	1,00

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica " SN_1 "	1,423
Número estructural base granular " SN_2 "	1,692
Número estructural sub-base " SN_3 "	1,939

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	3,23	8,20	9,00	1,42	1,56
Base Granular	0,97	2,47	15,00	0,13	0,79
Sub-base Granular	-3,19	-8,11	15,00	-0,41	0,76
Total			39,00	1,14	3,10
				SN Total > SN Requerido	Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN_1)							
Iteración	log W_{18} Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W_{18}	log W_{18} Total - log W_{18}	Condición
1	5,401	0,000	2,500	5,000	6,861	-1,4593	No cumple
2	5,401	0,000	1,250	2,500	5,103	0,2985	No cumple
3	5,401	1,250	1,875	2,500	6,087	-0,6853	No cumple
4	5,401	1,250	1,563	1,875	5,626	-0,2253	No cumple

5	5,401	1,250	1,406	1,563	5,373	0,0277	No cumple
6	5,401	1,406	1,484	1,563	5,502	-0,1009	No cumple
7	5,401	1,406	1,445	1,484	5,438	-0,0371	No cumple
8	5,401	1,406	1,426	1,445	5,406	-0,0048	No cumple
9	5,401	1,406	1,416	1,426	5,390	0,0114	No cumple
10	5,401	1,416	1,421	1,426	5,398	0,0033	No cumple
11	5,401	1,421	1,423	1,426	5,402	-0,0008	Cumple
12	5,401	1,421	1,422	1,423	5,400	0,0013	No cumple
13	5,401	1,422	1,423	1,423	5,401	0,0002	Cumple
14	5,401	1,423	1,423	1,423	5,401	-0,0003	Cumple
15	5,401	1,423	1,423	1,423	5,401	0,0000	Cumple

Número Estructural de la base granular (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,401	0,000	2,500	5,000	6,437	-1,0363	No cumple
2	5,401	0,000	1,250	2,500	4,680	0,7215	No cumple
3	5,401	1,250	1,875	2,500	5,663	-0,2623	No cumple
4	5,401	1,250	1,563	1,875	5,203	0,1978	No cumple
5	5,401	1,563	1,719	1,875	5,441	-0,0394	No cumple
6	5,401	1,563	1,641	1,719	5,324	0,0773	No cumple
7	5,401	1,641	1,680	1,719	5,383	0,0185	No cumple
8	5,401	1,680	1,699	1,719	5,412	-0,0105	No cumple
9	5,401	1,680	1,689	1,699	5,397	0,0040	No cumple
10	5,401	1,689	1,694	1,699	5,404	-0,0033	No cumple
11	5,401	1,689	1,692	1,694	5,401	0,0003	Cumple
12	5,401	1,692	1,693	1,694	5,403	-0,0015	No cumple
13	5,401	1,692	1,693	1,693	5,402	-0,0006	Cumple
14	5,401	1,692	1,692	1,693	5,401	-0,0001	Cumple
15	5,401	1,692	1,692	1,692	5,401	0,0001	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,401	0,000	2,500	5,000	6,087	-0,6863	No cumple
2	5,401	0,000	1,250	2,500	4,330	1,0716	No cumple
3	5,401	1,250	1,875	2,500	5,313	0,0877	No cumple
4	5,401	1,875	2,188	2,500	5,722	-0,3206	No cumple
5	5,401	1,875	2,031	2,188	5,524	-0,1223	No cumple
6	5,401	1,875	1,953	2,031	5,420	-0,0188	No cumple
7	5,401	1,875	1,914	1,953	5,367	0,0341	No cumple
8	5,401	1,914	1,934	1,953	5,394	0,0075	No cumple
9	5,401	1,934	1,943	1,953	5,407	-0,0057	No cumple
10	5,401	1,934	1,938	1,943	5,400	0,0009	No cumple
11	5,401	1,938	1,941	1,943	5,404	-0,0024	No cumple
12	5,401	1,938	1,940	1,941	5,402	-0,0007	Cumple

13	5,401	1,938	1,939	1,940	5,401	0,0001	Cumple
14	5,401	1,939	1,939	1,940	5,402	-0,0003	Cumple
15	5,401	1,939	1,939	1,939	5,401	-0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE K-2. DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93 "INA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base estabilizada. con cemento hidráulico	615000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	13000,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base est. cemento hidráulico "a ₂ "	0,158
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	251882,64
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,30
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,30
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	0,124
Número estructural base est. cemento hidráulico "SN ₂ "	1,690
Número estructural sub-base "SN ₃ "	1,936

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	0,28	0,73	7,00	0,12	1,22
Base es con cemento hidráulico	3,01	7,63	20,00	0,47	1,24
Sub-base Granular	4,09	10,39	20,00	0,52	1,01
Total			47,00	1,12	3,47
SN Total > SN Requerido					Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,401	0,000	2,500	5,000	9,983	-4,5816	No cumple
2	5,401	0,000	1,250	2,500	8,217	-2,8154	No cumple
3	5,401	0,000	0,625	1,250	6,897	-1,4960	No cumple
4	5,401	0,000	0,313	0,625	6,030	-0,6283	No cumple
5	5,401	0,000	0,156	0,313	5,514	-0,1132	No cumple
6	5,401	0,000	0,078	0,156	5,230	0,1711	No cumple
7	5,401	0,078	0,117	0,156	5,375	0,0265	No cumple
8	5,401	0,117	0,137	0,156	5,445	-0,0440	No cumple
9	5,401	0,117	0,127	0,137	5,410	-0,0089	No cumple
10	5,401	0,117	0,122	0,127	5,392	0,0087	No cumple
11	5,401	0,122	0,125	0,127	5,401	-0,0001	Cumple
12	5,401	0,122	0,123	0,125	5,397	0,0043	No cumple

13	5,401	0,123	0,124	0,125	5,399	0,0021	No cumple
14	5,401	0,124	0,124	0,125	5,400	0,0010	No cumple
15	5,401	0,124	0,124	0,125	5,401	0,0005	Cumple

Número Estructural de la base estabilizada con cemento (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,401	0,000	2,500	5,000	6,447	-1,0457	No cumple
2	5,401	0,000	1,250	2,500	4,681	0,7204	No cumple
3	5,401	1,250	1,875	2,500	5,667	-0,2662	No cumple
4	5,401	1,250	1,563	1,875	5,206	0,1955	No cumple
5	5,401	1,563	1,719	1,875	5,444	-0,0423	No cumple
6	5,401	1,563	1,641	1,719	5,326	0,0747	No cumple
7	5,401	1,641	1,680	1,719	5,385	0,0158	No cumple
8	5,401	1,680	1,699	1,719	5,415	-0,0134	No cumple
9	5,401	1,680	1,689	1,699	5,400	0,0011	No cumple
10	5,401	1,689	1,694	1,699	5,407	-0,0061	No cumple
11	5,401	1,689	1,692	1,694	5,404	-0,0025	No cumple
12	5,401	1,689	1,691	1,692	5,402	-0,0007	Cumple
13	5,401	1,689	1,690	1,691	5,401	0,0002	Cumple
14	5,401	1,690	1,690	1,691	5,401	-0,0002	Cumple
15	5,401	1,690	1,690	1,690	5,401	0,0000	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,401	0,000	2,500	5,000	6,097	-0,6957	No cumple
2	5,401	0,000	1,250	2,500	4,331	1,0704	No cumple
3	5,401	1,250	1,875	2,500	5,317	0,0838	No cumple
4	5,401	1,875	2,188	2,500	5,728	-0,3269	No cumple
5	5,401	1,875	2,031	2,188	5,528	-0,1273	No cumple
6	5,401	1,875	1,953	2,031	5,424	-0,0232	No cumple
7	5,401	1,875	1,914	1,953	5,371	0,0299	No cumple
8	5,401	1,914	1,934	1,953	5,398	0,0032	No cumple
9	5,401	1,934	1,943	1,953	5,411	-0,0100	No cumple
10	5,401	1,934	1,938	1,943	5,405	-0,0034	No cumple
11	5,401	1,934	1,936	1,938	5,401	-0,0001	Cumple
12	5,401	1,934	1,935	1,936	5,400	0,0016	No cumple
13	5,401	1,935	1,935	1,936	5,400	0,0008	Cumple
14	5,401	1,935	1,936	1,936	5,401	0,0003	Cumple
15	5,401	1,936	1,936	1,936	5,401	0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE K-3. DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93 "INA"

a. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	375944,24
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,35
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,50
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	10
Δ PSI	2,50
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

b. Propiedades del concreto hidráulico	
f'c 28 días (kg/cm ²)	255,00
f'c 28 días (psi)	3626,94
Módulo Resiliente "MR" (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura "Sc"(psi)	640,00

c. Coeficientes de drenaje (Cd)	
Calidad de drenaje	Bueno
Tiempo de exposición (%)	30,00%
Coeficiente de drenaje "Cd"	1,00

d. Coeficiente de transferencia de carga (J)	
Tipo de espaldón	Asfalto
Dovelas	Si
Tipo de pavimento rígido	JPCP
Coeficiente de transferencia de carga "J"	3,20

e. Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto "h" (in)	6,00
Espesor de base supuesto "h" (in)	6,00
MR sub-rasante (psi)	13000,00
MR Base est. cemento hidráulico (psi)	615000,00
k compuesto de la sub-rasante "kc" (pci)	1064,43
Estrato rígido	No
Profundidad del estrato rígido (in)	0,00
k sub-rasante corregido "kcr" (pci)	1064,43
Daño relativo "ur"	5,05
k sub-rasante efectivo "ke" (pci)	1007,00
Factor de pérdida de soporte "LS"	1,00
k sub-rasante efectivo corregido por el factor LS "k" (pci)	260,00

Espesor de losa de concreto hidráulico (D)							
Iteración	log W ₁₈ Total	D Inicial	D Promedio	D Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,575	0,000	2,500	5,000	5,434	0,1413	No cumple
2	5,575	2,500	3,750	5,000	5,342	0,2330	No cumple
3	5,575	3,750	4,375	5,000	5,578	-0,0024	No cumple
4	5,575	3,750	4,063	4,375	5,456	0,1188	No cumple
5	5,575	4,063	4,219	4,375	5,516	0,0587	No cumple
6	5,575	4,219	4,297	4,375	5,547	0,0282	No cumple
7	5,575	4,297	4,336	4,375	5,562	0,0129	No cumple
8	5,575	4,336	4,355	4,375	5,570	0,0053	No cumple
9	5,575	4,355	4,365	4,375	5,574	0,0014	No cumple
10	5,575	4,365	4,370	4,375	5,576	-0,0005	Cumple
11	5,575	4,365	4,368	4,370	5,575	0,0005	Cumple
12	5,575	4,368	4,369	4,370	5,575	0,0000	Cumple
13	5,575	4,368	4,368	4,369	5,575	0,0002	Cumple
14	5,575	4,368	4,369	4,369	5,575	0,0001	Cumple
15	5,575	4,369	4,369	4,369	5,575	0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE K-4. CÁLCULO DE DOVELAS "INA"

a. Parámetros de diseño			
Varilla	6	Ancho de la losa (cm)	300,00
Grado	60	Recubrimiento (cm)	15,00
d (in)	0,75	Separación (cm)	30,00
1/8 espesor de losa	Si	Cantidad	10,00
Largo dovela (in)	14,00	Es (psi)	29000000,00
f'c (psi)	3626,94	kd (pci)	300000,00
MR (psi)	3432773,36	z (in)	0,25
k (pci)	260,00	P máx. (lb)	18000,00
μ	0,15	Separación llantas (cm)	180,00
h (in)	6,00	P por llanta (lb)	4500,00

Rigidez relativa "I" (in)	22,21
1.8 I	39,97
Inercia "I" (in ⁴)	0,02
β (in)	0,59
σ_b (psi)	3441,26
fb (psi)	3929,19
fb>rb	Cumple

Dovela	Distancia (in)	Rc	P1	Dovela	Distancia (in)	Rc	P2
1	0,00	1,00	2020,66	7	0,00	1,00	1302,84
2	11,81	0,70	1423,55	8	11,81	0,70	917,85
3	23,62	0,41	826,45	9	23,62	0,41	532,86
4	35,43	0,11	229,34	10	35,43	0,11	147,87
	ND	2,23		6	11,81	0,70	917,85
				5	23,62	0,41	532,86
				4	35,43	0,11	147,87
					ND	3,45	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE K-5. CÁLCULO DE BARRAS DE AMARRE "INA"

Acero requerido		Acero propuesto	
Yc (pcf)	0,087	Varilla	4
h (in)	6,00	Grado	40
L' (in)	118,11	d (in)	0,50
fa	1,5	Área (in ²)	0,20
fs	27000,00	Separación (cm)	50,00
As (in ² /in)	0,0034	Largo de losa (cm)	320,04
As (in ² /ft)	0,0410	Cantidad	7,00
		Largo barra (in)	22,29
		As (in ² /ft)	0,120
As prop > As req			
Cumple			

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice L

Seguidamente, se detalla el costo inicial del pavimento flexible, semi-rígido y rígido de ruta INA por actividad a desarrollar para su construcción para el periodo de diseño de 10 años.

APÉNDICE L-1. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE "INA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		5793,97 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	115,88	₡ 1.176,18	₡ 136.294,57
Ayudante de Operario	115,88	₡ 1.154,92	₡ 133.830,86
Peón	202,79	₡ 1.062,06	₡ 215.374,44
Maestro de obras	115,88	₡ 1.387,27	₡ 160.756,02
Ingeniero	34,76	₡ 3.402,83	₡ 118.295,30
Subtotal Personal			₡ 764.551,18
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 1.146.826,77
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/HH	Monto total
Excavadora	376,61	₡ 32.000,00	₡ 12.051.457,6
Motoniveladora	115,88	₡ 37.000,00	₡ 4.287.537,80
Vagoneta	869,10	₡ 23.000,00	₡ 19.989.196,50
Compactadora Vibratoria	115,88	₡ 31.000,00	₡ 3.592.261,40
Subtotal Equipo			₡ 39.920.453,30
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 41.067.280,07	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD		₡	53.387.464,09

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)		2896,98 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	2896,98	₡ 8.500,00	₡ 24.624.330,00
Subtotal Materiales			₡ 24.624.330,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	86,91	₡ 1.176,18	₡ 102.220,75
Ayudante de Operario	86,91	₡ 1.154,92	₡ 100.372,97
Peón	144,85	₡ 1.062,06	₡ 153.838,62
Maestro de obras	86,91	₡ 1.387,27	₡ 120.566,80
Ingeniero	28,97	₡ 3.402,83	₡ 98.579,25
Subtotal Personal			₡ 575.578,39
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 863.367,58
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	101,39	₡ 23.000,00	₡ 2.332.068,90
Motoniveladora	57,94	₡ 37.000,00	₡ 2.143.765,20
Tanque de agua	57,94	₡ 20.000,00	₡ 1.158.792,00
Compactadora Vibratoria	72,42	₡ 31.000,00	₡ 2.245.159,50
Subtotal Equipo			₡ 7.879.785,60
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 33.367.483,18	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 43.377.728,14	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)		2896,98 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	2896,98	₡ 8.500,00	₡ 24.624.330,00
Subtotal Materiales			₡ 24.624.330,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	86,91	₡ 1.176,18	₡ 102.220,75
Ayudante de Operario	86,91	₡ 1.154,92	₡ 100.372,97
Peón	144,85	₡ 1.062,06	₡ 153.838,62
Maestro de obras	86,91	₡ 1.387,27	₡ 120.566,80

Ingeniero	28,97	₡ 3.402,83	₡ 98.579,25
Subtotal Personal			₡ 575.578,39
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 863.367,58
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	101,39	₡ 23.000,00	₡ 2.332.068,90
Motoniveladora	57,94	₡ 37.000,00	₡ 2.143.765,20
Tanque de agua	57,94	₡ 20.000,00	₡ 1.158.792,00
Compactadora Vibratoria	72,42	₡ 31.000,00	₡ 2.245.159,50
Subtotal Equipo			₡ 7.879.785,60
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 33.367.483,18	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 43.377.728,14	

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		17381,90 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	17381,90	₡ 200,00	₡ 3.476.380,00
Subtotal Materiales			₡ 3.476.380,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	52,15	₡ 1.176,18	₡ 61.332,52
Ayudante de Operario	52,15	₡ 1.154,92	₡ 60.223,85
Peón	86,91	₡ 1.062,06	₡ 92.303,28
Maestro de obras	52,15	₡ 1.387,27	₡ 72.340,17
Ingeniero	26,07	₡ 3.402,83	₡ 88.721,42
Subtotal Personal			₡ 374.921,24
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 562.381,86
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	26,07	₡ 14.000,00	₡ 365.019,90
Distribuidor de asfalto	52,15	₡ 20.000,00	₡ 1.042.914,00
Subtotal Equipo			₡ 1.407.933,90
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.446.695,76	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	
Utilidad	20,00%	₡ 62,67	

TOTAL COSTO UNITARIO	₡	407,36
TOTAL ACTIVIDAD	₡	7.080.704,49

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		4274,21 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	4274,21	₡ 50.000,00	₡213.710.500,00
Subtotal Materiales			₡213.710.500,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	42,74	₡ 1.176,18	₡ 50.272,23
Ayudante de Operario	42,74	₡ 1.154,92	₡ 49.363,49
Peón	94,03	₡ 1.062,06	₡ 99.868,47
Maestro de obras	42,74	₡ 1.387,27	₡ 59.294,83
Ingeniero	19,23	₡ 3.402,83	₡ 65.449,81
Subtotal Personal			₡ 324.248,84
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 486.373,26
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto
Vagoneta	34,19	₡ 23.000,00	₡ 786.454,64
Pavimentadora	34,19	₡ 33.000,00	₡ 1.128.391,44
Compactadora Estática	34,19	₡ 15.000,00	₡ 512.905,20
Compactadora Vibratoria	29,92	₡ 31.000,00	₡ 927.503,57
Compactadora Neumáticos	19,23	₡ 22.000,00	₡ 423.146,79
Subtotal Equipo			₡ 3.778.401,64
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 217.975.274,90	
Costo Unitario	-	₡ 50.997,79	
Imprevistos	5,00%	₡ 2.549,89	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 2.549,89	
Utilidad	20,00%	₡ 10.199,56	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₡	283.367.857,36

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel®.

APÉNDICE L-2. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO "INA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		7725,29 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
			₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			

Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	154,51	₡ 1.176,18	₡ 181.726,01
Ayudante de Operario	154,51	₡ 1.154,92	₡ 178.441,07
Peón	270,39	₡ 1.062,06	₡ 287.165,79
Maestro de obras	154,51	₡ 1.387,27	₡ 214.341,26
Ingeniero	46,35	₡ 3.402,83	₡ 157.727,00
Subtotal Personal			₡ 1.019.401,13
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 1.529.101,70
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Excavadora	502,14	₡ 32.000,00	₡ 16.068.603,20
Motoniveladora	154,51	₡ 37.000,00	₡ 5.716.714,60
Vagoneta	1158,79	₡ 23.000,00	₡ 26.652.250,50
Compactadora Vibratoria	154,51	₡ 31.000,00	₡ 4.789.679,80
Subtotal Equipo			₡ 53.227.248,10
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 54.756.349,80	
Costo Unitario	-	₡ 7.087,93	
Imprevistos	5,00%	₡ 354,40	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 354,40	
Utilidad	20,00%	₡ 1.417,59	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 9.214,31	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 71.183.254,74	

Actividad	Cantidad		
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)	3862,64 m³		
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m³)	3862,64	₡ 8.500,00	₡ 32.832.440,00
Subtotal Materiales			₡ 32.832.440,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	115,88	₡ 1.176,18	₡ 136.294,33
Ayudante de Operario	115,88	₡ 1.154,92	₡ 133.830,63
Peón	193,13	₡ 1.062,06	₡ 205.118,16
Maestro de obras	115,88	₡ 1.387,27	₡ 160.755,74
Ingeniero	38,63	₡ 3.402,83	₡ 131.439,00
Subtotal Personal			₡ 767.437,85
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 1.151.156,78
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	135,19	₡ 23.000,00	₡ 3.109.425,20
Motoniveladora	77,25	₡ 37.000,00	₡ 2.858.353,60
Tanque de agua	77,25	₡ 20.000,00	₡ 1.545.056,00

Compactadora Vibratoria	96,57	₡ 31.000,00	₡ 2.993.546,00
Subtotal Equipo			₡ 10.506.380,80
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto	
Total	-	₡	44.489.977,58
Costo Unitario	-	₡	11.518,02
Imprevistos	5,00%	₡	575,90
Gastos Administrativos	5,00%	₡	575,90
Utilidad	20,00%	₡	2.303,60
TOTAL COSTO UNITARIO			₡ 14.973,43
TOTAL ACTIVIDAD			₡ 57.836.970,85

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)		3862,64 m³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m³)	3592,26	₡ 8.500,00	₡ 30.534.169,20
Saco de cemento hidráulico 50 kg (und)	7571,00	₡ 6.000,00	₡ 45.426.000,00
Subtotal Materiales			₡ 75.960.169,20
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	115,88	₡ 1.176,18	₡ 136.294,33
Ayudante de Operario	115,88	₡ 1.154,92	₡ 133.830,63
Peón	212,45	₡ 1.062,06	₡ 225.629,97
Maestro de obras	115,88	₡ 1.387,27	₡ 160.755,74
Ingeniero	38,63	₡ 3.402,83	₡ 131.439,00
Subtotal Personal			₡ 787.949,67
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 1.181.924,50
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	146,78	₡ 23.000,00	₡ 3.375.947,36
Motoniveladora	77,25	₡ 37.000,00	₡ 2.858.353,60
Tanque de agua	77,25	₡ 20.000,00	₡ 1.545.056,00
Compactadora Vibratoria	96,57	₡ 31.000,00	₡ 2.993.546,00
Back-Hoe	135,19	₡ 14.000,00	₡ 1.892.693,60
Subtotal Equipo			₡ 12.665.596,56
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	89.807.690,26
Costo Unitario	-	₡	23.250,34
Imprevistos	5,00%	₡	1.162,52
Gastos Administrativos	5,00%	₡	1.162,52
Utilidad	20,00%	₡	4.650,07
TOTAL COSTO UNITARIO			₡ 30.225,44
TOTAL ACTIVIDAD			₡ 116.749.997,34

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		17381,90 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (l)	17381,90	₡ 200,00	₡ 3.476.380,00
Subtotal Materiales			₡ 3.476.380,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	52,15	₡ 1.176,18	₡ 61.332,52
Ayudante de Operario	52,15	₡ 1.154,92	₡ 60.223,85
Peón	86,91	₡ 1.062,06	₡ 92.303,28
Maestro de obras	52,15	₡ 1.387,27	₡ 72.340,17
Ingeniero	26,07	₡ 3.402,83	₡ 88.721,42
Subtotal Personal			₡ 374.921,24
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 562.381,86
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	26,07	₡ 14.000,00	₡ 365.019,90
Distribuidor de asfalto	52,15	₡ 20.000,00	₡ 1.042.914,00
Subtotal Equipo			₡ 1.407.933,90
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.446.695,76	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	
Utilidad	20,00%	₡ 62,67	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 407,36	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 7.080.704,49	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		3324,68 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	3324,68	₡ 50.000,00	₡ 166.234.000,00
Subtotal Materiales			₡ 166.234.000,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	33,25	₡ 1.176,18	₡ 39.104,09
Ayudante de Operario	33,25	₡ 1.154,92	₡ 38.397,23
Peón	73,14	₡ 1.062,06	₡ 77.682,36
Maestro de obras	33,25	₡ 1.387,27	₡ 46.122,29
Ingeniero	14,96	₡ 3.402,83	₡ 50.909,91
Subtotal Personal			₡ 252.215,88
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 378.323,82

EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	26,60	₡ 23.000,00	₡ 611.741,12
Pavimentadora	26,60	₡ 33.000,00	₡ 877.715,52
Compactadora Estática	26,60	₡ 15.000,00	₡ 398.961,60
Compactadora Vibratoria	23,27	₡ 31.000,00	₡ 721.455,56
Compactadora Neumáticos	14,96	₡ 22.000,00	₡ 329.143,32
Subtotal Equipo			₡ 2.939.017,12
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 169.551.340,94	
Costo Unitario	-	₡ 50.997,79	
Imprevistos	5,00%	₡ 2.549,89	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 2.549,89	
Utilidad	20,00%	₡ 10.199,56	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 66.297,13	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 220.416.743,22	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE L-3. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO RÍGIDO "INA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		2896,98 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	57,94	₡ 1.176,18	₡ 68.147,17
Ayudante de Operario	57,94	₡ 1.154,92	₡ 66.915,31
Peón	101,39	₡ 1.062,06	₡ 107.687,03
Maestro de obras	57,94	₡ 1.387,27	₡ 80.377,87
Ingeniero	17,38	₡ 3.402,83	₡ 59.147,55
Subtotal Personal			₡ 382.274,93
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 573.412,39
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Excavadora	188,30	₡ 32.000,00	₡ 6.025.718,40
Motoniveladora	57,94	₡ 37.000,00	₡ 2.143.765,20
Vagoneta	434,55	₡ 23.000,00	₡ 9.994.581,00
Compactadora Vibratoria	57,94	₡ 31.000,00	₡ 1.796.127,60
Subtotal Equipo			₡ 19.960.192,20
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 20.533.604,59	

Costo Unitario	-	₡	7.087,93
Imprevistos	5,00%	₡	354,40
Gastos Administrativos	5,00%	₡	354,40
Utilidad	20,00%	₡	1.417,59
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD		₡	26.693.685,97

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25) (CR.302.03)		2896,98 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	2694,19	₡ 8.500,00	₡ 22.900.626,90
Saco de cemento hidráulico 50 kg (und)	5679,00	₡ 6.000,00	₡ 34.074.000,00
Subtotal Materiales			₡ 56.974.626,90
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	86,91	₡ 1.176,18	₡ 102.220,75
Ayudante de Operario	86,91	₡ 1.154,92	₡ 100.372,97
Peón	159,33	₡ 1.062,06	₡ 169.222,48
Maestro de obras	86,91	₡ 1.387,27	₡ 120.566,80
Ingeniero	28,97	₡ 3.402,83	₡ 98.579,25
Subtotal Personal			₡ 590.962,25
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 886.443,38
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	110,09	₡ 23.000,00	₡ 2.531.960,52
Motoniveladora	57,94	₡ 37.000,00	₡ 2.143.765,20
Tanque de agua	57,94	₡ 20.000,00	₡ 1.158.792,00
Compactadora Vibratoria	72,42	₡ 31.000,00	₡ 2.245.159,50
Back-Hoe	101,39	₡ 14.000,00	₡ 1.419.520,20
Subtotal Equipo			₡ 9.499.197,42
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	67.360.267,70
Costo Unitario	-	₡	23.251,89
Imprevistos	5,00%	₡	1.162,59
Gastos Administrativos	5,00%	₡	1.162,59
Utilidad	20,00%	₡	4.650,38
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	30.227,46
TOTAL ACTIVIDAD		₡	87.568.348,00

Actividad		Cantidad	
Colocación de losa de concreto hidráulico con refuerzo (CR.501.01)		19313,22 m ²	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Concreto Hidráulico (m ³)	2896,98	₡120.000,00	₡ 347.637.960,00

Varilla lisa # 6 de 6 m (und) G 60	1174,00	₺ 7.800,00	₺ 9.157.200,00
Varilla corrugada # 4 de 6 m (und) G 40	1315,00	₺ 2.540,00	₺ 3.340.100,00
Backer-road para juntas (und)	29,00	₺ 23.745,00	₺ 688.605,00
Sellador para juntas (cubeta)	49,00	₺ 107.708,00	₺ 5.277.692,00
Subtotal Materiales			₺ 366.101.557,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	154,51	₺ 1.176,18	₺ 181.725,97
Ayudante de Operario	154,51	₺ 1.154,92	₺ 178.441,02
Peón	231,76	₺ 1.062,06	₺ 246.142,04
Maestro de obras	154,51	₺ 1.387,27	₺ 214.341,21
Ingeniero	96,57	₺ 3.402,83	₺ 328.597,83
Subtotal Personal			₺ 1.149.248,07
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₺ 1.723.872,10
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Bomba estacionaria	193,13	₺ 12.000,00	₺ 2.317.586,40
Sierra de concreto	17,38	₺ 7.300,00	₺ 126.887,86
Subtotal Equipo			₺ 2.444.474,26
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₺ 370.269.903,35	
Costo Unitario	-	₺ 19.171,84	
Imprevistos	5,00%	₺ 958,59	
Gastos Administrativos	5,00%	₺ 958,59	
Utilidad	20,00%	₺ 3.834,37	
TOTAL COSTO UNITARIO		₺	24.923,39
TOTAL ACTIVIDAD		₺	481.350.874,36

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice M

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de pavimento flexible, semi-rígido y rígido de la ruta INA según la metodología AASHTO-93 para el periodo de diseño de 15 años.

APÉNDICE M-1. DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO-93 "INA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base Granular	28000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	13000,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño " W_{18} "	420085,72
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño " S_o "	0,45
Índice de servicio inicial " PSI_o "	4,20
Índice de servicio final " PSI_f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,20
Estadístico Z " Z_r "	-0,524

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica " a_1 "	0,441
Coeficiente estructural base granular " a_2 "	0,133
Coeficiente estructural sub-base " a_3 "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular " m_2 "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base " m_3 "	1,00

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica " SN_1 "	1,561
Número estructural base granular " SN_2 "	1,846
Número estructural sub-base " SN_3 "	2,109

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	3,54	8,99	10,00	1,56	1,74
Base Granular	0,83	2,10	15,00	0,11	0,79
Sub-base Granular	-3,22	-8,19	15,00	-0,41	0,76
Total			40,00	1,26	3,28
SN Total > SN Requerido					Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN_1)							
Iteración	$\log W_{18}$ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	$\log W_{18}$	$\log W_{18}$ Total - $\log W_{18}$	Condición
1	5,623	0,000	2,500	5,000	6,861	-1,2372	No cumple
2	5,623	0,000	1,250	2,500	5,103	0,5206	No cumple
3	5,623	1,250	1,875	2,500	6,087	-0,4632	No cumple
4	5,623	1,250	1,563	1,875	5,626	-0,0031	No cumple

5	5,623	1,250	1,406	1,563	5,373	0,2499	No cumple
6	5,623	1,406	1,484	1,563	5,502	0,1213	No cumple
7	5,623	1,484	1,523	1,563	5,565	0,0586	No cumple
8	5,623	1,523	1,543	1,563	5,596	0,0276	No cumple
9	5,623	1,543	1,553	1,563	5,611	0,0122	No cumple
10	5,623	1,553	1,558	1,563	5,619	0,0045	No cumple
11	5,623	1,558	1,560	1,563	5,623	0,0007	Cumple
12	5,623	1,560	1,561	1,563	5,625	-0,0012	No cumple
13	5,623	1,560	1,561	1,561	5,624	-0,0002	Cumple
14	5,623	1,560	1,560	1,561	5,623	0,0002	Cumple
15	5,623	1,560	1,561	1,561	5,623	0,0000	Cumple

Número Estructural de la base granular (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,623	0,000	2,500	5,000	6,437	-0,8142	No cumple
2	5,623	0,000	1,250	2,500	4,680	0,9437	No cumple
3	5,623	1,250	1,875	2,500	5,663	-0,0401	No cumple
4	5,623	1,250	1,563	1,875	5,203	0,4199	No cumple
5	5,623	1,563	1,719	1,875	5,441	0,1828	No cumple
6	5,623	1,719	1,797	1,875	5,554	0,0696	No cumple
7	5,623	1,797	1,836	1,875	5,609	0,0143	No cumple
8	5,623	1,836	1,855	1,875	5,636	-0,0130	No cumple
9	5,623	1,836	1,846	1,855	5,623	0,0006	Cumple
10	5,623	1,846	1,851	1,855	5,630	-0,0062	No cumple
11	5,623	1,846	1,848	1,851	5,626	-0,0028	No cumple
12	5,623	1,846	1,847	1,848	5,624	-0,0011	No cumple
13	5,623	1,846	1,846	1,847	5,624	-0,0002	Cumple
14	5,623	1,846	1,846	1,846	5,623	0,0002	Cumple
15	5,623	1,846	1,846	1,846	5,623	0,0000	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,623	0,000	2,500	5,000	6,087	-0,4641	No cumple
2	5,623	0,000	1,250	2,500	4,330	1,2937	No cumple
3	5,623	1,250	1,875	2,500	5,313	0,3099	No cumple
4	5,623	1,875	2,188	2,500	5,722	-0,0985	No cumple
5	5,623	1,875	2,031	2,188	5,524	0,0998	No cumple
6	5,623	2,031	2,109	2,188	5,624	-0,0007	Cumple
7	5,623	2,031	2,070	2,109	5,574	0,0492	No cumple
8	5,623	2,070	2,090	2,109	5,599	0,0241	No cumple
9	5,623	2,090	2,100	2,109	5,612	0,0117	No cumple
10	5,623	2,100	2,104	2,109	5,618	0,0055	No cumple
11	5,623	2,104	2,107	2,109	5,621	0,0024	No cumple
12	5,623	2,107	2,108	2,109	5,623	0,0008	Cumple

13	5,623	2,108	2,109	2,109	5,623	0,0000	Cumple
14	5,623	2,109	2,109	2,109	5,624	-0,0003	Cumple
15	5,623	2,109	2,109	2,109	5,623	-0,0002	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE M-2. DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO AASHTO-93 "INA"

a. Módulos Resilientes de los materiales (psi)	
Carpeta Asfáltica	450000,00
Base estabilizada. con cemento hidráulico	615000,00
Sub-base Granular	18400,00
Sub-rasante	13000,00

c. Coeficientes estructurales y de drenaje	
Coeficiente estructural capa asfáltica "a ₁ "	0,441
Coeficiente estructural base est. cemento hidráulico "a ₂ "	0,158
Coeficiente estructural sub-base "a ₃ "	0,128
Coeficiente de drenaje base granular "m ₂ "	1,00
Coeficiente de drenaje sub-base "m ₃ "	1,00

b. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	420085,72
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,45
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,30
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,30
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

d. Números Estructurales (in)	
Número estructural capa asfáltica "SN ₁ "	0,188
Número estructural base est. cemento hidráulico "SN ₂ "	1,843
Número estructural sub-base "SN ₃ "	2,104

e. Espesores					
Material	h Teórico (in)	h Teórico (cm)	h Propuesto (cm)	SN Requerido (in)	SN Total (in)
Carpeta Asfáltica	0,43	1,08	7,00	0,19	1,22
Base es con cemento hidráulico	3,98	10,10	20,00	0,63	1,24
Sub-base Granular	2,77	7,05	20,00	0,36	1,01
Total			47,00	1,17	3,47
SN Total > SN Requerido					Cumple

Número Estructural de la capa asfáltica (SN ₁)							
Iteración	log W ₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,623	0,000	2,500	5,000	9,983	-4,3594	No cumple
2	5,623	0,000	1,250	2,500	8,217	-2,5933	No cumple
3	5,623	0,000	0,625	1,250	6,897	-1,2739	No cumple
4	5,623	0,000	0,313	0,625	6,030	-0,4062	No cumple
5	5,623	0,000	0,156	0,313	5,514	0,1089	No cumple
6	5,623	0,156	0,234	0,313	5,780	-0,1568	No cumple
7	5,623	0,156	0,195	0,234	5,649	-0,0261	No cumple
8	5,623	0,156	0,176	0,195	5,582	0,0408	No cumple
9	5,623	0,176	0,186	0,195	5,616	0,0072	No cumple
10	5,623	0,186	0,190	0,195	5,633	-0,0095	No cumple
11	5,623	0,186	0,188	0,190	5,624	-0,0011	No cumple
12	5,623	0,186	0,187	0,188	5,620	0,0030	No cumple

13	5,623	0,187	0,187	0,188	5,622	0,0009	No cumple
14	5,623	0,187	0,188	0,188	5,623	-0,0001	Cumple
15	5,623	0,187	0,188	0,188	5,623	0,0004	Cumple

Número Estructural de la base estabilizada con cemento (SN₂)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,623	0,000	2,500	5,000	6,447	-0,8236	No cumple
2	5,623	0,000	1,250	2,500	4,681	0,9425	No cumple
3	5,623	1,250	1,875	2,500	5,667	-0,0440	No cumple
4	5,623	1,250	1,563	1,875	5,206	0,4177	No cumple
5	5,623	1,563	1,719	1,875	5,444	0,1798	No cumple
6	5,623	1,719	1,797	1,875	5,557	0,0662	No cumple
7	5,623	1,797	1,836	1,875	5,613	0,0107	No cumple
8	5,623	1,836	1,855	1,875	5,640	-0,0168	No cumple
9	5,623	1,836	1,846	1,855	5,626	-0,0031	No cumple
10	5,623	1,836	1,841	1,846	5,620	0,0038	No cumple
11	5,623	1,841	1,843	1,846	5,623	0,0004	Cumple
12	5,623	1,843	1,844	1,846	5,625	-0,0014	No cumple
13	5,623	1,843	1,844	1,844	5,624	-0,0005	Cumple
14	5,623	1,843	1,844	1,844	5,623	-0,0001	Cumple
15	5,623	1,843	1,843	1,844	5,623	0,0001	Cumple

Número Estructural de la sub-base granular (SN₃)							
Iteración	log W₁₈ Total	SN Inicial	SN Promedio	SN Final	log W₁₈	log W₁₈ Total - log W₁₈	Condición
1	5,623	0,000	2,500	5,000	6,097	-0,4736	No cumple
2	5,623	0,000	1,250	2,500	4,331	1,2925	No cumple
3	5,623	1,250	1,875	2,500	5,317	0,3060	No cumple
4	5,623	1,875	2,188	2,500	5,728	-0,1048	No cumple
5	5,623	1,875	2,031	2,188	5,528	0,0948	No cumple
6	5,623	2,031	2,109	2,188	5,630	-0,0064	No cumple
7	5,623	2,031	2,070	2,109	5,579	0,0439	No cumple
8	5,623	2,070	2,090	2,109	5,605	0,0187	No cumple
9	5,623	2,090	2,100	2,109	5,617	0,0061	No cumple
10	5,623	2,100	2,104	2,109	5,623	-0,0001	Cumple
11	5,623	2,100	2,102	2,104	5,620	0,0030	No cumple
12	5,623	2,102	2,103	2,104	5,622	0,0015	No cumple
13	5,623	2,103	2,104	2,104	5,623	0,0007	Cumple
14	5,623	2,104	2,104	2,104	5,623	0,0003	Cumple
15	5,623	2,104	2,104	2,104	5,623	0,0001	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE M-3. DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO-93 "INA"

a. Parámetros de diseño	
Ejes Equivalentes de diseño "W ₁₈ "	626993,61
Nivel de confianza "R"	70,00
Desviación Estándar de desempeño "S _o "	0,35
Índice de servicio inicial "PSI _o "	4,50
Índice de servicio final "PSI _f "	2,00
Periodo de diseño (años)	15
Δ PSI	2,50
Estadístico Z "Z _r "	-0,524

b. Propiedades del concreto hidráulico	
f'c 28 días (kg/cm ²)	255,00
f'c 28 días (psi)	3626,94
Módulo Resiliente "MR" (psi)	3432773,36
Módulo de ruptura "Sc"(psi)	640,00

c. Coeficientes de drenaje (Cd)	
Calidad de drenaje	Bueno
Tiempo de exposición (%)	30,00%
Coeficiente de drenaje "Cd"	1,00

d. Coeficiente de transferencia de carga (J)	
Tipo de espaldón	Asfalto
Dovelas	Si
Tipo de pavimento rígido	JPCP
Coeficiente de transferencia de carga "J"	3,20

e. Módulo de reacción de la sub-rasante	
Espesor de losa supuesto "h" (in)	6,00
Espesor de base supuesto "h" (in)	6,00
MR sub-rasante (psi)	13000,00
MR Base est. cemento hidráulico (psi)	615000,00
k compuesto de la sub-rasante "kc" (pci)	1064,43
Estrato rígido	No
Profundidad del estrato rígido (in)	0,00
k sub-rasante corregido "kcr" (pci)	1064,43
Daño relativo "ur"	5,05
k sub-rasante efectivo "ke" (pci)	1007,00
Factor de pérdida de soporte "LS"	1,00
k sub-rasante efectivo corregido por el factor LS "k" (pci)	260,00

Espesor de losa de concreto hidráulico (D)							
Iteración	log W ₁₈ Total	D Inicial	D Promedio	D Final	log W ₁₈	log W ₁₈ Total - log W ₁₈	Condición
1	5,797	0,000	2,500	5,000	5,434	0,3634	No cumple
2	5,797	2,500	3,750	5,000	5,342	0,4552	No cumple
3	5,797	3,750	4,375	5,000	5,578	0,2197	No cumple
4	5,797	4,375	4,688	5,000	5,701	0,0966	No cumple
5	5,797	4,688	4,844	5,000	5,762	0,0352	No cumple
6	5,797	4,844	4,922	5,000	5,793	0,0047	No cumple
7	5,797	4,922	4,961	5,000	5,808	-0,0105	No cumple
8	5,797	4,922	4,941	4,961	5,800	-0,0029	No cumple
9	5,797	4,922	4,932	4,941	5,796	0,0009	No cumple
10	5,797	4,932	4,937	4,941	5,798	-0,0010	No cumple
11	5,797	4,932	4,934	4,937	5,797	0,0000	Cumple
12	5,797	4,932	4,933	4,934	5,797	0,0005	Cumple
13	5,797	4,933	4,933	4,934	5,797	0,0002	Cumple
14	5,797	4,933	4,934	4,934	5,797	0,0001	Cumple
15	5,797	4,934	4,934	4,934	5,797	0,0000	Cumple

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE M-4. CÁLCULO DE DOVELAS "INA"

a. Parámetros de diseño			
Varilla	6	Ancho de la losa (cm)	300,00
Grado	60	Recubrimiento (cm)	15,00
d (in)	0,75	Separación (cm)	30,00
1/8 espesor de losa	Si	Cantidad	10,00
Largo dovela (in)	14,00	Es (psi)	29000000,00
f'c (psi)	3626,94	kd (pci)	300000,00
MR (psi)	3432773,36	z (in)	0,25
k (pci)	260,00	P máx. (lb)	18000,00
μ	0,15	Separación llantas (cm)	180,00
h (in)	6,00	P por llanta (lb)	4500,00

Rigidez relativa "I" (in)	22,21
1.8 I	39,97
Inercia "I" (in ⁴)	0,02
β (in)	0,59
σ_b (psi)	3441,26
fb (psi)	3929,19
fb>rb	Cumple

Dovela	Distancia (in)	Rc	P1	Dovela	Distancia (in)	Rc	P2
1	0,00	1,00	2020,66	7	0,00	1,00	1302,84
2	11,81	0,70	1423,55	8	11,81	0,70	917,85
3	23,62	0,41	826,45	9	23,62	0,41	532,86
4	35,43	0,11	229,34	10	35,43	0,11	147,87
	ND	2,23		6	11,81	0,70	917,85
				5	23,62	0,41	532,86
				4	35,43	0,11	147,87
					ND	3,45	

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE M-5. CÁLCULO DE BARRAS DE AMARRE "INA"

Acero requerido		Acero propuesto	
Yc (pcf)	0,087	Varilla	4
h (in)	6,00	Grado	40
L' (in)	118,11	d (in)	0,50
fa	1,5	Área (in ²)	0,20
fs	27000,00	Separación (cm)	50,00
As (in ² /in)	0,0034	Largo de losa (cm)	320,04
As (in ² /ft)	0,0410	Cantidad.	7,00
		Largo barra (in)	22,29
		As (in ² /ft)	0,120
As prop > As req			
Cumple			

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice N

A continuación, se define el costo inicial del pavimento flexible de ruta INA por actividad a desarrollar para su construcción para el periodo de diseño de 15 años. El detalle del costo de los pavimentos semi-rígido y rígidos se encuentran en

los apéndices L-2 y L-3 respectivamente, ya que presentan los mismos espesores de capa que los pavimentos del periodo anterior

APÉNDICE N-1. COSTO POR ACTIVIDADES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE "INA"

Actividad		Cantidad	
Excavación de la vía (CR.203.03)		5793,97 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
-	-	-	₡ -
Subtotal Materiales			₡ -
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	115,88	₡ 1.176,18	₡ 136.294,57
Ayudante de Operario	115,88	₡ 1.154,92	₡ 133.830,86
Peón	202,79	₡ 1.062,06	₡ 215.374,44
Maestro de obras	115,88	₡ 1.387,27	₡ 160.756,02
Ingeniero	34,76	₡ 3.402,83	₡ 118.295,30
Subtotal Personal			₡ 764.551,18
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 1.146.826,77
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/HH	Monto total
Excavadora	376,61	₡ 32.000,00	₡ 12.051.457,6
Motoniveladora	115,88	₡ 37.000,00	₡ 4.287.537,80
Vagoneta	869,10	₡ 23.000,00	₡ 19.989.196,50
Compactadora Vibratoria	115,88	₡ 31.000,00	₡ 3.592.261,40
Subtotal Equipo			₡ 39.920.453,30
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡	41.067.280,07
Costo Unitario	-	₡	7.087,93
Imprevistos	5,00%	₡	354,40
Gastos Administrativos	5,00%	₡	354,40
Utilidad	20,00%	₡	1.417,59
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	9.214,31
TOTAL ACTIVIDAD		₡	53.387.464,09

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular (CR.301.06)		2896,98 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Sub-base granular (m ³)	2896,98	₡ 8.500,00	₡ 24.624.330,00
Subtotal Materiales			₡ 24.624.330,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	86,91	₡ 1.176,18	₡ 102.220,75
Ayudante de Operario	86,91	₡ 1.154,92	₡ 100.372,97
Peón	144,85	₡ 1.062,06	₡ 153.838,62
Maestro de obras	86,91	₡ 1.387,27	₡ 120.566,80
Ingeniero	28,97	₡ 3.402,83	₡ 98.579,25
Subtotal Personal			₡ 575.578,39
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 863.367,58
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	101,39	₡ 23.000,00	₡ 2.332.068,90
Motoniveladora	57,94	₡ 37.000,00	₡ 2.143.765,20
Tanque de agua	57,94	₡ 20.000,00	₡ 1.158.792,00
Compactadora Vibratoria	72,42	₡ 31.000,00	₡ 2.245.159,50
Subtotal Equipo			₡ 7.879.785,60
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 33.367.483,18	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡ 14.973,43	
TOTAL ACTIVIDAD		₡ 43.377.728,14	

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de base granular (CR.301.03)		2896,98 m ³	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Base granular (m ³)	2896,98	₡ 8.500,00	₡ 24.624.330,00
Subtotal Materiales			₡ 24.624.330,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	86,91	₡ 1.176,18	₡ 102.220,75
Ayudante de Operario	86,91	₡ 1.154,92	₡ 100.372,97
Peón	144,85	₡ 1.062,06	₡ 153.838,62
Maestro de obras	86,91	₡ 1.387,27	₡ 120.566,80

Ingeniero	28,97	₡ 3.402,83	₡ 98.579,25
Subtotal Personal			₡ 575.578,39
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 863.367,58
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Vagoneta	101,39	₡ 23.000,00	₡ 2.332.068,90
Motoniveladora	57,94	₡ 37.000,00	₡ 2.143.765,20
Tanque de agua	57,94	₡ 20.000,00	₡ 1.158.792,00
Compactadora Vibratoria	72,42	₡ 31.000,00	₡ 2.245.159,50
Subtotal Equipo			₡ 7.879.785,60
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 33.367.483,18	
Costo Unitario	-	₡ 11.518,02	
Imprevistos	5,00%	₡ 575,90	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 575,90	
Utilidad	20,00%	₡ 2.303,60	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	14.973,43
TOTAL ACTIVIDAD		₡	43.377.728,14

Actividad		Cantidad	
Riego de imprimación (CR.413.02)		17381,90 L	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Emulsión asfáltica (I)	17381,90	₡ 200,00	₡ 3.476.380,00
Subtotal Materiales			₡ 3.476.380,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	52,15	₡ 1.176,18	₡ 61.332,52
Ayudante de Operario	52,15	₡ 1.154,92	₡ 60.223,85
Peón	86,91	₡ 1.062,06	₡ 92.303,28
Maestro de obras	52,15	₡ 1.387,27	₡ 72.340,17
Ingeniero	26,07	₡ 3.402,83	₡ 88.721,42
Subtotal Personal			₡ 374.921,24
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 562.381,86
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto total
Barredora	26,07	₡ 14.000,00	₡ 365.019,90
Distribuidor de asfalto	52,15	₡ 20.000,00	₡ 1.042.914,00
Subtotal Equipo			₡ 1.407.933,90
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 5.446.695,76	
Costo Unitario	-	₡ 313,35	
Imprevistos	5,00%	₡ 15,67	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 15,67	

Utilidad	20,00%	₡	62,67
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	407,36
TOTAL ACTIVIDAD		₡	7.080.704,49

Actividad		Cantidad	
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente (CR.401.01)		4749,12 ton	
MATERIALES			
Material	Cantidad	Costo/Und	Monto total
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	4749,12	₡ 50.000,00	₡237.456.000,00
Subtotal Materiales			₡237.456.000,00
MANO DE OBRA			
Personal	Horas	Costo/Hora	Monto total
Operador	47,49	₡ 1.176,18	₡ 55.858,01
Ayudante de Operario	47,49	₡ 1.154,92	₡ 54.848,30
Peón	104,48	₡ 1.062,06	₡ 110.964,92
Maestro de obras	47,49	₡ 1.387,27	₡ 65.883,12
Ingeniero	21,37	₡ 3.402,83	₡ 72.721,97
Subtotal Personal			₡ 360.276,32
Subtotal Mano de Obra (Con Cargas Sociales)			₡ 540.414,48
EQUIPO			
Equipo	Horas	Costo/Hora	Monto
Vagoneta	37,99	₡ 23.000,00	₡ 873.838,08
Pavimentadora	37,99	₡ 33.000,00	₡ 1.253.767,68
Compactadora Estática	37,99	₡ 15.000,00	₡ 569.894,40
Compactadora Vibratoria	33,24	₡ 31.000,00	₡ 1.030.559,04
Compactadora Neumáticos	21,37	₡ 22.000,00	₡ 470.162,88
Subtotal Equipo			₡ 4.198.222,08
TOTAL DE LA ACTIVIDAD			
	Porcentaje	Monto total	
Total	-	₡ 242.194.636,56	
Costo Unitario	-	₡ 50.997,79	
Imprevistos	5,00%	₡ 2.549,89	
Gastos Administrativos	5,00%	₡ 2.549,89	
Utilidad	20,00%	₡ 10.199,56	
TOTAL COSTO UNITARIO		₡	66.297,13
TOTAL ACTIVIDAD		₡	314.853.027,52

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice O

A continuación, como parte del plan de conservación se detallan algunos de los deterioros a los que puede estar más propensa cada estructura de pavimentos, así como un

formulario base para que las autoridades respectivas puedan ejecutar una inspección adecuada de las rutas en general.

APÉNDICE O-1. PLAN DE CONSERVACIÓN			
PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMI-RÍGIDOS			
DETERIORO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	INTERVENCIÓN
Cuero de Lagarto	Grietas que se encuentran interconectadas debido a la fatiga, inician en el fondo de la capa asfáltica hacia la superficie, se da únicamente en áreas donde el tránsito es muy repetitivo como las huellas de estos.	Acción repetida de las cargas de tránsito, ligante envejecido, subdrenaje inadecuado.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, sellos asfálticos, tratamientos superficiales, bacheo y sustitución de losa.
Grietas Longitudinales y transversales	Discontinuidades en la capa asfáltica, en dirección o transversal al tránsito, son indicio de que existe un esfuerzo de tensión en alguna capa	Reflexión de grietas por grietas existentes, juntas de construcción mal diseñadas, fatiga de la estructura.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, sellos de fisuras o grietas y bacheo.
Roderas y Ahuellamiento	Depresión en las huellas del vehículo, por una deformación permanente de cualquier capa, generalmente su causa es debido a la consolidación o movimiento lateral de los materiales.	Malas técnicas de construcción, inestabilidad en capas, sobrecargas, altos volúmenes de tránsito, mala calidad de materiales.	Bacheo, sellos asfálticos, tratamientos superficiales, sobrecapa o sustitución de capa asfáltica.
Abultamientos y Hundimientos	Los abultamientos son desplazamientos pequeños hacia arriba de la capa asfáltica, los hundimientos son desplazamientos abruptos hacia abajo.	Malas técnicas de construcción, levantamientos localizados, mala calidad de materiales.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, bacheo y sustitución de capa asfáltica.
Depresiones	Son áreas localizadas ligeramente más bajas que la superficie del pavimento.	Malas técnicas de construcción, inestabilidad en capas, mala calidad de materiales.	Bacheo y sustitución de capa asfáltica.
Hinchamiento	Los hinchamientos son un tipo de abultamiento de la superficie del pavimento creando una onda larga de más de 3 metros, una causa de esto pueden ser los suelos expansivos.	Suelos expansivos como las arcillas.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, bacheo, estabilización de capas granulares y sustitución de capa asfáltica.
Corrimiento	Desplazamiento longitudinal permanente de un área localizada debido a las cargas del tránsito.	Mezclas asfálticas poco estables, mala ejecución del riego de liga.	Bacheo y sustitución de capa asfáltica.

Exudación	Película delgada de ligante asfáltico en la superficie que forma un pequeño reflejo, suele ser pegajosa.	Excesivo contenido de asfalto en mezcla asfáltica, bajo contenido de vacíos, asfaltos muy blandos.	Sello de arena, sellos asfálticos, sobrecapa o y sustitución de capa asfáltica.
Pulimiento de agregados	Porción de agregado que se extiende por encima del asfalto es o muy pequeña.	Excesiva repetición de cargas de tránsito, uso de agregados propensos al pulimiento.	Sellos asfálticos y tratamientos superficiales asfálticos.
Baches	Área de pavimento que ha sido reemplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente, siempre es considerado un defecto no importa su desempeño y estado.	Deterioros importantes en la sección del pavimento a reemplazar.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, sustitución del bacheo, sustitución de capa asfáltica.
Huecos	Son depresiones en la superficie, poseen forma de tazón, usualmente el diámetro es menor a 75.00 cm.	Fundaciones y capas inferiores inestables, espesores inadecuados, mala construcción, excesiva repetición de cargas de tránsito.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, bacheo, sustitución de capa asfáltica.
PAVIMENTOS RÍGIDOS			
DETERIORO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	INTERVENCIÓN
Agrietamiento Lineal	Grietas que dividen la losa en 2 o 3 piezas.	Asentamiento de capas, repetición de cargas, espesores inadecuados.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, sellado de juntas y grietas, reparación losa.
Grieta por contracción	Grietas finas que no se extienden en toda la losa, ni en todo el espesor, menores a 2 m.	Diferencia de contracciones que produce tensiones.	Evaluar área afectada para definir la mejor intervención.
Losa dividida	Grietas que dividen la losa en 4 o más partes.	Sobrecarga, fatiga del concreto, capacidad de soporte deficiente.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, sellado de juntas y grietas, reparación losa.
Daño en el sello de junta	Aquellas condiciones en el sello que permita la acumulación de material en las juntas y que permita el paso del agua a las capas inferiores.	Material de sello inadecuado, pérdida de adherencia, endurecimiento por oxidación.	Limpieza y sellado de juntas y grietas.
Fracturas de esquina	Fractura de la losa a 0.50 m de la esquina de la losa, se alinean para intersectar la junta.	Tensiones en las juntas, debilidad del concreto, deficientes sistema de transferencia de cargas.	Revisión de sistema de drenaje superficial y subdrenajes, sellado de juntas y grietas, reparación losa.
Fracturas de junta	Fractura en los bordes de la losa de 5.00 cm aproximadamente de grosor.	Tensiones en las juntas, debilidad del concreto, deficientes sistema de transferencia de cargas.	Sellado de juntas y grietas, reparación losa.
Pulimiento de agregados	Falla cuando el agregado es muy pequeño o se encuentra sin superficie rugosa que permita un agarre adecuado.	Excesiva repetición de cargas de tránsito, concreto de mala calidad.	Cepillado y reparación de losa en espesores parciales.

Desprendimientos de agregados	Desprendimiento de algunas piezas de agregado grueso, dejan un hueco con diámetros de generalmente entre 25.00-100.00 mm y profundidades entre 13.00-50.00 mm.	Concreto débil, partículas blandas y exceso de cargas de tránsito.	Reparación de losa en espesores parciales.
Escalonamiento Calzada-Junta	Diferencia que hay entre la elevación de una junta y la losa.	Asentamiento o erosión, infiltración del agua, deficiencias en la transferencia de cargas.	Revisión del sistema de drenaje, reparación losa.
Bombeo	Salida del material de fundación que se encuentra en la base a través de juntas o grietas.	Deflexión de la losa por las cargas, erosión, pérdida de soporte.	Revisión del sistema de drenaje, sellado de juntas y grietas.

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

APÉNDICE O-2. FORMULARIO PARA INSPECCIÓN DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS						
INSPECCIÓN DE PAVIMENTOS						
Fecha				Longitud Total		
Código de Ruta				Inspector		
Provincia, Cantón y Distrito	, ,			Coordenadas		
Est. Inicial / Est. Final	/			Equipo de medición		
DETERIORO	SEVERIDAD			MEDIDA		
	Alto	Media	Bajo	Alto	Media	Bajo
ESQUEMA				OBSERVACIONES		

Fuente: Elaboración propia, Microsoft Excel ®.

Apéndice P

Fotografías que evidencian el estado actual que presenta cada ruta, así como de los sondeos para la extracción de material realizados.



Figura Ap. P-1. Ruta La Cecilia (a).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-3. Ruta La Cecilia (c).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-2. Ruta La Cecilia (b).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-4. Ruta La Cecilia (d).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-5. Ruta Parque el Silencio (Sector Parque el Silencio a).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-7. Ruta Parque el Silencio (Sector Liceo a).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-6. Ruta Parque el Silencio (Sector Parque el Silencio b).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-8. Ruta Parque el Silencio (Sector Liceo b).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-9. Ruta INA (a).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P 11. Ruta INA (c).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-10. Ruta INA (b).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P 12. Ruta INA (d).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-13. Extracción material Ruta Parque el Silencio (Sector Parque el Silencio).
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-15. Extracción material Ruta INA.
Fuente: Elaboración propia.



Figura Ap. P-14. Extracción material Ruta Parque el Silencio (Sector Liceo).
Fuente: Elaboración propia.

Anexos

Anexo A

Características principales de los suelos por ruta.

Anexo B

Gráficas y cuadros para el diseño de estructura de pavimento según la metodología AASHTO-93.

Anexo A

En este anexo se detallan un resumen de los informes de suelos en los cuales se especifican las características principales de las sub-rasantes que se encuentran en las tres rutas aplicándoles el percentil 90.

ANEXO A-1. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-RASANTE "LA CECILIA"								
Muestra	Pasando N° 200 (%)	Humedad Óptima (%)	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)	Gravedad específica	Densidad seca máxima	CBR (%)	Suelo (AASHTO)
1	30,90	18,70	35,00	13,00	2,556	1705,00	7,00	A-2-6 (0)
2	40,00	20,50	40,00	17,00	2,556	1625,00	5,80	A-6 (3)
3	57,80	30,20	52,00	22,00	2,549	1387,00	6,80	A-7-5 (12)
4	54,50	25,40	51,00	25,00	2,559	1498,00	6,10	A-7-5 (11)
5	36,30	21,10	43,00	18,00	2,574	1605,00	6,30	A-7-5 (3)
6	37,20	18,10	37,00	16,00	2,466	1702,00	6,60	A-6 (2)
Percentil 90	33,60	18,40	36,00	14,50	2,508	1442,50	5,95	A-2-6 (0)

Fuente: Vieto (2018), Microsoft Excel ®.

ANEXO A-2. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-BASE "LA CECILIA"			
Parámetro	Sub-base (La Cecilia)	Sub-base B	Condición
Pasando 50 mm (%)	84,20	100	No cumple
Pasando 37.5 mm (%)	75,40	97-100	No cumple
Pasando 4.75 mm (%)	34,00	40-60	No cumple
Pasando 75 um (%)	7,78	4-12	Cumple
Límite Líquido	NP	35	NA
Índice de Plasticidad	NP	4-10	NA
CBR	59.8	30	Cumple

Fuente: U.T.G.V Municipalidad de Turrialba (2019), Microsoft Excel ®.

ANEXO A-3. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-RASANTE "PARQUE EL SILENCIO"									
Muestra	Pasando N° 200 (%)	Humedad Óptima (%)	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)	Gravedad específica	Densidad seca máxima (kg/m³)	CBR (%)		Suelo (AASHTO)
							0.1"	0.2"	
1	21,20	43,20	83,00	16,00	2,577	1067,00	6,00	5,40	A-2-7 (0)
2	16,30	34,20	67,00	10,00	2,617	1242,00	14,00	12,00	A-2-5 (0)
3	12,30	37,10	67,00	12,00	2,622	1293,00	6,30	6,80	A-2-7 (0)
Percentil 90	13,10	34,78	67,00	10,40	2,585	1102,00	6,06	5,68	A-2-5 (0)

Fuente: CIVCO (2020), Microsoft Excel ®.

ANEXO A-4. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-RASANTE "INA"									
Muestra	Pasando N° 200 (%)	Humedad Óptima (%)	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)	Gravedad específica	Densidad seca máxima (kg/m ³)	CBR (%)		Suelo (AASHTO)
							0.1"	0.2"	
1	57,10	38,40	59,00	14,00	2,539	1284,00	11,20	8,90	A-7-5 (8)
2	53,30	33,60	65,00	22,00	2,598	1296,00	10,60	9,30	A-7-5 (10)
3	53,40	37,90	64,00	15,00	2,664	1270,00	13,00	16,30	A-7-5 (8)
4	62,10	30,30	43,00	7,00	2,726	1398,00	15,00	13,80	A-5 (4)
5	58,30	38,20	61,00	14,00	2,672	1260,00	5,70	6,80	A-7-5 (0)
6	14,70	27,00	49,00	17,00	2,640	1445,00	13,40	11,60	A-2-7 (0)
Percentil 90	34,00	28,65	46,00	10,50	2,569	1265,00	8,15	7,85	A-2-5 (0)

Fuente: CIVCO (2020), Microsoft Excel ®.

Anexo B

En este anexo se detallan las gráficas y cuadros tomados de diferentes fuentes bibliográficas para la determinación de algunos de los parámetros de diseño de una estructura de pavimentos basados en la metodología AASHTO-93.

ANEXO B-1. RESUMEN CLIMATOLÓGICO ESTACIÓN "CATIE"								
Mes	Temperatura (°C)			Precipitación (mm)	Días con lluvia (mm)	V. Viento (m/s)	Humedad (%)	Radiación (MJ/m ²)
	Máx	Mín	Med					
Enero	28,10	18,00	23,05	105,50	15,00	0,50	85,80	15,00
Febrero	26,90	17,60	22,25	303,80	20,00	0,60	87,10	13,20
Marzo	28,90	19,00	23,95	29,00	9,00	0,60	86,20	17,90
Abril	30,00	19,00	24,50	31,70	13,00	0,60	83,10	16,70
Mayo	30,40	20,30	25,35	179,10	20,00	0,60	85,40	13,70
Junio	29,50	19,70	24,60	267,90	24,00	0,50	88,20	12,70
Julio	28,80	19,10	23,95	217,60	25,00	0,50	89,50	11,50
Agosto	29,30	19,40	24,35	181,80	24,00	0,50	88,90	13,20
Septiembre	29,40	19,20	24,30	115,80	21,00	0,50	87,80	16,20
Octubre	29,30	19,70	24,50	308,20	22,00	0,50	89,70	13,50
Noviembre	27,70	19,60	23,65	349,70	25,00	0,50	90,60	9,60
Diciembre	28,30	18,60	23,45	188,30	23,00	0,50	90,40	10,60

Fuente: CATIE (2019), Microsoft Excel®.

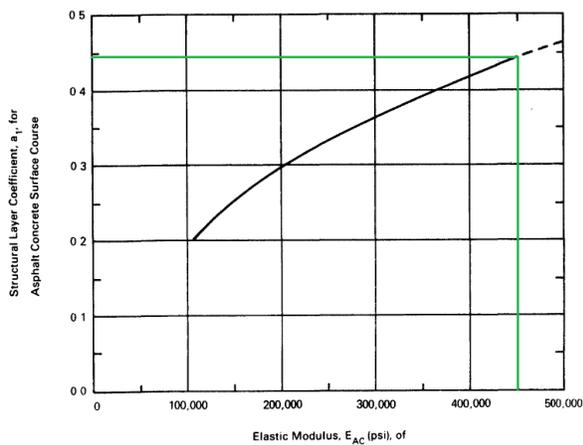


Figura A-1. Nomograma Mezcla Asfáltica.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

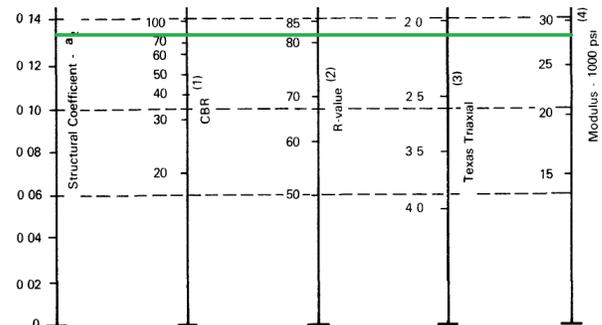


Figura A-2. Nomograma Base Granular.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

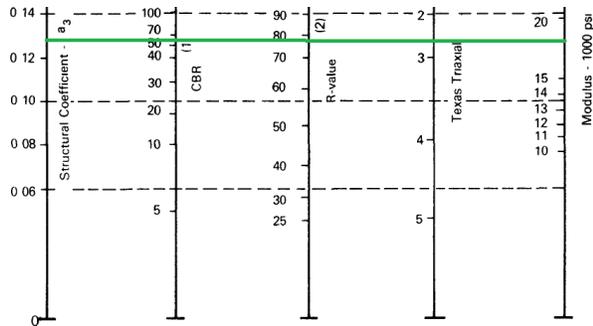


Figura A-3. Nomograma Sub-base Granular.
Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

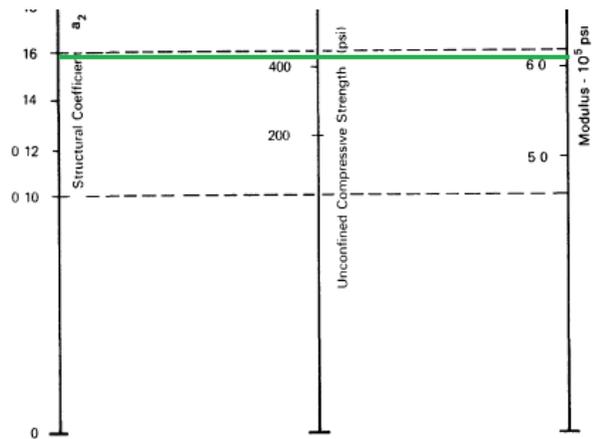


Figura A-4. Nomograma Base estabilizada con cemento hidráulico (BE-25).
Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

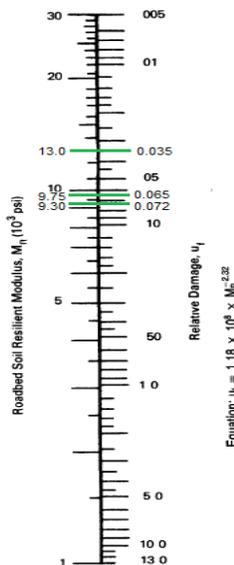


Figura A-5. Nomograma Daño Relativo.
Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Figura A-6. Período de diseño.
Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (Coronado, 2002).

Zona	TPD	Nivel de confianza	Índice de servicio terminal PSI
Rutas primarias	Menor a 500	75,00	2,00
	Entre 500 y 2000	85,00	2,50
	Mayor a 2000	90,00	2,50
Rutas secundarias	Menor a 500	70,00	2,00
	Entre 500 y 2000	80,00	2,00
	Mayor a 2000	85,00	2,50
Rutas terciarias	Menor a 500	70,00	2,00
	Entre 500 y 2000	75,00	2,00
	Mayor a 2000	80,00	2,00

Figura A-7. Niveles de confianza e índices terminales de servicio (R y PSIfinal).
Fuente: Oficio DVOP-5170-07, (Castro, 2007).

Table 4.1. Standard Normal Deviate (Z_R) Values Corresponding to Selected Levels of Reliability

Reliability, R (percent)	Standard Normal Deviate, Z _R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Figura A-8. Desviación estándar normal (Z_R).
Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

Table 2.4. Recommended m₁ Values for Modifying Structural Layer Coefficients of Untreated Base and Subbase Materials in Flexible Pavements

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	Greater Than 25%
Excellent	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Good	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Fair	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Poor	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Very poor	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Figura A-9. Coeficiente de drenaje (m₁) (Pavimentos flexibles y semi-rígidos).
Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 - 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 - 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Figura A-10. Espesores mínimos.

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (Coronado, 2002).

Table 2.5. Recommended Values of Drainage Coefficient, C_d , for Rigid Pavement Design

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	Greater Than 25%
Excellent	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Good	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Fair	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Poor	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Very poor	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Figura A-11. Coeficiente de drenaje (C_d) (Pavimento rígido).

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

Table 2.6. Recommended Load Transfer Coefficient for Various Pavement Types and Design Conditions

Shoulder	Asphalt		Tied P.C.C.	
	Yes	No	Yes	No
Pavement Type				
1 Plain jointed and jointed reinforced	3.2	3.8-4.4	2.5-3.1	3.6-4.2
2 CRCP	2.9-3.2	N/A	2.3-2.9	N/A

Figura A-12. Coeficiente de transferencia de carga (J).

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

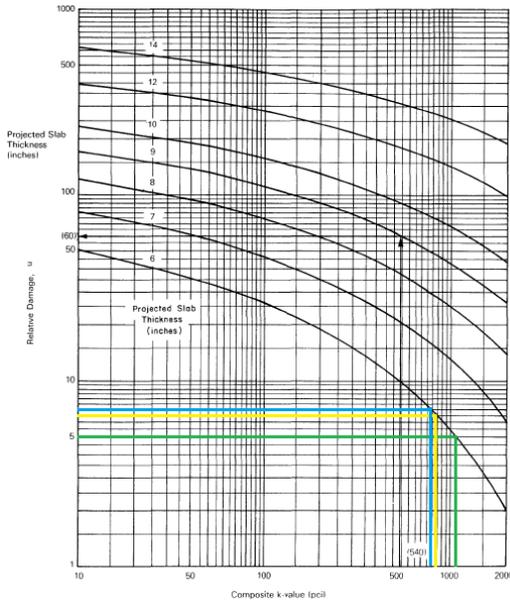


Figura A-13. Nomograma k efectivo.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

Table 2.7. Typical Ranges of Loss of Support (LS) Factors for Various Types of Materials (6)

Type of Material	Loss of Support (LS)
Cement Treated Granular Base ($E = 1,000,000$ to $2,000,000$ psi)	0.0 to 1.0
Cement Aggregate Mixtures ($E = 500,000$ to $1,000,000$ psi)	0.0 to 1.0
Asphalt Treated Base ($E = 350,000$ to $1,000,000$ psi)	0.0 to 1.0
Bituminous Stabilized Mixtures ($E = 40,000$ to $300,000$ psi)	0.0 to 1.0
Lime Stabilized ($E = 20,000$ to $70,000$ psi)	1.0 to 3.0
Unbound Granular Materials ($E = 15,000$ to $45,000$ psi)	1.0 to 3.0
Fine Grained or Natural Subgrade Materials ($E = 3,000$ to $40,000$ psi)	2.0 to 3.0

Figura A-14. Pérdida potencial de Soporte.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

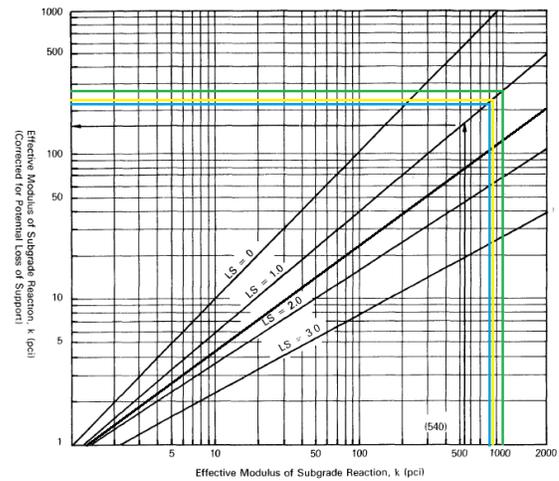


Figura A-15. Nomograma k efectivo corregido.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993).

TABLE 4.4 Recommended Dowel Size and Length

Slab thickness (in.)	Dowel diameter (in.)	Dowel length (in.)
5	5/8	12
6	3/4	14
7	7/8	14
8	1	14
9	1 1/8	16
10	1 1/4	18
11	1 3/8	18
12	1 1/2	20

Figura A-16. Largo de dovola según diámetro.

Fuente: Pavement Analysis and Design (Huang, 2004).

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES*. Washington D.C, 624 p. Recuperado de <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE, A MANUAL OF PRACTICE*. Washington D.C, 218 p. Recuperado de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/download/File/563568428712666/AASHTO08.pdf>
- American Concrete Pavement Association. (2014). *CONCRETE PAVEMENT BASICS*, 4 p. Recuperado de <http://www.acpa.org/StreetPave/Concrete%20Pavement%20Basics.pdf>
- Andrades, M. (2017). *TRABAJO PRÁCTICO DE CLIMATOLOGÍA: APLICACIÓN DE ÍNDICES Y CLASIFICACIONES CLIMÁTICAS*. Logroño, España: Universidad de la Rioja, 36 p. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=699751>
- Arias, E. (2014). *RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON LA INCORPORACIÓN DE CRITERIOS MECÁNICO-EMPÍRICOS. PROYECTO LM-PI-GM-INF-22-14*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 32 p. Recuperado de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Informes/2014/LM-PI-GM-INF-22014.pdf>
- Badilla, G. (s.f). *DETERMINACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS MEDIANTE EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI): ASPECTOS Y CONSIDERACIONES IMPORTANTES*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 10 p. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/500/CILA-05-09.%20DETERMINACI%c3%93N%20DE%20LA%20REGULARIDAD%20SUPERFICIAL%20DE%20PAVIMENTOS%20MEDIANTE%20EL%20C%c3%81LCULO%20DEL%20INDICE%20REGULARIDAD%20INTERNACIONAL%20%28IRI%29%20ASPECTOS%20Y%20CONSIDERACIONES%20IMPORTANTES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CACISA (2019). *Informe de ensayo mezcla asfáltica (CBZ) 18 p*. Turrialba, Costa Rica: Municipalidad de Turrialba.
- Castro, P. (2019). *DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS 35 p*. Material del curso Construcción de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- Castro, P. (2019). *DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA AASHTO 1993 19 p*. Material del curso Construcción de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- Castro, P. (2019). *GENERALIDADES DE A LA GUÍA DE DISEÑO AASHTO DE 1993, 23 p*. Material del curso Construcción de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.

- Castro, P. (2019). *INTRODUCCIÓN AL CURSO DE PAVIMENTOS* 10 p. Material del curso Construcción de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- Castro, P. (2019). *LIGANTES ASFÁLTICOS* 30 p. Material del curso Construcción de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- Castro, P. (2019). *MATERIALES PARA PAVIMENTOS* 36 p. Material del curso Construcción de Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica.
- Castro, P. (2007). *OFICIO DVOP-5170-07*. Ministerio de Obras Públicas y Transporte, 4 p.
- CIVCO (2020). *Informe de laboratorio subrasantes (Parque el Silencio e INA)*, 31 p. Turrialba, Costa Rica: Municipalidad de Turrialba.
- Consejo Nacional de Vialidad. (2014). *LP N°2014LN-000018-0CV00. MANTENIMIENTO PERIÓDICO Y REHABILITACIÓN DEL PAVIMENTO DE LA RED VIAL NACIONAL PAVIMENTADA*. San José, San José, Costa Rica, 205 p. Recuperado de <https://www.hacienda.go.cr/SCRIPTS/CRIIIEXT.DLL/CA1611530798.DOCX?UTILREQ=DESCARGARDOCUMENTO&ID=1611530798>
- Coronado, J. (2002). *MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: SIECA, 289 p. Recuperado de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4114/625.7-38.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corredor, G. (2008). *EXPERIMENTO VIAL DE LA AASHO Y LAS GUÍAS DE DISEÑO AASHO*. Lima, Perú: Editorial Universidad Nacional de Ingeniería, 90 p. Recuperado de https://www.academia.edu/15076795/Experimento_Vial_de_la_AASHO_y_las_Guías_de_Diseño_de_Pavimento_de_la_AASHO_y_las_Guías_de_Diseño_de_Pavimento_de_la_AASHO
- Gu% C3% ADas_de_Dise% C3% B1o_A ASHTO
- Coto, J. (2016). *COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO Y FLEXIBLE POR MEDIO DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, ENFOCADO A CARRETERAS DE TRÁNSITO PESADO*. (Tesis de pregrado). Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 133 p. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6792/comparaci% c3% b3n-estructuras-pavimenter% c3% adgidoy-flexible-enfocado% 20a% 20carreteras% 20de% 20tr% c3% a1nsito% 20pesado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garnica, P., Pérez, N., & Gómez, J. (2001). *MÓDULOS DE RESILIENCIA EN SUELOS FINOS Y MATERIALES GRANULARES*. Querétaro, México: Editorial Instituto Mexicano del Transporte, 58 p. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>
- Duravía, (2012). *METODOLOGÍA AASHO-1993*, 13 p. Recuperado de <http://www.duravia.com.pe/wp-content/uploads/COLECCIONABLE-DURAVIA-VII.2.pdf>
- Federal Highway Administration. (2006). *GEOTECHNICAL ASPECTS OF PAVEMENTS*. Washington DC, Estados Unidos: U.S. Department of Transportation, 598 p. Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/05037.pdf>
- Federal Highway Administration. (2019). *CONCRETE PAVEMENTS JOINTS*. Washington DC, Estados Unidos: U.S. Department of Transportation, 48 p. Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/ta504030.pdf>

- Huang, Yang H. (2004). *PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN*. New Jersey, Estados Unidos: Pearson Prentice Hall, 785 p. Recuperado de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/438/GUIA_DISENO_MECANISTICA_EMPIRICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ITP (2019). *Informe de ensayo base granular (Quebrador Atirro Tracmory)*, 4 p. Turrialba, Costa Rica: Municipalidad de Turrialba.
- ITP (2019). *Informe de ensayo sub-base granular (Quebrador Atirro Tracmory)*, 4 p. Turrialba, Costa Rica: Municipalidad de Turrialba.
- Leiva, F. (s.f). *DESARROLLO DE UNA GUÍA DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO EN COSTA RICA*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 19 p. Recuperado de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/440/GU%c3%8dA-DISE%c3%91O_PAVIMENTOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Leiva, F., Arce, M. & Castro, P. (2005). *DESARROLLO DE LEYES DE FATIGA PARA BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 61 p. Recuperado de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Investigaciones/2005/LM-PI-PV-IN-16B-05%20DESARROLLO%20DE%20LEYES%20DE%20FATIGA%20PARA%20BASES%20ESTABILIZADAS%20CON%20CEMENTO.pdf>
- Leiva, F. (2004). *MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 14 p. Recuperado de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/425/MODULO_DINAMICO_MEZCLAS_ASFALTICAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Leiva, F. (s.f). *NUEVA GUÍA DE DISEÑO MECANÍSTICA-EMPÍRICA PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 19 p. Recuperado de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/438/GUIA_DISENO_MECANISTICA_EMPIRICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Loria, G. (2013). *DESARROLLO DE LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE COSTA RICA: CR-ME*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 11 p. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/533/DESARROLLO%20DE%20LA%20GUIA%20DE%20DISENO%20DE%20PAVIMENTOS%20DE%20COSTA%20RICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moncayo, J. (1987). *MANUAL DE PAVIMENTOS*. Ciudad de México, México: Editorial Continental 166 p.
- Monge, S. (2013). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UNA MEZCLA DE CONCRETO MR-4.5 MPA CON ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO*. (Tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 133 p. Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3108/1/34921.pdf>
- Montejo, A. (2002) *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones, 378 p. Recuperado de https://www.academia.edu/7880272/Ingenier%C3%ADa_de_Pavimentos_para_Carreteras_ALFONSO_MONTEJO_FONSECA
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2010). *MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES CR-2010*, 790 p. Recuperado de <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/28a27ca9-2ec2-49ae-838c-6f89e21d43b4/CR-2010.pdf?MOD=AJPERES>

- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2016). *COSTOS MÁXIMOS HONORARIOS DE EQUIPO Y MAQUINARIA*, 41 p. Recuperado de https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2017/02/23/ALCA41%2023_02_2017.pdf
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2016). *MANUAL DE AUSCULTACIÓN VISUAL DE PAVIMENTOS DE COSTA RICA*, 66 p. Recuperado de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/850/Manual%20de%20Auscultaci%c3%b3n-Profesionales_Oficial.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2019). *RESUMEN ESTADO RED VIAL NACIONAL Y RED VIAL CATONAL*, 12 p.
- Navarro, J. (2017). *DESARROLLO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DEL ESCALONAMIENTO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valdivia, Chile, 158 p. Recuperado de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23576/3560900258451UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Padilla, A. (2004). *ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS DENSAS DE LA NORMATIVA MEXICANA MEDIANTE EL ENSAYO DE PISTA*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 161 p. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Quirós, R. (2015). *HERRAMIENTA DE CÁLCULO COMPUTACIONAL DE RESPUESTAS MECÁNICAS CRÍTICAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 21 p. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/846/AP-Rigid.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Robles, R. (2015). *CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI) BARRANCO-SURCO-LIMA*. (Tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 123 p. Recuperado de http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2399/robles_r.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rojas, F. (2015). *PITRA PAVE SOFTWARE DE MULTICAPA ELÁSTICA*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 27 p. Recuperado de https://kupdf.net/download/manual-de-pitra-pave-final_5b0c9f28e2b6f53d301ffafb_pdf
- Trejos, C., Aguiar P & Loria, L (2016). *DESARROLLO DE SOFTWARE DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA COSTA RICA*. San José, Costa Rica: LanammeUCR, 67 p. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/294/LM-PI-UMP-057-R2Desarrollo%20del%20Software%20de%20An%c3%a1lisis%20y%20Dise%c3%b1o%20de%20Pavimentos%20para%20Costa%20Rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- VIETO (2018). *CONTRATACIÓN DE LOS SERVICIOS PARA LA EJECUCIÓN DE LOS ESTUDIOS PRELIMINARES PARA MEJORAMIENTO DE CAMINO CALLES URBANAS LA CECILIA*, 158 p. Turrialba, Costa Rica: Municipalidad de Turrialba.