

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería en Construcción**

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a carreteras de tránsito pesado.

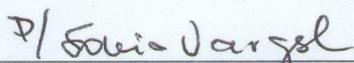
Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

José David Coto Sánchez

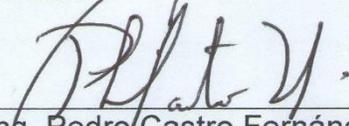
Cartago, Noviembre 2016.

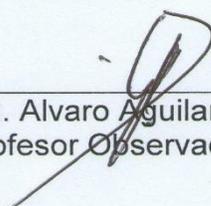
### CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

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. Alvaro Aguilar Dondi, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

  
Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Director

  
Ing. Sergio Fernández Cerdas.  
Profesor Guía

  
Ing. Pedro Castro Fernández.  
Profesor Lector

  
Ing. Alvaro Aguilar Dondi.  
Profesor Observador

**Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.**

# Abstract

This project aims to perform a comparison between rigid pavement and flexible pavement, applied to the case of the recently completed road Cañas-Liberia, through a life cycle analysis. Within this analysis, the initial construction costs of each pavement structure is contemplated, as well as the activities required for their maintenance, also with its respective cost, during the design period considered.

In addition, considering the profits obtained with each pavement, including differences in costs or savings from each one, with the aim of determine the most advantageous pavement about to construction and maintenance costs.

For be able to collect all the required information, assistance is requested from public institutions such as MOPT, CONAVI, CNFL and LanammeUCR. This includes costs of materials, pavement design analyzed, offers and tenders that were defined and other necessary data in detailed manner.

During the performance of calculations and designs are carried out visits and interviews directed to different experts in the discussion subject to review, correct and validate the procedures and proposed data.

It is concluded that the rigid pavement is the best choice to build, according to the present conditions, because it has several advantages that cancel the difference obtained in the initial construction cost, compared to the flexible pavement.

**Key words:** *Rigid Pavement, Flexible Pavement, Initial Construction, Maintenance, Conservation, Life Cycle Analysis.*

# Resumen

Con este proyecto se pretende realizar una comparación entre pavimento rígido y pavimento flexible, aplicado al caso de la carretera recién finalizada Cañas-Liberia, por medio de un análisis de ciclo de vida. Dentro de este análisis, se contemplaron los costos de construcción inicial de cada estructura de pavimento, así como de las actividades requeridas para su conservación, también con su respectivo costo, a lo largo del período de diseño considerado.

Además, se tomaron en cuenta los beneficios obtenidos con cada pavimento, incluyendo las diferencias de costos o los ahorros obtenidos con cada uno, con la finalidad de determinar el pavimento más ventajoso con respecto a los costos de construcción y mantenimiento.

Para poder recopilar toda la información requerida, se recurrió a instituciones públicas como MOPT, CONAVI, CNFL y LanammeUCR. Esta incluye costos de materiales, diseño del pavimento analizado, licitaciones y ofertas que se plantearon, y demás datos necesarios de manera detallada.

Durante la realización de los cálculos y diseños, se llevaron a cabo visitas, o entrevistas, a distintos profesionales en el tema para revisar, corregir y validar los procedimientos y datos propuestos.

Se concluyó que el pavimento rígido es la mejor opción por construir, de acuerdo con las condiciones presentes, debido a que presenta varios beneficios que contrarrestaron la diferencia obtenida en el costo de construcción inicial, respecto al pavimento flexible.

**Palabras claves:** *Pavimento Rígido, Pavimento Flexible, Construcción Inicial, Mantenimiento, Conservación, Comparación, Análisis de Ciclo de Vida.*

# **Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.**

JOSÉ DAVID COTO SÁNCHEZ

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre del 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

PREFACIO .....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCIÓN.....	4
MARCO TEÓRICO .....	6
METODOLOGÍA .....	26
RESULTADOS .....	29
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	65
CONCLUSIONES .....	67
RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	70
APÉNDICES .....	72

# Prefacio

El proyecto consiste en demostrar las diferencias de costos entre ambos pavimentos, además de las características de cada estructura, así como sus ventajas y desventajas, determinando cuál es más adecuada según las distintas condiciones presentadas. Un ejemplo de ello es la carretera Cañas-Liberia, la cual originalmente estaba contemplada para que se construyera utilizando pavimento flexible, pero se demostró las razones del porqué era mejor construirla usando pavimento rígido, debido a que se realizó un análisis de ciclo de vida y se probó que esto resultaba más económico a mediano y largo plazo. Eso justamente es lo que pretende, demostrar en este proyecto: cuál de los dos materiales es más adecuado según las condiciones analizadas, y hacer conciencia para que no solo la carretera Cañas-Liberia se someta a estos análisis, sino también las carreteras y autopistas por construir a futuro por todo el país, lo que repercutirá positivamente en todos los aspectos.

Lo anterior se deriva, de que en Costa Rica existen 8796 km de carreteras construidos con pavimento flexible y solo 528,61 km con pavimento rígido, contemplando la Red Vial Nacional, según estudios del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Por lo que, en este caso, CEMEX Costa Rica S.A. pretende enseñar y demostrar todos los beneficios que se obtendrían promoviendo el pavimento rígido, si se implementara en mayor medida en las carreteras del país.

Dichos aspectos abarcan todos los factores socioeconómicos, que no solo serán beneficiosos para la economía del país, sino también para la parte social, determinando el material más apto para poseer vías de transporte resistentes, durables, cómodas y de calidad en las cuales la población o los usuarios se trasladen de un lugar a otro cómodamente y

eficientemente en cada caso particular, dadas las condiciones del proyecto; también traería ventajas para los productores industriales, agrícolas y manufactureros al tener una red de vías de transporte adecuada y eficiente lo que les ayudaría a agilizar los procesos colaborando con su economía y crecimiento, por citar un ejemplo.

Es por razones como las descritas anteriormente, que se pretende la realización de este trabajo, el cual analiza la opción de comparar el pavimento rígido con el flexible, tanto en el diseño como en los costos de construcción y de mantenimiento, con la finalidad de determinar la estructura de pavimento que tenga mayor efectividad, es decir, el más viable, el que mejor se adapte a las condiciones presentes del lugar, tanto ambientales como estructurales.

Es importante realizar un análisis de este tipo antes de iniciar la construcción de cualquier carretera, ya que, dependiendo del material constituyente del pavimento, se pueden tener diferencias en los costos analizados, lo que puede representar ahorros de capital a lo largo del ciclo de vida de la estructura de pavimento, que benefician principalmente al Gobierno teniendo mayor capital disponible para las distintas necesidades que tenga el país, y más posibilidades de contrarrestarlas y enfrentarlas.

Se agradece la colaboración y el apoyo de la empresa CEMEX Costa Rica S.A., por permitir la realización de esta investigación con sus recursos e instalaciones, principalmente al departamento de Soluciones Constructivas y Sector Público, en el cual sobra colaboración y calidad humana por parte de todos sus integrantes. Además, al Instituto Tecnológico de Costa Rica y a la Escuela de Ingeniería en Construcción, por las bases, valores y conocimientos adquiridos que lo hicieron posible. Finalmente, mi agradecimiento al Profesor Ing. Sergio Fernández Cerdas M.Sc. por su guía, su colaboración, su apoyo y sus recomendaciones durante todo el proceso de ejecución.

# Resumen Ejecutivo

El concreto hidráulico y el concreto asfáltico son dos materiales ampliamente utilizados para la construcción de autopistas, carreteras y caminos alrededor del mundo. En Costa Rica, se le da un mayor uso al concreto asfáltico para tal fin, habiéndose, en los últimos años, dado mayor participación en la industria a la pavimentación de vías importantes con concreto hidráulico.

Ambos materiales de construcción tienen sus ventajas y desventajas, que hacen que tengan mayor conveniencia uno con respecto al otro según las condiciones consideradas. El concreto asfáltico tiene como principal beneficio su menor costo en construcción inicial con respecto al concreto, además, luego de que se coloque la carpeta asfáltica se requiere poco tiempo para reanudar el tránsito y constituye una estructura continua sin interrupciones, debido a su flexibilidad, además de un mayor valor de rescate, generalmente. El concreto hidráulico por su parte, es un material más rígido con mayor resistencia, por lo que requiere una menor cantidad de medidas de conservación a lo largo de su ciclo de vida, además de que se necesita menor cantidad de luz debido a su color claro, por lo se ahorra en la instalación de la iluminación y en el consumo energético. También se menciona que, por la rigidez del material, se da un menor consumo de combustible por parte de los vehículos, según un estudio realizado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts en el 2012.

Con el tema desarrollado, se pretende dar a conocer que, antes de iniciar cualquier proyecto carretero, siempre es recomendable realizar un análisis de ciclo de vida de pavimentos, considerando los dos materiales, con la finalidad de observar cuál de ellos traerá mayores beneficios tanto en calidad como en economía. También, este trabajo se realiza con el fin de que existan más pruebas para que el Gobierno sea más abierto en cuanto a abrir licitaciones de infraestructura vial contemplando ambos tipos de pavimento, seleccionando la oferta más conveniente a construir producto de la

competencia justa entre empresas cementeras y asfalteras.

Como carretera en análisis, se tomará la Ruta Nacional N°1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia, para la cual se compararán los pavimentos rígido y flexible, incluyendo diseño y costos a lo largo del ciclo de vida de cada estructura, para determinar cuál de los dos pavimentos es más conveniente construir según la carretera tomada como ejemplo.

Para la realización del proyecto se realizó el siguiente proceso:

1. En el expediente de licitación correspondiente, venían dos diseños por elegir (pavimento rígido y pavimento flexible), en las cuales las empresas ofertantes debían realizar el presupuesto de cada uno de los diseños para que el CONAVI eligiera el más conveniente. Se trabajó con el diseño del pavimento flexible, para la carretera en análisis, además de toda la información sobre la licitación de la misma.
2. Con el diseño obtenido, se prosiguió a realizar un diseño equivalente de pavimento rígido, pero con las condiciones actuales, tomando variables de los diseños obtenidos, así como de otras variables calculadas.
3. Se realizaron los cálculos de las cantidades de materiales necesarias, con sus respectivas actividades y costos, para la determinación del valor económico de construcción de cada estructura de pavimento.
4. Se investigaron y se determinaron las actividades de conservación que se le aplicarían a cada pavimento a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo sus respectivos costos.
5. Se calcularon los beneficios que se obtenían con cada estructura de pavimento, reflejados en ahorros de

dinero que se conseguían con cada uno de dichos beneficios.

6. Una vez con los diseños y costos completos y obtenidos, se realizó un análisis comparativo para determinar la viabilidad de ambos pavimentos.

Como resultados, se obtuvo que el pavimento flexible es un 10,3% más barato de construir que el pavimento rígido para este caso particular, pero para la conservación de pavimentos, el segundo es un 70% más barato de mantener que el primero, durante todo el ciclo de vida correspondiente, aunque las actividades de conservación son más sencillas de realizar en pavimento flexible. Además, se debe de sumarle también el ahorro de dinero que se determinó con cada beneficio del pavimento rígido, refiriéndose a la instalación de la iluminación, al consumo energético y al consumo de combustible.

Con el análisis de viabilidad de pavimentos mencionado anteriormente, se obtuvo como resultado que el pavimento rígido es la estructura más viable a construir según las condiciones que se consideraron.

# Introducción

En nuestro país, al hablar de carreteras, calles y autopistas, lo primero que se piensa es en concreto asfáltico, ya que la mayoría de las rutas y caminos en el país (aproximadamente el 90% según estudios del diario La Nación) están constituidos de este material. Debido a su predominio, no ha sido posible implementar que las carreteras se construyan con otro material como el concreto hidráulico (pavimento rígido), porque siempre se ha especulado que construir con este material va a resultar mucho más caro que hacerlo con concreto asfáltico (pavimento flexible). En otras palabras, el pavimento rígido ha constituido un verdadero reto para el país, debido a que no siempre se realiza un análisis beneficio-costos para comparar el pavimento flexible con otros materiales, además de que siempre ha existido el temor a innovar y emprender en nuevas tecnologías por falta de conocimiento en el tema; se prefirió continuar con los mismos problemas y en ocasiones con gastos económicos que se podrían evitar.

Lo anterior, se ha venido transmitiendo por décadas. La nueva generación de profesionales y comunidad en general, suponen que la construcción de pavimentos rígidos requiere de mayor costo inicial, sin analizar y establecer las condiciones puntuales de cada proyecto, tales como: socioeconómicos, clima, orografía, hidrografía, estudio de suelos, materiales, mano de obra, tecnología y mantenimiento. No solo el pavimento flexible se puede utilizar en nuestras carreteras; por tal razón, se pretende demostrar que un material como el concreto hidráulico puede ser beneficioso para el país y podría tener muchas ventajas sobre el concreto asfáltico en proyectos con condiciones que lo ameriten, además de dar a conocer las diferencias en el costo inicial, durante su construcción y vida útil.

El presente proyecto tratará sobre la obtención de una variable, que consiste en la diferencia entre el costo de un pavimento rígido y

un pavimento flexible tanto en la fase inicial como a largo plazo. Se pretende realizar una comparación entre ambas estructuras de pavimento para determinar la mejor opción y la que va a repercutir en mayor medida para el beneficio del país. También se propone un análisis de ciclo de vida, el cual básicamente consiste en una metodología para estimar y evaluar los impactos medioambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia, lo que se aplicará a ambos pavimentos con el fin de realizar la comparación requerida, determinando la competitividad de cada uno de ellos. Sin embargo, no solo será importante el factor económico, también se compararán propiedades y características técnicas entre ambas estructuras de pavimento, así como factores de calidad, resistencia y comodidad.

Otra de las razones por las que se considera que existen casos donde es favorable el pavimento rígido en nuestras carreteras, es porque en el país existen empresas que producen cemento y concreto, así como también existen empresas que producen mezcla asfáltica, aunque el ligante asfáltico utilizado se importe al país, lo que ampliaría la industria de pavimentos, favoreciendo la economía y la demanda de empleo.

# Objetivo General

Comparar las estructuras de pavimento rígido contra las de pavimento flexible, principalmente en los costos de la vida útil, por medio de un análisis de ciclo de vida, con la finalidad de determinar la estructura más viable tomando como referencia una carretera de tránsito pesado.

## Objetivos Específicos

- Identificar un diseño de pavimento flexible por medio de una institución pública específica, además de su respectivo proceso constructivo y, si es posible, el costo del mismo, que ofrezca las condiciones ideales para el estudio comparativo.
- Analizar la estructura de pavimento flexible obtenido y elaborar un diseño equivalente de pavimento rígido (losa convencional).
- Calcular los costos necesarios para realizar el análisis de ciclo de vida de ambos pavimentos, tanto los de construcción inicial como los de mantenimiento, recurriendo a instituciones y compañías expertas en los temas.
- Realizar un Análisis de Ciclo de Vida, con la intención de determinar la vida útil de ambos pavimentos y la viabilidad por medio de la comparación de beneficio-costos.

## Alcance y limitaciones

El propósito de este trabajo es comparar el pavimento flexible contra un pavimento rígido equivalente, observar y analizar sus respectivos costos y beneficios para determinar el más viable de construir, según las condiciones presentes en el lugar. Esto se hace debido a que la mayoría de las carreteras en el país están constituidas de pavimento flexible y se le da poca oportunidad al concreto, el cual es un material de alta calidad cuya utilización para la construcción de estas estructuras podría traer grandes beneficios.

Por lo tanto, el principal alcance de este proyecto consiste en demostrar que, bajo ciertas condiciones, el pavimento flexible no siempre es la mejor opción, aunque presente un menor costo asociado a su construcción con respecto a pavimentos de otros materiales como el concreto hidráulico. Además, se pretende crear conciencia principalmente en el Gobierno, para que exista una competencia justa entre empresas asfalteras y cementeras, dando igual cantidad de oportunidades a ambas industrias para la construcción de futuras carreteras o rehabilitación de las existentes (entiéndase la aplicación de sobrecapas asfálticas y sobrecapas de concreto hidráulico), como es el caso de las próximas licitaciones.

Dentro de las limitaciones ocurridas durante la realización del trabajo, se destacan la falta de información a la hora de las visitas realizadas a las instituciones públicas, debido a que no siempre tenían los datos necesarios a mano u ordenados, por lo que había que esperar a que los buscaran y autorizaran a proporcionarlos; es decir, procesos ineficientes que ocasionaban atrasos para la realización de las investigaciones; lo mismo que con los profesionales consultados, quienes eran difíciles de contactar, intentar programar una reunión e incluso proporcionar cierta información.

Otra limitación que se presentó fue a la hora de realizar cotizaciones de venta de materiales y alquiler de maquinaria, debido a que se atrasaban en enviarlas la mayoría del tiempo, o ponían excusas por ser un trabajo de fines académicos.

Con respecto a los costos que se consideraron para la comparación de los pavimentos, se destaca que se tomaron en cuenta los costos de construcción, de mantenimiento y de algunos beneficios. Los costos correspondientes al valor de rescate y a los costos de operación de los usuarios no se tomaron en cuenta.

El software HDM-4 constituyó en sí una limitación, debido a la complejidad que este presentaba por la cantidad y tipo de datos que había que manejar, lo que abarcaba mucho tiempo de trabajo, arriesgando que el presente documento no estuviera listo para la fecha solicitada, por lo que se recurrió a otros métodos de comparación de pavimentos.

# Marco Teórico

## Datos generales de las carreteras en el país

En la actualidad, al hablar en Costa Rica sobre el tema de las carreteras, el primer pensamiento que se viene a la mente siempre es algo negativo, debido a que en el país es prácticamente imposible transitar sin que el vehículo pase por un bache, parche, hundimiento, ondulaciones, grietas o cualquier otro tipo de deterioro o irregularidad en la carretera. Precisamente, esta manera de pensar del costarricense, o en ocasiones de los extranjeros, es a causa de que la mayoría de las carreteras en el país se encuentran en mal estado, según un estudio realizado por el diario La Nación.

Costa Rica cuenta principalmente tres tipos de superficie de rodamiento para las carreteras, que están constituidas de concreto asfáltico, concreto hidráulico y lastre. La gran mayoría de las carreteras nacionales corresponden a pavimento flexible; es decir, están hechas de concreto asfáltico como materia prima.

Según dicho estudio, de estas carreteras pavimentadas, en buen estado se encuentran 1700 km, lo que corresponde al 35% del total, ya que la Red Vial Nacional es de aproximadamente 4800 km de vías pavimentadas. En estado regular están 2100 km, que representa un porcentaje de 44% en los cuales se dice que se puede transitar pese a su deterioro; y en estado pésimo se encuentran 1000 km, es decir, un 21% de las carreteras pavimentadas, que el estudio dice que son prácticamente intransitables, todo esto según estudios realizados por el LanammeUCR.

A pesar de las mediciones, estimaciones y cálculos mencionados anteriormente, el estado de las carreteras de nuestro país ha venido mejorando, según la comparación realizada de las carreteras de hoy con las de hace 10 años.

Se determinó que, aparte de que la Red Vial Nacional ha venido en constante crecimiento, también se ha trabajado por mejorar la calidad de las carreteras, debido a que para esos años las carreteras en mal estado constituían una tercera parte del total de la Red Vial (34%), igualmente para las carreteras en estado regular, y las vías en buen estado representaban un porcentaje de 32%. Se menciona entonces que, a pesar del deterioro existente en las carreteras, con el paso del tiempo han venido mejorando tanto en extensión como en mantenimiento y calidad. Lo anterior se concluye con base en los informes de evaluación de la Red Vial Nacional que realiza cada 2 años el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), con el fin de conocer, evaluar y calificar la condición técnica de las carreteras nacionales, así como determinar su evolución y crecimiento por medio de la comparación con informes anteriores.

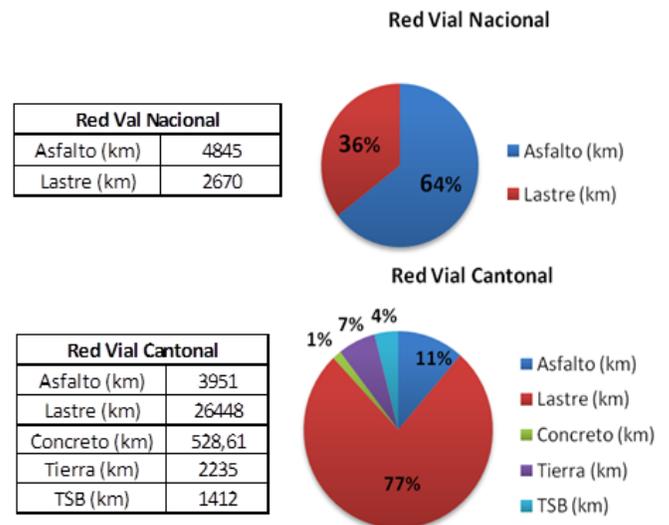


Figura 1. Tipo y longitud de superficie de rueda en el país. Fuente: MOPT (2012).

# Materiales utilizados en Costa Rica

Con respecto a la utilización de los materiales en la construcción de los pavimentos, en nuestro país siempre ha existido el ligante asfáltico como materia prima para la construcción de las carreteras y calles; prácticamente desde que el país evolucionó de caminos de tierra o lastre a calles pavimentadas. Pero no fue sino hasta hace poco que se empezó a pensar, en mayor medida, en la utilización del concreto hidráulico para la construcción de pavimentos, ya que se considera un material resistente y durable ante el intemperismo y aplicación de cargas estáticas y dinámicas. A pesar de las características del concreto hidráulico, aún no se ha afianzado como material de construcción de pavimentos en el país, y el concreto asfáltico sigue siendo la principal opción, al menos por parte del Gobierno.

La principal razón de lo anterior, se debe a la inversión inicial para la construcción de ambos pavimentos. El costo de construcción del pavimento rígido es mayor que la del flexible, aproximadamente un 10%, lo que constituye la principal razón, sin analizar los factores negativos y positivos que se tengan durante todo el ciclo de vida del proyecto.

Se debe considerar que el nuestro país se utiliza únicamente un solo tipo de ligante asfáltico (AC-30), que es el único que importa RECOPE al país según lo afirma el LanammeUCR, cuando se debería de usar mínimo tres tipos de ligante asfáltico debido a las diferencias de temperatura y humedad que presenta el país en todas sus regiones pues la viscosidad del mismo es muy vulnerable ante estas condiciones ambientales y repercute en sus propiedades mecánicas. Según el tipo de ligante, este va a resultar más caro, pero como se utiliza uno que es menos resistente o menos adecuado que el que se debería de usar, es por tal razón que la inversión inicial para la construcción de un pavimento rígido va a ser mayor que la de un pavimento flexible.

Ahora bien, se debe considerar que al ser más caro el material, esto va a traer mayores beneficios, por lo que el pavimento rígido en general tiene ventajas sobre el pavimento flexible. Sin embargo, si se analiza desde la parte técnica se debe tener presente factores como el tipo de

ligante asfáltico por seleccionar, debido a que los ligantes más resistentes puede que se equiparen en calidad y durabilidad con materiales como el concreto hidráulico, pero un ligante asfáltico más resistente conlleva un precio mayor por lo que ya no habría tanta diferencia en el costo de construcción entre ambos materiales. Por eso, mientras se elija el material adecuado para las condiciones presentes, se construya adecuadamente el pavimento y se le dé un buen mantenimiento, entonces su vida útil se alargará y se ahorraría mucho dinero.

## Generalidades sobre pavimentos

### Pavimento

Corresponde a una estructura estratificada por medio de la cual se movilizan los actuales medios de transporte de un lugar a otro sobre su capa superior, llamada superficie de ruedo. Está constituida por varias capas horizontales dependiendo de la estructura por construir, conformadas a su vez por materiales adecuados y debidamente compactados. Los pavimentos tienen la función principal de transmitir los esfuerzos generados por el tránsito y llevarlos al suelo de fundación a través de las diferentes capas que los componen, sin que exista alguna falla en los materiales o la estructura en sí.

### Funcionamiento

Como ya se mencionó, la principal función que tiene un pavimento es la adecuada transmisión de esfuerzos a través de su estructura, causados por el tránsito. Pero también se requiere que cumplan o que reúnan ciertos requisitos como los siguientes:

- Resistencia ante factores ambientales y accidentales.
- Resistencia al desgaste ante el paso del tránsito.

- Brindar comodidad a los usuarios que transiten sobre el pavimento, presentando regularidad longitudinal y transversal.
- Dar seguridad a los usuarios a través de una textura superficial adaptada a las velocidades de circulación.
- Drenar eficientemente el agua con sistemas adecuados para tal fin.
- Debe reflejar la luz o tener componentes o señales reflectoras para seguridad de los usuarios.
- Garantizar durabilidad.
- Poseer una superficie uniforme que minimice los efectos del ruido del contacto entre el neumático y el pavimento.
- Deber ser económico, pero sin afectar las demás funciones.

## Pavimentos Flexibles

### Concreto Asfáltico

El pavimento flexible se compone principalmente de agregados pétreos y un tipo de ligante asfáltico, el cual consiste en un material cementante de color negro, en estado sólido, semi-sólido o viscoso, constituido por hidrocarburos o bitúmenes. Esta sustancia tiene la función principal de aglutinar o proveer adhesión a los agregados, de manera que se garantice trabazón en la estructura interna del agregado, impermeabilidad y durabilidad, que corresponde a la resistencia al efecto de la humedad y envejecimiento del ligante. También hay que agregar que la cohesión en la película del ligante que cubre al agregado, va a afectar directamente la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica.

Este elemento es el principal constituyente del concreto asfáltico, que a su vez es el componente primordial del pavimento flexible, el cual está formado por una carpeta asfáltica seguida de dos capas granulares, las cuales son la base y la sub-base. Todas estas capas están apoyadas a su vez sobre la capa sub-rasante, correspondiente al suelo de la fundación de la estructura.

## Estructuración

- Sub-base: Constituye una capa granular que tiene varias funciones dentro del pavimento flexible; una de ellas es económica, es decir, que la sub-base ayuda a que la carpeta asfáltica sea de menor grosor debido a que contribuye a distribuir los esfuerzos, aumentando el grosor del pavimento, pero reduciendo los costos. También impide la combinación o penetración de los materiales de la base con la sub-rasante, actuando como filtro para que la base no se contamine, así como drenaje de las aguas, además de evitar la ascensión capilar hacia el pavimento.
- Base Consiste en una capa granular o estabilizada con cemento, que transmite los esfuerzos producidos por el tránsito vehicular a la sub-base y sub-rasante sin existencia de falla funcional o estructural. También tiene una función económica como la citada anteriormente.
- Carpeta La carpeta asfáltica debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito y resistir los efectos abrasivos al paso de los vehículos y del ambiente. Debe garantizar impermeabilidad para que no exista paso del agua hacia el interior del pavimento.

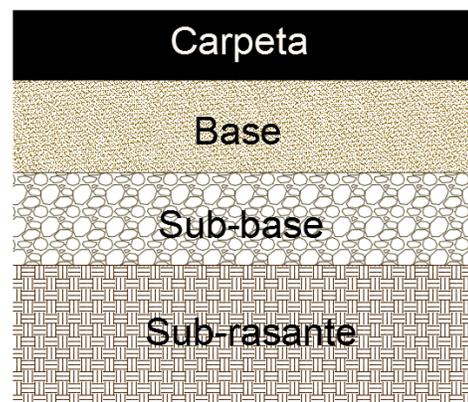


Figura 2. Estructuración de pavimento flexible. Fuente: Elaboración propia (2016) AutoCAD.

## Pavimentos Rígidos

### Concreto Hidráulico

El concreto hidráulico corresponde a una mezcla de distintos componentes, entre los cuales se encuentran principalmente el cemento, agregado fino (arena), agregado grueso (piedra) y agua.

El pavimento rígido se constituye de una losa de concreto apoyada sobre una capa de un material adecuado y debidamente compactado, generalmente llamada sub-base, o directamente colocada sobre la sub-rasante sin la necesidad de otras capas. La razón por la cual el pavimento de concreto no necesita de otras capas de apoyo, como si lo requiere el pavimento flexible, se debe principalmente a la alta rigidez del concreto hidráulico, por lo que la distribución se da en un área más amplia. Además, como el concreto puede resistir esfuerzos a tensión, en cierta medida, entonces un pavimento rígido es satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la sub-rasante, por lo que la capacidad estructural de este pavimento depende de las losas de concreto hidráulico, siendo las demás capas de apoyo innecesarias o de poca influencia en función del espesor de la estructura.

### Estructuración

- Sub-base  
Su función más importante es la de impedir que el material fino de la sub-rasante emerja o salga a la superficie por medio de las juntas entre las losas de concreto hidráulico, ayudado por la filtración de agua debido a la inexistencia de sellos en las grietas, fenómeno que se conoce como socavación.

Otras funciones de la sub-base son suministrar apoyo firme a la losa de concreto hidráulico, facilitar trabajos de pavimentación, mejorar el drenaje e impedir acumulación de agua bajo el pavimento, controlar cambios volumétricos en la sub-rasante, mejorar capacidad de soporte de suelo de la sub-rasante, entre otros. Los tipos más comunes de sub-base son la granular, tratada con cemento y de concreto pobre.

- Losa de concreto hidráulico  
Esta losa debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito y resistir los efectos abrasivos al paso de los vehículos y del ambiente. Debe garantizar impermeabilidad para que no exista paso del agua hacia el interior del pavimento. Además de soportar y transmitir los esfuerzos que se le apliquen.

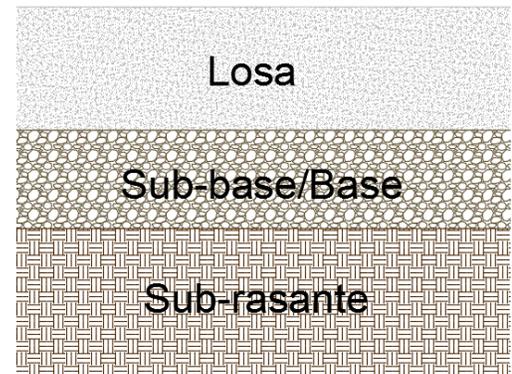


Figura 3. Estructuración de pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia (2016) AutoCAD.

## Selección de Pavimentos

Existen distintos factores de los cuales depende la escogencia del tipo de material utilizado para construir un pavimento, debido a que no es correcto que siempre un tipo de pavimento va a ser mejor que otro bajo cualquier circunstancia. El pavimento óptimo a construir va a depender mucho de los aspectos económicos, ambientales y sociales que estén presentes. Algunos de ellos son los siguientes:

- Posibilidad de construcción.
- Magnitud de tránsito.
- Limitaciones presupuestales.
- Políticas o criterios de las autoridades.
- Costo total de la obra (inicial, conservación, operación).

# Deterioros y Fallas en los pavimentos

Toda estructura de pavimento, independientemente del material del que esté constituida, siempre va a presentar diferentes formas de falla debido a un diseño incorrecto e inadecuado, porque el ciclo de vida de la estructura ya se cumplió o a causa de las condiciones ambientales presentes.

## Pavimento Flexible

### Huecos o baches abiertos

Corresponden a cavidades o depresiones ocasionadas por el desprendimiento de la capa asfáltica y de las capas granulares. Se consideran tres tipos:

- Superficiales: se compromete solo la carpeta asfáltica y su profundidad es menor a 3 cm.
- Medios: se compromete parte o la totalidad de la carpeta asfáltica y su profundidad está entre 3 cm y 10 cm.
- Profundos: su profundidad es superior a los 10 cm, con compromiso de la capa de base.



Figura 4. Bache en pavimento flexible. Fuente: Propia (2016).

### Fisuras longitudinales y transversales

Son agrietamientos longitudinales y transversales que se presentan de manera aislada o continua, y no como una malla. Son producidas por

deficiencia en las juntas de construcción, por contracción de la mezcla asfáltica o desplazamiento de los bordes. Se consideran tres tipos de fisuras: longitudinales, transversales y en bloque.



Figura 5. Agrietamiento en un pavimento flexible. Fuente: SIECA (2000).

### Desgaste superficial

Son las irregularidades que se observan en la superficie, en áreas aisladas o en forma generalizada. Se producen por el desgaste de las partículas superficiales o el desprendimiento de ellas, por la acción del tránsito o del ambiente. El desgaste se clasifica en:

- Ligero: pérdida de textura uniforme, mostrando rugosidad e irregularidades hasta de 5 mm de profundidad.
- Medio: las irregularidades están entre 5 mm y 15 mm de profundidad. Las partículas del agregado están expuestas y se siente vibración al transitar.
- Severo: desintegración superficial de la carpeta asfáltica, con desprendimientos evidentes y partículas sueltas sobre la vía.



**Figura 6.** Desgaste superficial de la carpeta asfáltica. Fuente: Propia (2016).



**Figura 7.** Fenómeno "piel de cocodrilo" en pavimento flexible. Fuente: Propia (2016).

### Piel de cocodrilo o Cuero de lagarto

Consisten en grietas en forma de malla que, inicialmente, se presenta en cuadrados de 25 cm y 30 cm aproximadamente, y luego se irán deteriorando progresivamente en cuadrados más pequeños, parecido al aspecto de la piel de cocodrilo. Las fisuras formadas se irán ensanchando y profundizándose provocando desprendimientos de fracciones de la capa asfáltica. Se consideran tres tipos de fallas:

- Ligera: los agrietamientos son delgados y el tamaño de los cuadrados tienen dimensiones aproximadas a 25 cm de lado. No hay deformación superficial.
- Media: el tamaño de los cuadrados se disminuye y presentan aristas más redondeadas por la pérdida de partículas. Las grietas entre los bloques son mayores a 1 cm, se producen deformaciones y movimientos relativos de la carpeta y puede existir desprendimiento de algunos bloques.
- Severa: las deformaciones son grandes y se presenta pérdida de material asfáltico, además de que se empieza a ver el material de base.

### Ondulaciones

Corresponden a deformaciones grades y notorias de la plataforma de la vía, que alteran su perfil longitudinal, a causa de asentamientos en las capas de apoyo de la carpeta o levantamientos de la misma provocados a su vez por carencia de capacidad de soporte. Además de lo anterior, las ondulaciones se pueden deber a un diseño de mezcla deficiente, a agregados redondeados, a un exceso de ligante asfáltico o presencia de humedad en las capas de soporte.



**Figura 8.** Ondulaciones en un pavimento flexible. Fuente: Coteló, E. (2013).

### Pavimento Rígido

#### Agrietamiento Transversal

Consiste en una o varias grietas que se forman en la losa de concreto hidráulico, en sentido perpendicular con respecto al eje del pavimento o a la dirección del tránsito. La aparición de estas fisuras en la estructura puede deberse a que se

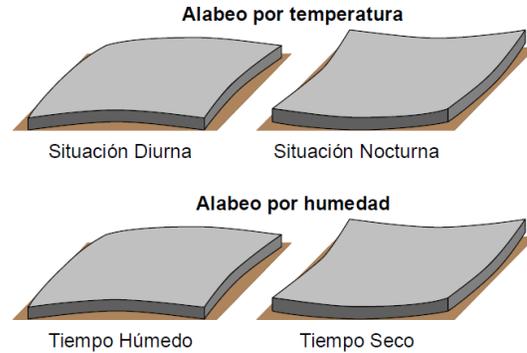
realizó un aserrado tardío a la hora de crear las juntas en la losa, a la falla por fatiga, es decir, que la estructura no se diseñó en función de las condiciones de exposición y operación debido a un espesor de losa inadecuado o a una separación de juntas excesivas para las propiedades ambientales y de tránsito presentes.

Este tipo de falla en la estructura es posible evitarla, realizando una adecuada selección y cálculo de espesores de la losa de acuerdo a las solicitaciones impuestas, además de realizar un buen diseño de las juntas de separación.



**Figura 9.** Fisura transversal en pavimento rígido. Fuente: Propia (2016).

Así como existen las fallas que son debidas a las cargas aplicadas sobre la estructura, también se encuentran las causadas por otros factores distintos a las cargas que se mencionaba anteriormente. La mayoría del tiempo son causadas por cambios en la temperatura y humedad, muy comunes en este tipo de estructuras debido a que están sometidos directamente a las condiciones ambientales. Un ejemplo de esto es la generación de contracciones y expansiones de la losa de concreto ocasionados por los cambios de temperatura, tales como el fenómeno del alabeo, que corresponde a una distorsión en la cual los bordes de la losa se pueden levantar o bajar con respecto a la base o al centro de la misma.



Durante el día en general el alabeo por temperatura y el de humedad se contrarrestan, en cambio durante la noche se combinan.

**Figura 10.** Fenómeno del alabeo en las losas. Fuente: Calo, D. (2008).

## Agrietamiento Longitudinal

Consiste en una o varias grietas que se forman en la losa de concreto, en sentido paralelo con respecto al eje del pavimento o a la dirección del tránsito. Existen varias razones que explican la aparición de estas fisuras, tales como la realización de un aserrío tardío en la creación de las juntas, o como la falla por fatiga, la cual se debe a razones como un espesor de losa insuficiente a causa de un diseño inadecuado de acuerdo a las condiciones de exposición presentes. Este tipo de falla también se puede deber al reflejo de fisuras de las capas inferiores del pavimento o de losas contiguas, además de mencionar la ocurrencia de asentamientos diferenciales del suelo de fundación debido a las malas propiedades del mismo o a la filtración del agua por las juntas produciendo socavación, que hace que el material fino salga a la superficie.

Al realizar un adecuado diseño del pavimento de concreto hidráulico es posible que este tipo de falla no se presente en muchos años; esto garantiza la durabilidad y poco mantenimiento. También, para evitar este agrietamiento, se debe tener en cuenta el control de heterogeneidades del material que constituye la sub-rasante y sub-base.



**Figura 11.** Fisura longitudinal en pavimento rígido. Fuente: Propia (2016).

### Roturas de Esquinas

Consiste en una grieta o fisura que une las juntas transversales y longitudinales. Esta grieta generalmente está con una inclinación de  $45^\circ$  con respecto al eje del pavimento o a la dirección del tránsito. La mayoría del tiempo, cuando este tipo de falla se presenta, es a causa de que la losa tiene una pobre transferencia de carga, o que presenta ángulos agudos en las esquinas de las mismas. Otras causas son debido a asentamientos en el suelo de fundación de la losa o también a pérdidas de soporte debidas a erosión.

Para poder contrarrestar estas fisuras se debe asegurar que entre las losas de concreto hidráulico exista una adecuada transferencia de la carga proveniente del tránsito, así como un correcto diseño de las juntas longitudinales y transversales. Además, se debe de proveer de una sub-base que posea las características adecuadas para que presente resistencia a la erosión bajo tránsito pesado.



**Figura 12.** Rotura de esquina en losa de concreto. Fuente: Propia (2016).

### Erosión por bombeo

Corresponde al desgaste de la losa de concreto hidráulico ocasionado por el movimiento del agua ocurrido debajo de la misma, o también se debe a la salida del agua a la superficie por medio de las juntas entre las losas, lo cual es debido a la presión ejercida por las cargas de tránsito aplicadas. La causa de este fenómeno se debe a la disponibilidad o existencia de agua debajo del pavimento o en las capas inferiores del mismo, también a los suelos cohesivos como limos y arenas finas que se suspendan en el agua y a las deflexiones en bordes y esquinas de las losas.

Lo anterior, se puede evitar con la colocación de una sub-base que cuente con propiedades resistentes a la erosión del agua bajo las cargas aplicadas. Otra solución sería con el sello de las juntas con un material apropiado para dicho fin, para evitar el ingreso y la salida del agua y demás elementos.



**Figura 13.** Efecto de la erosión por bombeo en pavimento de concreto. Fuente: Calo, D. (2008).

### Levantamiento de las losas o escalonamiento

Este tipo de falla consiste en el movimiento hacia arriba de las losas de concreto, propiamente localizado en la zona de las juntas entre losas o en las fisuras que se forman, que puede causar desintegración de la estructura. Se pueden originar de la entrada de materiales de consistencias sólidas o líquidas en las juntas, así como de expansiones de la losa de concreto hidráulico debido a cambios bruscos en la temperatura. También a la realización de un inadecuado diseño de las juntas en las losas de concreto hidráulico.

Esta falla se puede contrarrestar realizando el sellado de las grietas y juntas con materiales específicos para tal fin, para prevenir la entrada y salida del agua y demás materiales no deseados. Además de realizar un adecuado diseño de las juntas entre las losas de concreto hidráulico.



**Figura 14.** Levantamiento de losas de concreto. Fuente: Calo, D. (2008).

### Despostillamientos de juntas

Consiste en la fragmentación de la losa de concreto, situada en los bordes de las juntas o fisuras, ocasionada principalmente por la debilidad del concreto hidráulico que no fue debidamente compactado o curado. También se dan por la realización de un aserrado temprano o por retiro antes de tiempo de moldes en las juntas de construcción, así como por la entrada de materiales incompresibles en las mismas.

Esto se podría evitar realizando una adecuada construcción del pavimento con los debidos cuidados que conlleva, así como la utilización de materiales de sello específicos para evitar el ingreso de agua.



**Figura 15.** Despostillamiento de juntas en la losa. Fuente: Propia (2016).

# Diseño de pavimentos rígidos

## Tipos

Para construir un pavimento rígido, hay varias y distintas maneras de hacerlo, todo depende del tipo de suelo que se tenga y de los volúmenes de tránsito a soportar.

### JPCP: Pavimento de concreto con juntas

Es un pavimento que posee juntas de contracción entre las losas para un mejor control del agrietamiento, además no requiere de acero de refuerzo (malla de acero). Cuenta con juntas transversales, las cuales ayudan que las losas no se agrieten a causa de esfuerzos producidos por cambios de temperatura y humedad. Se instalan dovelas en las juntas transversales del pavimento para que la transferencia de carga entre losas sea más eficiente, así como las barras de transferencia en las juntas longitudinales. El espaciado entre juntas generalmente no es mayor a los 6,1 m.

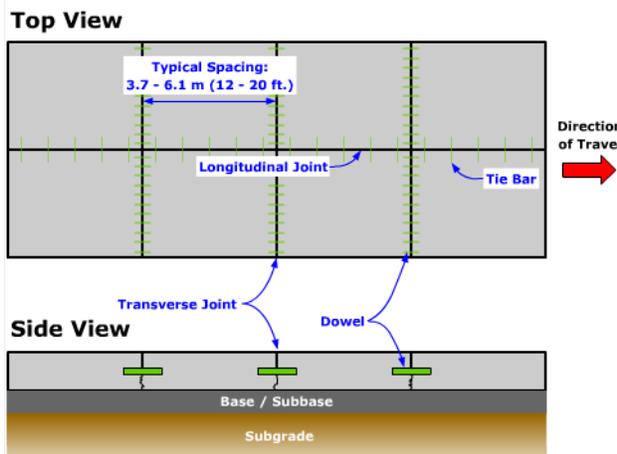


Figura 16. Detalle del JPCP. Fuente: Pavement Interactive (2007).

### JRCP: Pavimento reforzado y con juntas

Posee juntas de contracción y acero reforzado (malla de acero) en las losas para controlar el

agrietamiento. La malla de acero de refuerzo se utiliza para controlar o confinar las grietas ocasionadas en la losa por los esfuerzos de cambios de temperatura y humedad.

Además, se instalan dovelas en las juntas transversales del pavimento para que la transferencia de carga entre losas sea más eficiente, así como las barras de transferencia en las juntas longitudinales. La malla de refuerzo distribuye los esfuerzos por toda la losa de concreto hidráulico. Las juntas transversales están más espaciadas que en el JPCP, generalmente en un rango entre 7,6 m y 15,2 m.

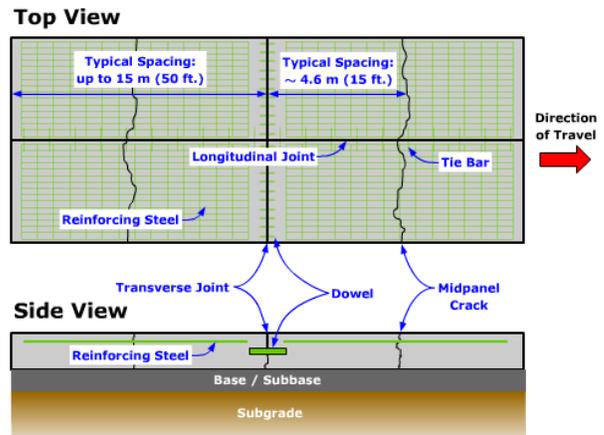


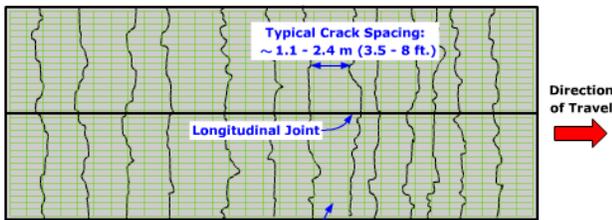
Figura 17. Detalle del JRCP Fuente: Pavement Interactive (2007).

### CRCP: Pavimento continuamente reforzado

Consiste en una losa continua, no requiere juntas de contracción ni transversales.

El acero de refuerzo, o malla continua, ayuda a mantener unidas o confinadas las grietas transversales que se forman, pero estas no pueden tener un ancho de más de 0,5 mm, para proteger a la estructura de la entrada de agua y demás elementos que podrían dañarla.

### Top View



### Side View

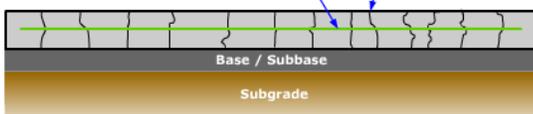


Figura 18. Detalles del CRCP. Fuente: Pavement Interactive (2007).

## Juntas entre las losas

Un pavimento rígido no puede ser un elemento totalmente continuo como el pavimento flexible, ya que se sabe que, por su rigidez, puede verse afectado por el agrietamiento y llegar al punto de falla, a causa de la aplicación de las cargas ocasionadas por el tránsito, los movimientos propios del suelo sobre el cual se apoya o los efectos causados por los cambios de temperatura, por lo que las losas de concreto deben estar separadas por juntas y tener una cierta libertad de movimiento.

Después de que la losa es colada se comienza por la creación de las juntas, posterior al fraguado y secado de las losas del pavimento, generalmente con procesos de aserrado. Las juntas entre las losas se crean con la función de controlar el agrietamiento y de aliviar la expansión y contracción del concreto ocasionados por la temperatura y por los cambios de humedad. Otras funciones de las juntas son las siguientes:

- Control del agrietamiento longitudinal y transversal, junto con los efectos de alabeo de las losas.
- Dividir el pavimento en secciones prácticas para la construcción (carriles de circulación).
- Absorber los esfuerzos causados por los movimientos de las losas.
- Proveer una adecuada transferencia de carga.

- Darle forma al depósito para el sello de la junta.

Por lo general, el espaciamiento máximo de juntas en pavimentos JPCP está entre 18 y 21 veces el espesor de la losa.

Entre los tipos de juntas se mencionan las siguientes:

### Juntas Longitudinales

Estas juntas tienen como función principal definir o limitar el ancho de las losas de concreto de manera que se evite la formación de grietas en el sentido longitudinal. Estas juntas longitudinales, en el caso de que la losa tenga menor o igual ancho que el máximo permitido para evitar el agrietamiento, se forman debido a la unión de dos calzadas de pavimento, de las que puede haber bombeo en ambas direcciones, o también se pueden formar o crear mediante el aserrado longitudinal en el caso de que las losas de concreto a colar tengan un ancho mayor al máximo especificado para evitar la grieta longitudinal.

### Juntas Transversales de Dilatación

Este tipo de juntas se crean con la finalidad de darle un espacio a las losas de concreto del pavimento para dilatarse por efectos de la temperatura, además estas juntas son muy vulnerables, ya que pueden perder su funcionalidad fácilmente, debido a que se introducen elementos sólidos entre ellas que pueden trabar su expansión, o también porque están muy espaciadas unas de otras lo que causa que las losas de concreto se puedan levantar al ocurrir compresión entre ellas. El espaciamiento de este tipo de juntas no debe ser muy pequeño, por el incremento en el tamaño de las losas cuando la temperatura aumenta, y pueden chocar unas con otras causando que se levanten; tampoco puede ser muy grande por pérdida de comodidad de tránsito de la carretera.

### Juntas Transversales de Contracción

Estas juntas tienen como principal función controlar el agrietamiento debido a las

contracciones del concreto hidráulico, más que todo cuando este se encuentra en su proceso de endurecimiento. También, pueden aparecer en la superficie de la losa grietas debidas a esfuerzos de tensión o tracción provocadas por una disminución en la temperatura de la losa o en su contenido de humedad, haciendo que estas se contraigan. Colocando juntas transversales a distancias adecuadas, estos esfuerzos de tensión se reducen, permitiendo una mejor funcionalidad de las losas en su respectiva operación.

## Juntas Transversales de Construcción

Las juntas transversales de construcción corresponden a las juntas frías en el concreto, que se originan cuando se finaliza una colada de una sección o paño del pavimento. Cuando se le quiera dar seguimiento a la colada del siguiente paño de concreto, ya la anterior ha fraguado, ocasionando que se forme una división del concreto nuevo con el viejo cuando se comience a colar nuevamente. Estas juntas normalmente se crean en un lugar de coincidencia con una junta de contracción.

Al no existir la posibilidad de crear una grieta para la transferencia de la carga en la junta creada, entonces se colocan barras en todo el espesor de la losa para poder absorber el efecto de falta de transferencia de carga.

## Aspectos a considerar en el diseño AASHTO 1993

Cuando se vaya a diseñar un pavimento, se debe realizar un análisis sobre variados factores que inciden en los pavimentos rígidos, conocerlos ampliamente e identificar en qué puede afectar cada uno de ellos.

### Capacidad y soporte de la sub-rasante

Las propiedades mecánicas de la sub-rasante hacen que el espesor de la losa de concreto por calcular dependa directamente de ellas, principalmente del módulo de reacción de la sub-rasante ( $k$ ). Este factor corresponde a la capacidad soportante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento,

el cual se puede obtener directamente mediante la prueba ASTM D1195 y D1196, o empíricamente a partir del procedimiento explicado más adelante.

Generalmente, es probable que se tengan diferentes valores de "k" a lo largo del tramo que se desee diseñar, por lo que se recomienda utilizar el valor promedio de los módulos para el diseño estructural, según la guía de diseño de pavimentos AASHTO 1993.

### Sub-base

De la sub-base también va a depender directamente el módulo de reacción de la sub-rasante, debido a que corresponde a una capa de material granular (generalmente) en la cual se apoyan las capas superiores del pavimento. El aporte de la sub-base tiende a incrementar el módulo de reacción de la sub-rasante, ya que le adiciona capacidad de soporte a la capa sub-rasante.

### Clima

Las condiciones climáticas siempre se deben considerar en el diseño de pavimentos rígidos, debido a que estas influyen directamente en sus propiedades durante las etapas de construcción y mantenimiento de las estructuras, por su constante exposición a la intemperie.

Los principales parámetros que afectan a un pavimento son la temperatura y las precipitaciones, debido a que, por ejemplo, los constantes cambios de temperatura hacen que el concreto hidráulico se contraiga o se expanda, haciendo posible la aparición de grietas en las losas de concreto. O también, con las precipitaciones, que con los cambios de humedad en el ambiente y la presencia del agua hacen que la superficie del pavimento se erosione o que el agua se infiltre por las juntas, debilitando al pavimento y existiendo más posibilidades de ocurrencia de fallas.

### Propiedades mecánicas del concreto

El concreto posee características y propiedades necesarias para ser en la actualidad el material

más utilizado en el mundo para la construcción. Sin embargo, así como es de utilizado, también presenta variedades dependiendo de los componentes con los cuales se fabrique, de las proporciones que se requieran y de las condiciones y cuidados que se tomen en cuenta a la hora de la construcción y mantenimiento de las obras por realizar con este material. Entre estas propiedades y características se encuentran trabajabilidad, resistencia, impermeabilidad, durabilidad, elasticidad, entre otras.

Para efectos de diseño de un pavimento rígido, hay que tener presente específicamente dos propiedades, las cuales son relevantes en el comportamiento de la estructura a lo largo de su vida útil. Las siguientes propiedades, junto con el espesor de la losa de concreto, definen la capacidad de soporte del pavimento al resistir las tensiones que ocurren en cada una de las losas debidas a las deformaciones en el material y a las cargas de tránsito.

- *Módulo de Ruptura (MR) o Resistencia a la Tracción por Flexión (S'c)*

Las cargas aplicadas sobre el pavimento de concreto, actúan sobre él de tal forma que hacen que este se flexione, por lo que el concreto utilizado deber ser resistente a la flexión. Al flexionarse una losa, su cara inferior se va a tensar provocando esfuerzos de tensión, por lo que el concreto debe ser resistente a la tracción, pero en menor medida debido a que el concreto naturalmente no resiste estos esfuerzos. Por tal motivo, en el diseño de pavimentos rígidos se considera la resistencia del concreto trabajando bajo este tipo de esfuerzo, que se denomina también Módulo de Ruptura (MR), que se especifica normalmente a los 28 días.

Esta propiedad se mide por medio de ensayos de aplicación de cargas a vigas de concreto, en la cual se le aplica la mitad de la carga en dos puntos de la viga (ASTM C78), específicamente a un tercio de su longitud medida desde los apoyos. También se encuentra el mismo ensayo con la única diferencia de que se le aplica una sola carga en el centro de la viga (ASTM C293).

Se presentan algunos módulos de ruptura de concreto recomendados según el tipo de pavimento:

Tipo de Pavimento	MR Recomendado	
	kg/cm <sup>2</sup>	psi
Autopistas	50,00	711,00
	48,00	682,70
Carreteras	48,00	682,70
Zonas Industriales	45,00	640,10
Urbanas Principales	45,00	640,10
Urbanas Secundarias	42,00	597,40

Tabla 1. Módulos de ruptura según tipo de pavimento. Fuente: CEMEX Concretos (2010).

- *Módulo de Elasticidad (Ec)*

El módulo de elasticidad del concreto se relaciona directamente con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Esta propiedad controla la manera de falla a ruptura que tendrá la losa de concreto y su capacidad a deformarse por la carga aplicada antes de que se produzca una grieta. Se puede determinar con las siguientes fórmulas:

$$Ec = 57000 * \sqrt{f'c}$$

Ec: Módulo de Elasticidad del concreto (psi).

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

**Ecuación 1.** Determinación del módulo de elasticidad del concreto. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

También están las siguientes en función del Módulo de Ruptura, solo que aplican para unidades del Sistema Inglés.

$$Ec = 6750 * MR$$

$$Ec = 26454 * MR^{0,77}$$

Ec: Módulo de Elasticidad del concreto (psi).

MR: Módulo de Ruptura del concreto (psi).

## Período de diseño

Esta propiedad corresponde a los años para los cuales va a ser diseñado un pavimento, esperando que la estructura dure esa cantidad determinada de tiempo. Generalmente, para una carretera de tránsito pesado, el período de diseño es de 20 años.

## Cargas de tránsito y ejes equivalentes

Todos los aspectos que conlleva una carretera, tales como el tipo de vialidad, las intersecciones, los anchos de calzada, los accesos, los servicios, el espesor del pavimento y demás propiedades, dependen directamente del volumen de tránsito con el que se vaya a trabajar; o dicho de otras palabras, de la demanda de vehículos que circulará durante un intervalo determinado, así como su tasa de crecimiento, su variación y su composición.

Los estudios relacionados con los volúmenes de tránsito se realizan con el objetivo de obtener todos los datos posibles sobre los vehículos que transitan, sus características y movimiento sobre determinados puntos dentro de un sistema vial. Dichos datos del tránsito hacen posible que se obtengan estimaciones fundamentadas de las condiciones del servicio dado a los usuarios.

El volumen de tránsito corresponde a la cantidad de vehículos que pasan por una sección transversal definida en una cantidad de tiempo específica.

- *Tránsito Promedio Diario (TPD)*

Se define como el número total de vehículos que pasan por un lugar durante un período específico, que tiene que ser igual o menor a un año y mayor que un día, el cual se divide entre el número de días del período.

- *Características de los volúmenes de tránsito*

El tránsito siempre se debe considerar dinámico, no estático, a causa de que la acción de las cargas sobre las estructuras es diferente, acompañadas de constantes vibraciones, por lo que si se consideran de esta forma el resultado será muy preciso para el período de duración del pavimento. Debido a que las variaciones en tales características son repetitivas, es importante siempre tenerlas en cuenta para efectos de diseño, programando capacidades en la estructura, relacionando volúmenes de tránsito de tiempos y lugares distintos, y teniendo en cuenta las actividades de control de tránsito y conservación de la estructura.

Es muy importante conocer las variaciones en las características y tenerlas

presentes, en la planeación y operación de la circulación vehicular, tanto en las horas, días, semanas y meses de mayor demanda como las variaciones de los volúmenes de tránsito con respecto a su distribución por carriles, su distribución por dirección y por su composición.

## Transferencia de Cargas

Corresponde a la capacidad que tiene la losa de concreto de transmitir o distribuir las cargas, provenientes del tránsito, a sus losas adyacentes, con la finalidad de disminuir el impacto de dichas cargas en el pavimento, reflejadas en las deformaciones y esfuerzos presentes. Entre las losas se crean fuerzas cortantes producto de la acción de las cargas de tránsito, las cuales se transmiten de una a otra losa por medio de las dovelas, ubicadas en el centro del espesor de la losa.

La transferencia de cargas está dada por un coeficiente o factor de transferencia que se representa con la letra  $J$ .

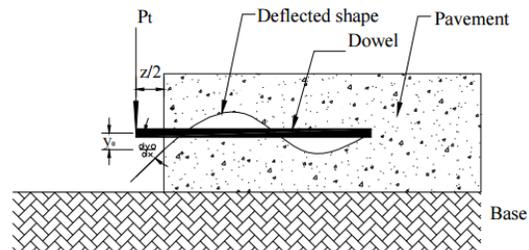


Figura 19. Funcionamiento de un elemento de transferencia de carga. Fuente: Federal Highway Administration (2009).

## Transferencia de cargas en juntas transversales

Representa la capacidad de un pavimento de concreto de transferir las cargas a las cuales está sometido, de una losa de concreto a la otra a partir de las juntas transversales. La existencia de una buena transferencia de cargas garantiza que el pavimento trabaje de manera uniforme y requiera del mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil. Por otro lado, si no existe un buen sistema de transferencia de cargas, o estas no se transfieren correctamente, el pavimento de concreto puede presentar anomalías, tales como deformaciones o hundimientos en las zonas de

las juntas de una losa a la siguiente, afectando el tránsito de los vehículos y poniendo en riesgo la durabilidad del pavimento.

La eficiencia de dicha transferencia de cargas depende de varios factores, además de que tienden a reducirse con el paso de los años con las repeticiones de carga.

Dentro de los factores de eficiencia de transferencia de cargas se pueden mencionar los siguientes:

- 1) Cantidad de tránsito.
- 2) Soporte lateral de las losas, en el cual, su confinamiento contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se producen en la losa de concreto originados por las cargas aplicadas. Un pavimento se puede considerar lateralmente soportado si el carril cuenta con un ancho mayor o igual a 4 metros, si hay confinamiento con aceras o guarniciones, o si existen espaldones o acotamientos laterales.
- 3) Dispositivos especiales de transferencia de carga, tales como las barras de traspaso, pasajuntas o dovelas, las cuales son barras de acero liso con  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$  (esfuerzo de fluencia del acero) que van embebidas en el concreto, pero no adheridas a este, para que permitan el libre movimiento de las losas y que transmitan verticalmente la carga aplicada de una losa a la otra. Además de que se colocan alineadas a la mitad del espesor de las losas. Se recomienda utilizarlas cuando el tránsito pesado sea mayor al 25% del total o cuando los ejes equivalentes simples de diseño sean más de 5,0 millones.  
Las dovelas son colocadas en canastas de alambre de previo a la pavimentación. Luego de la cura del concreto hidráulico, las juntas son cortadas usando sierras con punta de diamante (aproximadamente hasta un tercio del espesor de la losa).
- 4) Interacción de las caras de la junta transversal en el caso de que no existen dispositivos especiales de transferencia de carga. En su lugar puede haber transferencia de cargas en las juntas por

el roce de las caras de las losas de concreto adyacentes, lo cual depende principalmente de la angulosidad y rugosidad de los agregados y del ancho de la junta, específicamente en la zona de la grieta que se forma a partir del corte de la losa de concreto para la creación de las juntas. Este método es recomendado solo para cuando existe tráfico ligero.

## Capacidad de carga de los pavimentos de concreto hidráulico

Un pavimento rígido está diseñado, o se puede diseñar, para que soporte gran cantidad de cargas aplicadas y el paso de millones de ejes equivalentes totales, además de que la vida útil de estas estructuras puede ser de varias décadas.

La resistencia y capacidad de soporte depende principalmente del tipo de concreto hidráulico por utilizar y del espesor de la losa del mismo material, y mientras mayor sea dicho espesor su capacidad de soporte aumentará sustancialmente. Al incrementar el espesor de la losa de concreto aproximadamente en 2,5 cm, a su vez se aumenta también al doble la capacidad de carga de ese pavimento, es decir, un pavimento que por ejemplo tenga un espesor de losa de concreto de 30,5 cm soporta aproximadamente 400% más que un pavimento de 25,5 cm.

## Factores a considerar para el diseño

Para realizar el diseño estructural de un pavimento rígido se deben de considerar una serie de factores y condiciones, de los cuales va a depender directamente el espesor de la losa de concreto hidráulico. Dichos factores se detallan a continuación:

### Nivel de confianza (R: Reliability)

Está basado en la clasificación del pavimento, es decir, de su importancia y volumen de tránsito.

## Desviación estándar en la estimación del índice de servicio terminal ( $S_o$ )

En el tramo de prueba de la AASHTO se determinó que la desviación estándar para pavimentos rígidos es de 0,35, y para pavimentos flexibles es de 0,45.

## Ejes equivalentes de diseño

Representan la cantidad de repeticiones del eje de carga de 18000 libras para un período de diseño determinado. Se utiliza esta carga para efectos de cálculo, debido a que el tránsito está compuesto por vehículos de distinto peso y número de ejes.

## Cambio en el PSI ( $\Delta$ PSI)

PSI corresponde al Present Serviceability Index. Representa la diferencia entre el índice de servicio inicial y el índice de servicio final del pavimento. El PSI inicial en pavimentos rígidos es de 4,5 y en pavimentos flexibles es de 4,2.

## Propiedades de las capas de soporte

Van incluidas las propiedades y características importantes de las capas de soporte del pavimento (base, sub-base y sub-rasante). Estas propiedades corresponden el espesor, módulo de rigidez, módulo de reacción, porcentaje de CBR, pérdida en capacidad de soporte, etc.

## Propiedades del concreto hidráulico

Se toman en cuenta las propiedades del concreto hidráulico, tales como el módulo de rigidez, módulo de ruptura, peso específico del concreto, etc.

## Coefficiente de drenaje ( $C_d$ )

Este coeficiente depende de la calidad del sistema de drenaje y el porcentaje de tiempo que el pavimento estará saturado con humedad. Se determina con la Figura 52.

## Coefficiente de transferencia de carga ( $J$ )

Se relaciona con el porcentaje de la carga aplicada sobre una losa que es transferida a una losa contigua, ya sea por el acero de transferencia de cargas (dovelas o barras pasajuntas) o por la trabazón del agregado. Se puede determinar con la Figura 53.

# Beneficios

## Beneficios de un pavimento rígido sobre uno flexible

En general, el pavimento rígido presenta múltiples ventajas sobre un pavimento flexible, pero se aclara que siempre se debe considerar el tipo de ligante asfáltico que se esté implementando, así como el tipo de cemento a utilizar en la elaboración del concreto hidráulico.

Los beneficios más destacados son los siguientes:

- 1) Generalmente, un pavimento rígido tendrá una durabilidad mayor, por lo que requerirá de un menor mantenimiento, lo que ahorraría dinero y resultaría más económico a lo largo del ciclo de vida. Por lo general, la durabilidad del concreto hidráulico es de aproximadamente tres veces mayor a la de la mezcla asfáltica, antes de requerir trabajos importantes de rehabilitación, principalmente a causa de que el concreto hidráulico gana resistencia conforme el tiempo pase, caso contrario a la mezcla asfáltica.



Figura 20. Diferencia del tiempo de primera rehabilitación. Fuente: CEMEX (2011).

2) El efecto de la isla de calor, lo cual significa que las ciudades son más calientes que las zonas que se encuentran alrededor de ellas. Esto puede favorecer el desarrollo de enfermedades, molestias y aumento del uso del aire acondicionado para contrarrestar la temperatura. El concreto hidráulico, al ser un material de color más claro que la mezcla asfáltica, absorbe en menor cantidad el calor emitido por los rayos del sol, contribuyendo a que se reduzca la temperatura en las ciudades.

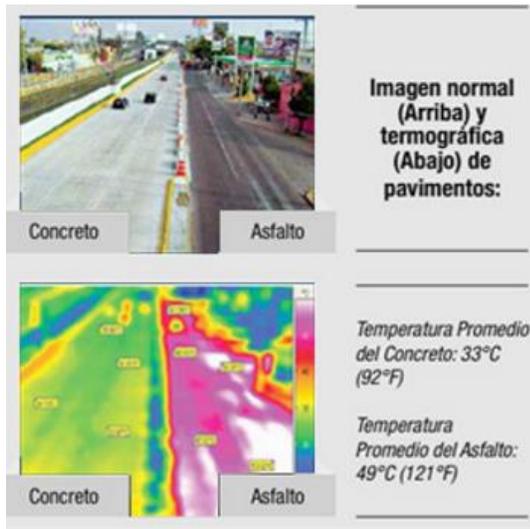


Figura 21. Efecto de la temperatura en ambos pavimentos. Fuente: CEMEX (2011).

3) En el consumo de combustible también va a repercutir el tipo de material a utilizar en el pavimento. Esto se debe a la rigidez del concreto hidráulico frente a la mezcla asfáltica que ayuda a reducir el efecto llamado deflexión, el cual consiste en que los neumáticos de los vehículos se hunden más en los pavimentos flexibles en comparación con los rígidos, lo cual no se puede observar a simple vista. Sin embargo, tiene un impacto considerable sobre la eficiencia energética debido a que, si se presenta un hundimiento, se va a requerir de mayor esfuerzo para transitar. Debido a lo anterior se puede presentar un ahorro en combustible, aproximadamente un 3%, en pavimento rígido respecto al flexible, esto con

respecto a un estudio realizado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts en el 2012.

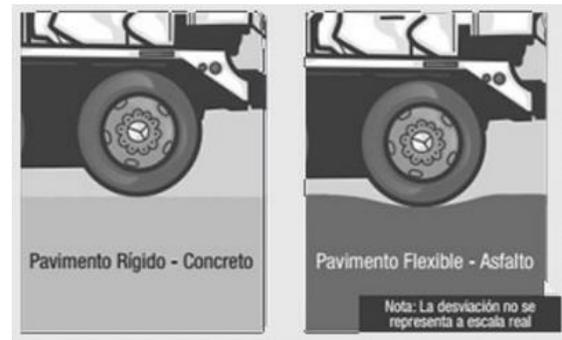


Figura 22. Efecto de la deflexión en ambas estructuras. Fuente: CEMEX (2011).

4) Una estructura de pavimento rígido no requiere de capas de soporte, como sí lo necesita un pavimento flexible, que además de la carpeta asfáltica requiere de una base y una sub-base para contribuir con el soporte y distribución de las cargas que se le aplican. Una losa de concreto hidráulico se puede apoyar directamente sobre la sub-rasante, pero generalmente se coloca sobre una sub-base granular para impedir que el agua y material fino de la sub-rasante se filtren por las juntas entre las losas.

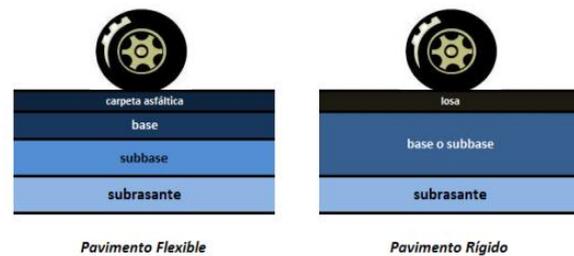
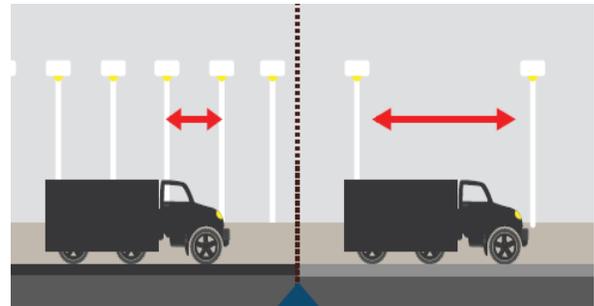


Figura 23. Capas de soporte de ambas superficies de rueda. Fuente: Rodríguez, E. (2009), Universidad de Piura.

5) Los precios del concreto son estables y predecibles, mientras que los del ligante asfáltico se encuentran estrechamente relacionados a los precios del petróleo internacional, los cuales son volátiles y crecen por encima de la tasa de inflación. En cambio, el concreto hidráulico sigue dinámicas locales.

- 6) El concreto hidráulico es más resistente ante el contacto de diferentes líquidos y químicos presentes en el ambiente de las carreteras, tales como agua o derrames de aceites, diésel, gasolina y demás líquidos provenientes de los vehículos, sumándole los efectos de la intemperie.
- 7) La resistencia que presenta el concreto hidráulico ante el cambio de temperaturas. El ligante asfáltico se ve afectado debido a que es un material termoplástico, por lo que su consistencia cambia con la temperatura lo que incide en sus propiedades y lo deforma permanentemente. Por el contrario, el concreto hidráulico puede resistir altas y bajas temperaturas sin verse afectada su resistencia, tampoco pierde parte de sus componentes porque no contiene elementos volátiles como si los tiene la mezcla asfáltica.
- 8) El pavimento flexible comúnmente puede presentar deformaciones en zonas donde los vehículos frenan y arrancan, deformaciones como ondulaciones o corrugaciones, algo que no sucede en el pavimento rígido porque no se deforma o presenta deformaciones mínimas, no es un material plástico como el asfalto.
- 9) Una ventaja de no deformarse es que no acumulan o empozan el agua. Esto es fácilmente visto en las carreteras y calles con pavimento flexible en nuestro país, donde se forman, de manera muy común, pozos o charcos de agua.
- 10) Por otro lado, en cuanto a la seguridad en las carreteras, los pavimentos rígidos se pueden considerar más seguros debido a que reducen el efecto de "acuaplaneo", es decir, al deslizamiento de los vehículos en superficies mojadas producto de las deformaciones de la superficie. Se menciona que los pavimentos flexibles pueden ser más rugosos modificando su textura, pero generalmente son más susceptibles ante este fenómeno.

- 11) Las señales y demás marcas hechas con pintura sobre la superficie de rodamiento son más fáciles de que se laven por la lluvia o por el rozamiento de los vehículos en un pavimento flexible que uno rígido.
- 12) Construir una carretera con pavimento rígido también requiere menos iluminación que si fuera con pavimento flexible, aproximadamente un 30% menos (se refiere a la cantidad de luminarias requeridas), debido a que al ser el concreto hidráulico de un color más claro que la mezcla asfáltica refleja mejor la luz y existe mayor visibilidad. Además, también se ahorra dinero en invertir en el sistema de iluminación de la carretera.



**Figura 24.** Separación del alumbrado público en ambas estructuras. Fuente: CEMEX (2011).

- 13) Se ahorra energía en comparación del pavimento flexible, en el cual la mezcla asfáltica se debe someter a altas temperaturas en su elaboración. También debe permanecer a altas temperaturas dependiendo del tiempo de transporte y colocación, además de una temperatura mínima a la cual se debe compactar.
- 14) El concreto asfáltico se puede desmoronar fácilmente, a causa de que el ligante asfáltico pierda la capacidad de aglutinar a los agregados por el contacto con agentes ambientales o sustancias dañinas, pero esto depende de si la mezcla asfáltica está bien diseñada o no. Por el contrario, el concreto hidráulico tiene esa ventaja sobre la mezcla asfáltica, es resistente ante agentes o sustancias dañinas y ambientales.

15) El pavimento rígido tiene la ventaja que, durante su construcción, puede emplear equipos tecnológicos diversos lo que disminuiría el requerimiento de mano de obra, lo que aceleraría los procesos beneficiando los tiempos de obra. Además, el pavimento rígido se puede construir en una sola pasada debido a que no es una estructura de capas múltiples como el pavimento flexible.

16) En temas de mantenimiento de pavimentos, el concreto hidráulico se puede utilizar para realizar reparaciones de manera eficiente, ya que se puede colar una sobrecapa de un determinado espesor sobre un pavimento flexible deteriorado (whitertopping) u otra superficie debidamente preparada, garantizando una estructura de excelentes características y, generalmente dependiendo del diseño, más durable que una sobrecapa asfáltica.

17) El pavimento rígido es más recomendable de usar para carreteras con volúmenes altos de tránsito, es más económico en este aspecto que un pavimento flexible.

## Beneficios de un pavimento flexible sobre uno rígido

El pavimento flexible también posee distintas características que lo hacen ventajoso con respecto a un pavimento rígido. Los beneficios más destacados son los siguientes:

1) El pavimento flexible, generalmente, es menos costoso que el pavimento rígido respecto a la construcción inicial de cada uno de ellos. Esa diferencia generalmente es un 10% aproximadamente.



Figura 25. Comparación de costos iniciales. Fuente: CEMEX (2011).

2) El pavimento flexible es más recomendable de usar para carreteras con volúmenes bajos de tránsito, es más apto en este aspecto que un pavimento rígido.

3) El pavimento de concreto hidráulico necesita de juntas entre las losas, de las cuales, está constituido debido a su mayor rigidez; por lo que, si no se construyen, el pavimento es propenso a agrietarse. Por el contrario, el pavimento flexible es mucho más flexible que el pavimento rígido, haciendo posible su construcción como una estructura continua.

4) Por lo general, las actividades de mantenimiento para el pavimento de concreto asfáltico son bastante sencillas; además de que no se requiere mucho tiempo para ejecutarlas y el tránsito se puede reanudar en poco tiempo.

5) Otra ventaja es que el pavimento flexible puede entrar en operación pocas horas después de haberse colocado, lo cual facilita la circulación del tránsito y rapidez de construcción, caso contrario al pavimento rígido.

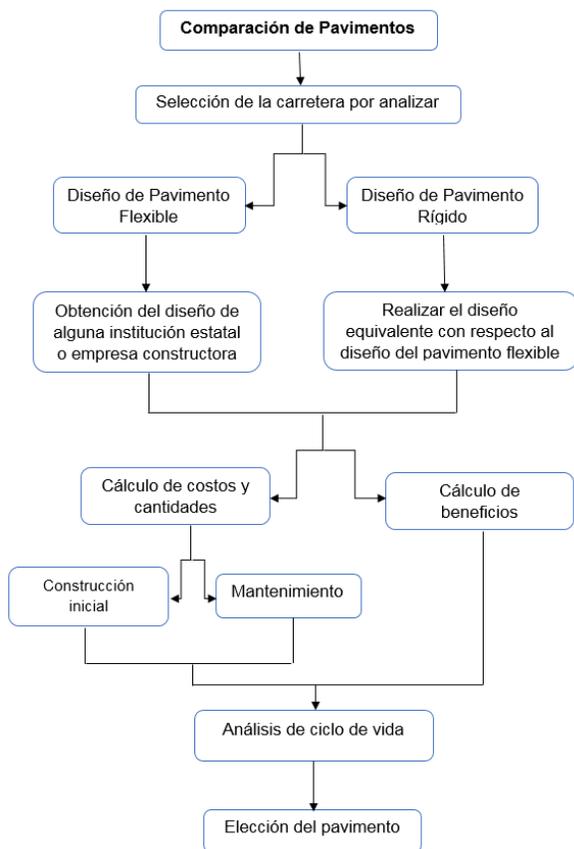
6) El pavimento de concreto asfáltico generalmente posee un mayor valor de rescate al final del período de diseño de

la estructura, comparado con el pavimento de concreto hidráulico.

- 7) Además, es factible realizar la construcción del pavimento flexible en varias etapas, y no de manera continua como lo requiere el pavimento rígido.

# Metodología

## Pasos a seguir



Para que fuera posible realizar el presente trabajo, se tuvo que recurrir a diferentes instituciones estatales, así como empresas constructoras privadas, además de distintos profesionales tanto de la empresa encargada como externos a ella.

## Datos generales de la carretera en estudio

La carretera en análisis corresponde a la Ruta Nacional N°1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia, la cual se ubica en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, que abarca los cantones de Liberia, Bagaces y Cañas. La ruta descrita comprende 50,61 km entre las ciudades de Cañas y Liberia, y contempla la ampliación a 4 carriles, con la construcción de 2 carriles y rehabilitando los 2 restantes.



Figura 26. Ubicación de la carretera. Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2014).

CARACTERÍSTICAS DE LA CARRETERA	
Longitud (km)	50,61
Ancho total con 4 carriles (m)	14,60
Ancho de espaldón (m)	1,80
Velocidad de diseño (km/h)	90,00
N° carriles	4
Ancho de carril (m)	3,65

Tabla 2. Características generales de la ruta. Fuente: CONAVI (2011).

## Diseño del pavimento flexible

Para la realización del presente proyecto, se buscó un diseño de algún pavimento flexible en construcción o ya construido en cualquier parte del país, diseñado para tránsito pesado. Se recurrió al Ministerio de Obras Públicas y Transportes y al Consejo Nacional de Vialidad para la obtención del diseño mencionado, y se decidió utilizar el pavimento recientemente construido para la Ruta Nacional N°1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia. El diseño propuesto utilizado correspondía a un pavimento semi-rígido, constituido por una carpeta asfáltica sobre una base estabilizada (según el CONAVI), ya que para tránsito pesado se usa base estabilizada cuando la superficie de rueda será asfáltica, por lo que no se utilizó un pavimento propiamente flexible. Entonces, se decidió utilizar el diseño del pavimento semi-rígido por su superficie de rueda de concreto asfáltico, para su comparación con un pavimento rígido con superficie de rueda de concreto hidráulico.

En el CONAVI se obtuvo el expediente de la licitación N° 2011LP-000004-0DI00, correspondiente a la construcción de la carretera mencionada, en donde estaba el diseño del pavimento, las actividades de construcción y los costos respectivos, además de las ofertas que presentaron las diferentes empresas que participaron en la licitación. El costo del pavimento se calculó basado en la oferta que presentó Constructora MECO, e investigando los precios de los materiales y equipos necesarios.

## Diseño del pavimento rígido

En el mismo diseño obtenido del CONAVI, venía la propuesta del pavimento rígido para la construcción de la carretera en análisis, por lo que se decidió utilizar algunas de esas variables para proceder con el diseño del pavimento rígido.

El diseño de la losa de concreto se realizó de maneras diferentes, todas basadas en la Guía de Diseño de Pavimentos de la AASHTO 1993. En la primera, se utilizó el programa de diseño de pavimentos rígidos WinPAS 12; para la segunda se hizo uso de los gráficos y nomogramas presentes en la guía mencionada, y para la tercera se utilizó la ecuación para la

estimación del espesor de la losa de concreto, también proveniente de la Guía de la AASHTO 1993.

Con respecto a los costos, se basó en la oferta que presentó Constructora MECO para la licitación de la carretera en estudio, igualmente se investigó y consultó los precios de los materiales y equipos necesarios.

## Análisis de ciclo de vida

Una vez obtenidos los costos iniciales de construcción de ambos pavimentos, se empezó por calcular los costos de mantenimiento que requería cada uno de ellos durante el período de diseño correspondiente.

Las actividades y costos de mantenimiento que se le aplicaron a los pavimentos en este estudio, se realizaron bajo la licitación N° 2014LN-000018-0CV00, bajo el nombre "*Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada*", proporcionada por el CONAVI. Además, profesionales de la empresa encargada, en este caso CEMEX Costa Rica S.A., contribuyeron en las decisiones tomadas.

También, se decidió calcular el ahorro de dinero que se tendría con un pavimento respecto de otro, con los beneficios o ventajas presentes, para lo cual se recurrió a instituciones como la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) y la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP).

## Comparación de pavimentos

Para realizar una comparación óptima de los pavimentos analizados, se hará uso de distintos métodos para ver la viabilidad de cada uno y obtener así el más apto según las condiciones consideradas.

En un principio, se pretendía utilizar el programa HDM-4 para realizar la comparación de ambas estructuras, pero esto se veía difícil desde ese momento debido al tiempo con el que se contaba para realizar el presente documento, ya que este software es bastante complejo, con el requerimiento de múltiples variables, tanto de

datos empíricos como de mediciones de campo para aumentar la precisión del resultado.

En la carretera en análisis, para definir su construcción se utilizó el programa anteriormente mencionado, el cual arrojaba resultados sobre cuál de los dos pavimentos era mejor para construir, según las variables y condiciones que se manejaron para dicho programa. En CONAVI encargó dicho estudio a dos uruguayos, los cuales corrieron el modelo considerado en el software y enviaron los resultados por medio de un archivo de Microsoft Excel, determinando que el pavimento rígido era el método más económico a mediano plazo.

Debido a que la utilización del programa HDM-4 representó una limitación por las condiciones mencionadas, se decidió utilizar una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel, la cual fue desarrollada por la empresa CEMEX Costa Rica, en la cual se obtenían relaciones de efectividad y costos totales del pavimento a lo largo del ciclo de vida, con respecto a valores de PSI y de IRI a lo largo del período de diseño de cada pavimento. Dicho archivo de Excel fue basado en la hoja de cálculo desarrollada por el MOPT-BID (Ministerio de Obras Públicas y Transportes junto con el Banco Interamericano de Desarrollo), en la cual arrojaba como resultado el pavimento más conveniente o económico a construir. Dicha hoja de cálculo fue solamente diseñada para la Carretera Cañas-Liberia.

Se realizaron comparaciones secundarias, en las que se optó por realizar un análisis de los beneficios de los pavimentos contra su costo de construcción con el fin de observar la viabilidad de cada uno de ellos. Además, se realizó una comparación de los costos totales de construcción y de mantenimiento, para posteriormente traer todo a valor presente y determinar el pavimento menos costoso.

# Resultados

Para realizar el análisis del costo de ciclo de vida de ambas estructuras de pavimento, y posteriormente verificar cuál era la más adecuada según las condiciones presentes, se investigaron, calcularon y verificaron diversos aspectos necesarios tales como la construcción inicial, procedimientos de mantenimiento y rehabilitación, ahorro producido según los beneficios de cada pavimento, entre otros. Cabe destacar que la carretera por analizar corresponde a la Ruta Nacional N°1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia, además de que para ambas estructuras se contempla un período de diseño de 20 años.

## Construcción inicial

La construcción inicial de un pavimento se refiere al costo que se requiere para que sea posible tener una estructura de este tipo nueva y sin ningún tipo de deterioro. Generalmente, la diferencia en el costo de la construcción inicial entre un pavimento rígido y un pavimento flexible es un 10% aproximadamente.

Para obtener dicho costo inicial, al menos se deben de tener presentes tres aspectos importantes que, juntos, dan como resultado el costo total inicial de un pavimento. Estos aspectos son equipo y maquinaria, mano de obra y materiales utilizados.

## Pavimento de concreto asfáltico

Para la obtención del diseño de la carretera elegida construida en pavimento flexible, como está planteado en los objetivos, se recurrió a instituciones públicas. Toda la información obtenida fue gracias al Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), el cual tiene a disposición el

expediente de la licitación pública internacional 2011LP-000004-0DI00, correspondiente a la construcción de la carretera Cañas-Liberia.

El diseño propuesto por el CONAVI para este pavimento se detalla a continuación:

PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)	
Estructura propuesta	Espesor (cm)
Sub-Rasante (CBR 3,2%)	-
Préstamo (CBR=>10%)	45
Sub-Base Granular	30
Base Estabilizada BE-35	20
Carpeta Asfáltica	15

Tabla 3. Estructura de pavimento de concreto asfáltico propuesta. Fuente: CONAVI (2011).

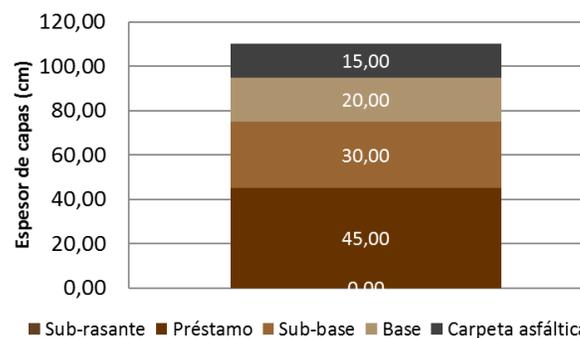


Figura 27. Representación gráfica de la estructura de concreto asfáltico. Fuente: Elaboración propia (2016).

La información completa del diseño propuesto del pavimento de concreto asfáltico se detalla en el Apéndice 2.

En un principio se quería obtener un diseño de pavimento flexible para realizar el análisis, pero debido a que el proyecto se enfatiza en carreteras de tránsito pesado, un pavimento flexible no se diseña para este tipo de cargas, por un asunto de economía, sino que el diseño obtenido corresponde al de un pavimento semi-rígido, el cual posee una capa de ruedo

asfáltica de 15 cm sobre una base estabilizada con cemento de 20 cm (según CONAVI).

Para el cálculo de las cantidades a utilizar para la posterior obtención del costo inicial de construcción, se recurrió a las ofertas que hicieron varias empresas nacionales e internacionales ante la licitación para la construcción de la carretera. La oferta en la cual se basó este estudio fue la de la empresa constructora MECO, debido a que la oferta que presentó la empresa ganadora de la licitación, FCC Construcción de Centroamérica S.A., no era la más indicada debido a que después de la construcción de la carretera tuvieron pérdidas económicas significativas por ofertar un precio tan bajo, por lo que se consideró que al utilizar la oferta de MECO y sus respectivas cantidades se tendrían valores más reales.

## Equipo y maquinaria

Para los equipos y máquinas que utilizaron para la construcción del pavimento de concreto asfáltico se tomaron como base tanto las máquinas como las horas laboradas que se presentaron en la oferta de Constructora MECO, excepto el costo de cada una de ellas. Lo anterior es debido a que la presentación de ofertas para la licitación correspondiente se realizó en el 2011, por lo que los precios a la fecha de hoy ya han cambiado con respecto a los de ese año, además de que Constructora MECO cuenta con servicios de alquiler de maquinaria y venta de materiales de construcción de pavimentos, por lo que los precios presentados en la oferta de ellos están bastante reducidos.

Para los costos de maquinaria se optó por solicitar cotizaciones a empresas con servicios de alquiler de este tipo de equipo de construcción, tales como MATRA, Constructora MECO, AVAL Rental y Grupo Orosi, con el fin de conseguir los costos horarios de cada uno de los equipos para facilitar los cálculos, ya que en la oferta de base se reportaron las horas laboradas de cada uno de ellos.

## Mano de obra

Igualmente, para la mano de obra utilizada para la construcción de la estructura, se trabajó con el personal y las horas laboradas según se

presentaron en la oferta de Constructora MECO, excepto el salario registrado para cada miembro del personal debido a las razones anteriormente mencionadas, ya que los salarios reportados corresponden al 2011, los cuales son diferentes para el presente año.

El cálculo de los salarios se basó en los salarios mínimos que reportó el Ministerio de Trabajo para el segundo semestre del presente año. Estos se reportan por día, pero se utilizó una jornada laboral de 10 horas para calcularlos por hora y facilitar el cálculo del costo de mano de obra.

## Materiales por utilizar

Igualmente, para los materiales necesarios para la construcción del pavimento, se utilizaron las cantidades según su unidad, reportados en la oferta con la que se decidió trabajar. Para todas las actividades que se debían realizar, se trabajó con las cantidades de materiales reportadas, excepto la actividad de la colocación de base estabilizada, la cual se calculó de igual manera para ambas estructuras de pavimento (rígido y semi-rígido), con las mismas cantidades de materiales y costos y un espesor de 20 cm, además de un porcentaje de cemento del 6%. El cálculo de cantidades para la base estabilizada se detalla en la sección de Pavimento de Concreto Hidráulico.

Con respecto a los precios de los materiales por utilizar según su unidad, no se trabajaron con los costos reportados en la oferta, debido a razones explicadas anteriormente, ya que estos van a variar desde el 2011 hasta la actualidad. Se decidió entonces contactar a empresas que manejen la venta de materiales para la construcción de pavimentos, con el fin de obtener la información de los costos requeridos, para lo cual se contactó a Constructora MECO, Grupo Orosi y a CEMEX Costa Rica S.A.

El cálculo de la construcción inicial del pavimento con sus respectivas actividades y de sus correspondientes aspectos de equipo y maquinaria, mano de obra y materiales se muestran a continuación:

PAVIMENTO SEMI RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)		
N°	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
CR 201.01	1	Limpieza y desmonte
CR 203.01	2	Remoción (estructuras y obstrucciones)
CR 203.02	3	Remoción (tuberías)
CR 204.05 (a)	4	Excavación de préstamo seleccionado para acabado (caso 2)
CR 301.06	5	Sub base de agregados, graduación B
CR 209.01 (a)	6	Excavación (para estructuras)
CR 414.01	7	Riego de liga (tipo CRS-1 capa de liga)
CR 413.02	8	Riego de imprimación
CR 413.03	9	Material de secado
CR 303.03 (a)	10	Reacondicionamiento de la calzada existente
CR 302.01 (a)	11	Base estabilizada con cemento Portland tipo BE-35, 20 cm espesor
CR 401.01 (a)	12	Pavimento de concreto asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19 mm, de 15 cm de espesor compactado para superficie de ruedo
CR 401.01 (b)	13	Pavimento de concreto asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19 mm, espesor compactado variable para espaldones, (cuña de 15 a 7 cm)

**Tabla 4.** Actividades para la construcción del pavimento de concreto asfáltico. Fuente: CONAVI (2011).

PAVIMENTO SEMI RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)				
ACTIVIDAD	U/M	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	MONTO TOTAL
1	ha	₡ 2.786.671,64	75,00	₡ 209.000.373,28
2	u	₡ 238.724,20	50,00	₡ 11.936.210,18
3	m	₡ 109.389,83	1.500,00	₡ 164.084.747,15
4	m3	₡ 16.518,98	950.000,00	₡ 15.693.035.291,74
5	m3	₡ 23.960,88	200.000,00	₡ 4.792.175.326,22
6	m3	₡ 6.259,62	35.000,00	₡ 219.086.532,91
7	lt	₡ 678,07	1.350.000,00	₡ 915.392.552,43
8	lt	₡ 696,94	1.350.000,00	₡ 940.872.041,98
9	m3	₡ 20.951,30	7.500,00	₡ 157.134.751,47
10	m2	₡ 1.102,60	300.000,00	₡ 330.779.051,77
11	m2	₡ 10.355,89	1.000.000,00	₡ 10.355.892.200,29
12	m2	₡ 27.071,21	830.000,00	₡ 22.469.104.895,41
13	m2	₡ 19.948,95	170.000,00	₡ 3.391.321.380,87
<b>TOTAL</b>				<b>₡ 59.649.815.355,69</b>

Tabla 5. Costo de la construcción inicial del pavimento de concreto asfáltico. Fuente: Elaboración propia (2016).

La construcción inicial obtenida fue de ₡59.649.815.355,69 para el pavimento de concreto asfáltico aplicado a la Carretera Cañas-Liberia. Se menciona que, tanto para este pavimento como para el pavimento rígido, los cálculos de construcción inicial se realizaron con respecto a las actividades propias para la construcción de la estructura de pavimento, no se incluyeron las actividades de puentes, colocación de tuberías, señalización, construcción de pasos para animales o la colocación de los muros New Jersey. Además, los cálculos detallados para cada actividad se muestran en el Apéndice 3.

## Pavimento de concreto hidráulico

Para la obtención del costo inicial del pavimento de concreto hidráulico se tuvo que diseñar la losa de concreto, el diseño del acero (dovelas y barras longitudinales) y también el de la base estabilizada, así como la estimación de las cantidades de materiales de cada uno de esos aspectos.

El diseño propuesto para este pavimento se detalla a continuación:

PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)	
Estructura propuesta	Espesor (cm)
Sub-Rasante (CBR 3,2%)	-
Préstamo (CBR=>10%)	20,00
Sub-Base Granular	20,00
Base Estabilizada BE-35	20,00
Losa de concreto	26,52

Tabla 6. Estructura de pavimento de concreto hidráulico propuesta. Fuente: Elaboración propia (2016).

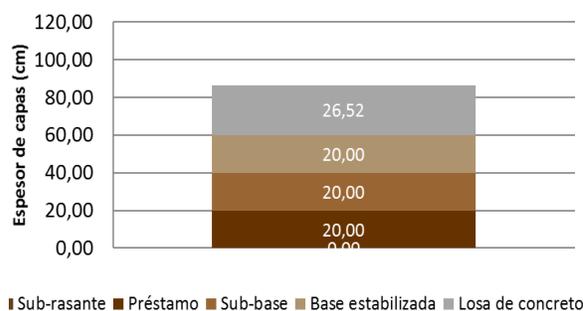


Figura 28. Representación gráfica de la estructura de concreto hidráulico. Fuente: Elaboración propia (2016).

La información del diseño propuesto del pavimento de concreto hidráulico se detalla en el Apéndice 5.

## Ejes equivalentes de diseño

Como base, se tomó una medición de campo realizada por la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, la cual estaba disponible en el expediente de la licitación con el cual se trabajó. Dicha medición corresponde al 2006 pero se proyectó al 2016, considerando una tasa de

crecimiento de 6%, con la siguiente fórmula incluida en el expediente:

$$TPD_j = TPD(2006) * \left(1 + \% \frac{\text{crecimiento}}{100}\right)^{j-2006}$$

**Ecuación 2.** Proyección del Tránsito Promedio Diario. Fuente: Consejo Nacional de Vialidad (2011).

En donde “j” corresponde al año al que se quiere proyectar el valor de TPD. Con esta fórmula se obtuvieron los siguientes resultados:

DISTRIBUCIÓN DEL TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO						
Distribución Vehicular	Automóvil	Carga liviana	Buses	2 Ejes	3 Ejes	5 Ejes
<b>TPD</b>	39,65%	30,65%	3,95%	9,93%	3,21%	12,61%
2006	9415	3733	2886	372	935	302
2007	9980	3957	3059	394	991	320
2008	10579	4194	3243	418	1051	339
2009	11213	4446	3437	443	1114	360
2010	11886	4713	3644	470	1180	381
2011	12599	4996	3862	498	1251	404
2012	13355	5295	4094	528	1326	428
2013	14157	5613	4339	559	1406	454
2014	15006	5950	4600	593	1490	481
2015	15906	6307	4876	628	1580	510
2016	16861	6685	5168	666	1674	541

**Tabla 7.** Determinación del tránsito promedio diario para el 2016. Fuente: Elaboración propia (2016).

Con los valores de TPD obtenidos, se procedió a calcular los ejes equivalentes de diseño como se muestra a continuación.

Los ejes equivalentes totales de diseño para el 2016, correspondientes al pavimento rígido, dieron como resultado 50.783.765 ejes. Se aclara que para el pavimento de concreto asfáltico, la cantidad de ejes equivalentes que se

usaron corresponden al año de la construcción de la carretera y no a las condiciones actuales, pues la idea era generar un diseño de pavimento rígido actualizado a partir de un pavimento flexible ya diseñado o construido. El procedimiento de cálculo y las tablas utilizadas se detallan en el Apéndice 4.

EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO 20 AÑOS (2016)								
Tipo de vehículo	TPD	TPD Anual	Factor Camión	% Crecimiento	Factor de crecimiento a 20 años	Factor de sentido	Factor carril	EEQ diseño
Automóviles	6.685	2.440.111	0,0005	6%	36,79	0,5	0,7	15.710
Carga Liviana	5.168	1.886.461	0,01	6%	36,79	0,5	0,7	242.910
Buses	666	243.161	3,05	6%	36,79	0,5	0,7	9.549.753
2 Ejes	1.674	611.172	0,63	6%	36,79	0,5	0,7	4.957.943
3 Ejes	541	197.405	1,71	6%	36,79	0,5	0,7	4.346.627
5 Ejes	2.126	775.894	3,17	6%	36,79	0,5	0,7	31.670.822
<b>TOTAL</b>	<b>16.861</b>	<b>6.154.203</b>	-	-	-	-	-	<b>50.783.765</b>

**Tabla 8.** Determinación de los Ejes Equivalentes de Diseño. Fuente: Elaboración propia (2016).

## Losa de concreto hidráulico

Para el diseño de la losa de concreto, se utilizó el método de AASHTO 1993 (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993), pero con la utilización del programa WinPAS 12, el cual es un software exclusivo para diseño de pavimentos rígidos, además de la verificación del mismo de paso por paso.

El resultado final fue una losa de 10,44 pulgadas, o 26,52 cm, lo que corresponde aproximadamente a una losa de 26,5 cm de espesor. Las cantidades calculadas de concreto se detallan en el Apéndice 9.

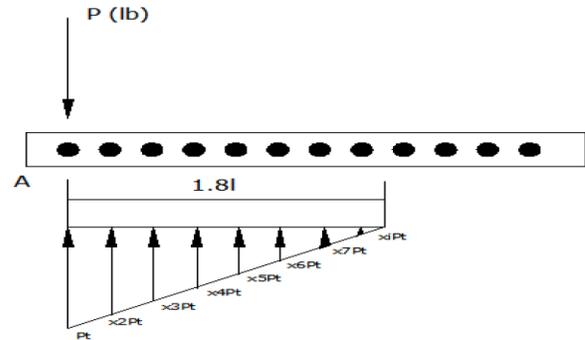
## Base estabilizada

Para el cálculo de cantidades de la base estabilizada, se utilizó como guía el porcentaje cemento/agregado que utilizó el CONAVI en su propio diseño, el cual fue de 6%. Se estimó la cantidad de agregados necesarios en toneladas considerando el área de pavimento, el cual fue de 830.000 m<sup>2</sup>, y el espesor propuesto de la base, de 20 cm, posibilitando el cálculo de la cantidad de cemento requerida.

El cálculo de las cantidades para la base estabilizada se detalla en el Apéndice 10.

## Dovelas o barras pasajuntas

Con respecto al cálculo de las dovelas (dimensionamiento y separación) no se hizo uso de algún programa de diseño de pavimentos, sino que se utilizó una metodología de cálculo que se explica más adelante.



**Figura 29.** Disminución de la carga en la dovela en función de la distancia (Factor de capacidad de carga en cada dovela).

Fuente: Fernández, S. (2016).

Para el diseño de las dovelas se tomó en consideración que existía una eficiencia del 100% en transferencia de carga y un 50% de carga utilizada para diseño.

La metodología de cálculo utilizada tiene como objetivo verificar que el diámetro y longitud de las dovelas, así como las características del concreto, son capaces de soportar los esfuerzos cortantes causados por las cargas vehiculares. El procedimiento se detalla a continuación:

### 1) Cálculo de la rigidez relativa (in):

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

Ec: módulo de elasticidad del concreto (psi)

h: espesor de losa (in)

$\mu$ : coeficiente de Poisson (0,15)

k: módulo de reacción de sub-rasante (pci)

**Ecuación 3.** Radio de rigidez relativa. Fuente: Fernández, S. (2016).

- 2) Cálculo de longitud de influencia sobre dovelas: Corresponde a aumentar la rigidez relativa en 80% (multiplicar la rigidez relativa por 1,8).
- 3) Aplicar triángulos semejantes para obtener factores de capacidad de carga para cada dovela, según la Figura 29.
- 4) Encontrar la carga Pt, la cual corresponde a la carga absorbida por la primera dovela.

$$Pt = \frac{P}{\sum x_i}$$

P: carga del eje aplicada al pavimento.  
 $\Sigma xi$ : sumatoria de los factores de capacidad de carga de cada dovela (Figura 29).

**Ecuación 4.** Carga absorbida por la primera dovela. Fuente: Fernández, S. (2016).

- 5) Calcular el esfuerzo aplicado para la dovela crítica.

$$\sigma_b = \frac{K_d * Pd_i}{4 * \beta^3 * EI} * (2 + \beta * z)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_d * d}{4 * EI}}$$

Kd: módulo de interacción dovela/concreto (pci)  
 E: módulo de rigidez del acero (psi)  
 Pdi: carga que actúa en la dovela (lb)  
 I: momento de inercia de la dovela (in<sup>4</sup>) (I =  $[\pi * D^4]/64$ )  
 z: ancho de la junta (in)  
 d: diámetro de la dovela (in)

**Ecuación 5.** Esfuerzo para la dovela crítica. Fuente: Fernández, S. (2016).

- 6) Calcular el esfuerzo de falla en la dovela.

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

d: diámetro de dovela (in)  
 f'c: resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (psi)

**Ecuación 6.** Esfuerzo de falla en la dovela. Fuente: Fernández, S. (2016).

- 7) Verificar: Si lo siguiente no se cumple, se debe aumentar el diámetro de la dovela o disminuir el espaciamiento entre las mismas.

$$\sigma_b \leq f_b$$

Como resultado final, se obtuvieron dovelas de diámetro nominal de 1 ¼ pulgadas con una separación de 30 cm y una longitud de 45 cm. La memoria de cálculo se adjunta en el Apéndice 12.

## Barras de amarre longitudinal

Las barras de amarre longitudinal tienen como principal objetivo mantener unidos dos carriles entre sí o los carriles con los espaldones. Para poder diseñar el tipo de barras de amarre a utilizar se siguió el siguiente procedimiento:

- 1) Calcular el área de acero en sección transversal requerida (por ft lineal).

$$A_s = \frac{\gamma_c * h * L' * f_a}{f_s}$$

$\gamma_c$ : peso unitario del concreto hidráulico (pci)  
 h: espesor de la losa de concreto (in)  
 L': distancia mínima de la junta al borde libre (in)  
 fa: factor de fricción losa/capa de soporte  
 fs: resistencia de trabajo del acero (psi)

**Ecuación 7.** Área de acero requerida. Fuente: Fernández, S. (2016).

- 2) Calcular la longitud de la barra (generalmente, por seguridad se añaden 3 in de más).

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

fs: esfuerzo de acero permisible (psi)  
 d: diámetro de la barra escogida (in)  
 $\mu$ : resistencia de adherencia (típico 350 psi)

**Ecuación 8.** Longitud de la barra de amarre longitudinal. Fuente: Fernández, S. (2016).

- 3) Calcular la separación entre las barras de amarre.

$$\text{Separación} = \frac{\text{Área transversal de la barra}}{\text{Área requerida de acero}}$$

**Ecuación 9.** Separación de las barras de amarre. Fuente: Fernández, S. (2016).

Después de seguir el procedimiento de diseño, se obtuvo barras de amarre longitudinal de diámetro nominal de ½ pulgada con una separación de 71 cm y una longitud de 67,5 cm. Los cálculos para las cantidades de materiales se realizaron con esos datos, pero siempre es mejor redondear para facilitar la colocación. De esa forma, la

separación de barras sería a cada 75 cm y la longitud de las barras de 70 cm. La memoria de cálculo para las barras de amarre longitudinal se adjunta en el Apéndice 13.

## Equipo y maquinaria

Con respecto al equipo y maquinaria utilizada para la construcción del pavimento de concreto hidráulico, se decidió basarse en las máquinas y las horas laboradas que reportó Constructora MECO en la oferta que presentaron para la licitación de la carretera en análisis. Como se dijo en secciones anteriores, no se utilizaron los costos que venían en la oferta porque estos corresponden al 2011, los cuales están bastante desactualizados con respecto al presente año, y además, la empresa ya mencionada cuenta con servicios de alquiler de maquinaria, lo cual provoca que los costos que utilizaron en la oferta están muy reducidos.

Para los costos de maquinaria se optó por solicitar cotizaciones a empresas con servicios de alquiler de este tipo de equipo de construcción, tales como Constructora MECO, RAHSO, REECO, Terra Equipos, PEDREGAL y CEMEX Costa Rica S.A., con el fin de conseguir los costos horarios de cada uno de los equipos para facilitar los cálculos, ya que en la oferta de base se reportaron las horas laboradas de cada uno de ellos.

## Mano de obra

La mano de obra para la construcción del pavimento de concreto hidráulico se calculó de igual manera que para el pavimento de concreto asfáltico. Se trabajó con el personal y las horas laboradas por cada uno de ellos según se presentaron en la oferta de Constructora MECO, excepto el salario registrado para cada miembro

del personal por la razón anteriormente mencionada, ya que los salarios reportados corresponden al 2011, los cuales son diferentes para el presente año.

Para el cálculo de los salarios se tomaron como base en los salarios mínimos que reportó el Ministerio de Trabajo para el segundo semestre del presente año, los cuales vienen reportados por día, pero se utilizó una jornada laboral de 10 horas para calcularlos por hora y facilitar el cálculo del costo de mano de obra.

## Materiales por utilizar

Respecto a los materiales necesarios para la construcción del pavimento, se trabajó con las cantidades de que se reportaron en la oferta presentada por Constructora MECO, pero se aclara que lo anterior no se realizó para las actividades de colocación del pavimento rígido, para la colocación de la base estabilizada y para la colocación del acero, cuyas cantidades se calcularon individualmente.

Con respecto a los precios de los materiales por utilizar según su unidad, no se trabajaron con los costos reportados en la oferta, debido a razones explicadas anteriormente, ya que estos variaron desde el 2011 hasta la actualidad. Se decidió entonces por contactar a empresas que manejen la venta de materiales para la construcción de pavimentos, con el fin de obtener la información de los costos requeridos más actualizados posible, para lo cual se contactó principalmente a Constructora MECO, CEMEX Costa Rica S.A., Pisocreto, Aceros Abonos Agro y Balbeck.

El cálculo de la construcción inicial del pavimento con sus respectivas actividades y de sus correspondientes aspectos de equipo y maquinaria, mano de obra y materiales se muestran a continuación:

PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)		
N°	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
CR 201.01	1	Limpieza y desmonte
CR 203.01	2	Remoción (estructuras y obstrucciones)
CR 203.02	3	Remoción (tuberías)
CR 204.05 (a)	4	Excavación de préstamo seleccionado para acabado (caso 2)
CR 301.06	5	Sub base de agregados, graduación B
CR 209.01 (a)	6	Excavación (para estructuras)
CR 414.01	7	Agregados para base mejorada
CR 413.02	8	Base mejorada con cemento (recuperación pavimento existente, 20 cm espesor)
CR 413.03	9	Cemento para base mejorada
CR 303.03 (a)	10	Base estabilizada con cemento Portland tipo BE-35, 20 cm espesor
CR 302.01 (a)	11	Material de secado
CR 401.01 (a)	12	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo (25 cm espesor compactado y módulo de ruptura de 50 kg/cm <sup>2</sup> para superficie de ruedo)
CR 401.01 (b)	13	Pavimento de concreto hidráulico de espesor variable (25 cm a 20 cm y módulo de ruptura de 45 kg/cm <sup>2</sup> para espaldones)

**Tabla 9.** Actividades para la construcción del pavimento de concreto hidráulico. Fuente: CONAVI (2011).

PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)				
ACTIVIDAD	U/M	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	MONTO TOTAL
1	ha	₡ 2.786.671,64	75,00	₡ 209.000.373,28
2	u	₡ 238.724,20	50,00	₡ 11.936.210,18
3	m	₡ 109.389,83	1.500,00	₡ 164.084.747,15
4	m3	₡ 16.515,57	800.000,00	₡ 13.212.452.656,79
5	m3	₡ 25.933,08	140.000,00	₡ 3.630.631.402,99
6	m3	₡ 6.259,62	35.000,00	₡ 219.086.532,91
7	m3	₡ 21.835,39	10.000,00	₡ 218.353.937,25
8	m3	₡ 1.073,45	320.000,00	₡ 343.504.928,34
9	m3	₡ 155.362,42	11.200,00	₡ 1.740.059.079,73
10	m2	₡ 10.355,89	1.000.000,00	₡ 10.355.892.200,29
11	m3	₡ 20.951,29	600,00	₡ 12.570.771,12
12	m2	₡ 38.126,35	830.000,00	₡ 31.644.867.658,29
13	m2	₡ 28.015,37	170.000,00	₡ 4.762.613.252,88
<b>TOTAL</b>				<b>₡ 66.525.053.751,20</b>

Tabla 10. Costo de la construcción inicial del pavimento de concreto hidráulico. Fuente: Elaboración propia (2016).

La construcción inicial obtenida fue de ₡66.525.053.751,20 para el pavimento de concreto hidráulico aplicado a la Carretera Cañas-Liberia. Cabe mencionar que, para efectos de comparación, los cálculos de construcción inicial se realizaron con respecto a las actividades propias para la construcción de la estructura de pavimento; no se incluyeron las actividades de puentes, de colocación de tuberías, de señalización, de construcción de pasos para animales o de la colocación de los muros New Jersey. Además, los cálculos detallados para cada actividad se muestran en el Apéndice 16.

#### Diferencia en el costo inicial de construcción

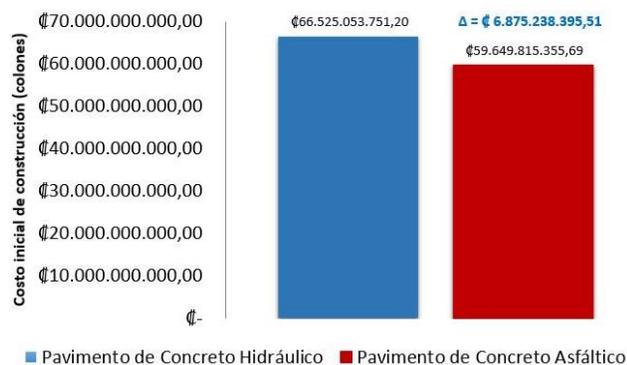


Figura 30. Diferencia en el costo inicial de construcción.

Fuente: Elaboración propia (2016).

## Mantenimiento y rehabilitación

Desde que se concluye la construcción de las estructuras de pavimento, comienza su proceso de deterioro, producto del envejecimiento de la estructura, de la interacción con el agua y el aire, de las cargas de tránsito y de las condiciones ambientales presentes, principalmente los cambios de temperatura y humedad. Por lo anterior, dichas estructuras se deben conservar o rehabilitar, por lo que, si no se interviene del todo o se realiza inadecuadamente el procedimiento de mantenimiento, el pavimento estará intransitable una vez que su período de diseño haya terminado, o quizá antes. Por esto, hay que calcular y realizar los procedimientos de conservación o mantenimiento que necesitará el pavimento con el paso del tiempo, para asegurarse de que este llegue a los años para los que fue diseñado en buenas condiciones.

Una medida de mantenimiento consiste en aquella que no representa una mejora en la capacidad estructural de la estructura de pavimento, pero que permitirá reducir el nivel de deterioro futuro del mismo. Por otra parte, una actividad de rehabilitación pretende recuperar la

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

capacidad estructural del pavimento a nivel de cómo había estado en un inicio. Dicha rehabilitación se realiza al final del período de análisis, si es necesario.

Según el tipo de pavimento que se desee construir, el proceso de mantenimiento a aplicársele cambiará. Un pavimento de concreto hidráulico, generalmente necesitará menos procedimientos de conservación que un pavimento de concreto asfáltico, esto por el tipo de material a utilizar y el proceso de construcción de cada estructura. Esto representa un beneficio del pavimento rígido sobre el pavimento flexible (en este caso semi-rígido según el CONAVI), según la sección de beneficios del presente documento.

Para poder analizar las estructuras de pavimento a lo largo de su ciclo de vida, incluido el costo que representaría, se debe proponer un procedimiento de conservación para ambos pavimentos con sus respectivas cantidades de materiales por utilizar. Con la ayuda de expertos, se analizó cada pavimento y se propuso una serie de actividades de mantenimiento para cada estructura.

## Pavimento de concreto asfáltico

Para el pavimento de concreto asfáltico, primero se eligió una serie de actividades de conservación con la ayuda de expertos del MOPT, CONAVI y LanammeUCR. Por el tipo de carretera que representa la ruta que se está analizando, son de las más comunes y básicas que se aplican, debidos a que la carretera no necesitará altas intervenciones porque se le dará un mantenimiento periódico.

En el cartel de licitación de la construcción de la Carretera Cañas-Liberia, venía incluido que al pavimento de concreto asfáltico se le haría una colocación de una microcarpeta (para los cálculos de las cantidades se le cambió el nombre a carpeta delgada para evitar confusiones) en el año 7 y luego una sobrecarpeta de 7,5 cm en el año 14. Sin embargo, se concluyó que este procedimiento representaba un mantenimiento escaso, por lo que se decidió añadirle las actividades de ruteo y sellado de grietas, bacheo con mezcla asfáltica en caliente, perfilado de pavimentos, carpeta

delgada de mezcla asfáltica y sobrecarpeta de mezcla asfáltica.

Los costos de cada actividad de mantenimiento de pavimentos los proporcionó el CONAVI, los cuales se obtuvieron de la licitación pública 2014LN-000018-0CV00 "*Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada*". Dichos costos corresponden al año 2015 y se adjuntan en el presente documento en el Apéndice 17.

Se señala que, para traer los precios a valor presente, se utilizó la siguiente fórmula:

$$VF = VA * (1 + i)^n$$

VF: valor futuro

VA: valor actual

i: tasa de interés de descuento

n: número de años entre el año actual y el año en el que se analiza.

**Ecuación 10.** Valor Presente Fuente: Barrantes, J. (2016).

Se procedió a estimar las cantidades de materiales requeridas según las necesidades consideradas, cuyos cálculos se adjuntan en el Apéndice 18, y se obtuvieron los siguientes resultados (una tabla corresponde al costo total al precio de hoy y la otra tabla corresponde al costo total traído a valor presente):

MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI RÍGIDO (CARPETA ASFÁLTICA)						
Ítem	Descripción	Año	Unidad	Cantidad	Costo/unid.	Monto Actual
1	Ruteo y sellado de grietas	3	m	17713,50	₡ 1.977,00	₡ 35.019.589,50
2	Ruteo y sellado de grietas	11	m	17713,50	₡ 1.977,00	₡ 35.019.589,50
3	Bacheo con mezcla asfáltica	7	ton	106750,00	₡ 61.052,00	₡ 6.517.301.000,00
4	Bacheo con mezcla asfáltica	15	ton	106750,00	₡ 61.052,00	₡ 6.517.301.000,00
5	Perfilado de pavimentos	4	m2	290500,00	₡ 984,00	₡ 285.852.000,00
6	Perfilado de pavimentos	12	m2	290500,00	₡ 984,00	₡ 285.852.000,00
7	Perfilado de pavimentos	8	m2	290500,00	₡ 984,00	₡ 285.852.000,00
8	Perfilado de pavimentos	16	m2	290500,00	₡ 984,00	₡ 285.852.000,00
9	Carpeta delgada (4 cm)	4	ton	81333,33	₡ 54.057,95	₡ 4.396.713.266,67
10	Carpeta delgada (4 cm)	12	ton	81333,33	₡ 54.057,95	₡ 4.396.713.266,67
11	Sobrecarpeta (7,5 cm)	8	ton	152500,00	₡ 54.057,95	₡ 8.243.837.375,00
12	Sobrecarpeta (7,5 cm)	16	ton	152500,00	₡ 54.057,95	₡ 8.243.837.375,00
						₡ -

Tabla 11. Mantenimiento calculado para pavimento de concreto asfáltico (sin VP). Fuente: Elaboración propia (2016).

MANTENIMIENTO PAVIMENTO SEMI RÍGIDO (CARPETA ASFÁLTICA)						
Ítem	Descripción	Año	Unidad	Cantidad	Cost/unid VP	Monto VP
1	Ruteo y sellado de grietas	3	m	17713,50	₡ 1.407,19	₡ 24.926.252,09
2	Ruteo y sellado de grietas	11	m	17713,50	₡ 568,34	₡ 10.067.295,16
3	Bacheo con mezcla asfáltica	7	ton	106750,00	₡ 27.616,82	₡ 2.948.095.993,46
4	Bacheo con mezcla asfáltica	15	ton	106750,00	₡ 11.153,97	₡ 1.190.686.526,23
5	Perfilado de pavimentos	4	m2	290500,00	₡ 625,35	₡ 181.664.113,75
6	Perfilado de pavimentos	12	m2	290500,00	₡ 252,57	₡ 73.371.088,67
7	Perfilado de pavimentos	8	m2	290500,00	₡ 397,42	₡ 115.450.828,48
8	Perfilado de pavimentos	16	m2	290500,00	₡ 160,51	₡ 46.628.653,28
9	Carpeta delgada (4 cm)	4	ton	81333,33	₡ 34.354,80	₡ 2.794.190.766,53
10	Carpeta delgada (4 cm)	12	ton	81333,33	₡ 13.875,33	₡ 1.128.526.786,38
11	Sobrecarpeta (7,5 cm)	8	ton	152500,00	₡ 21.833,10	₡ 3.329.547.649,95
12	Sobrecarpeta (7,5 cm)	16	ton	152500,00	₡ 8.818,02	₡ 1.344.748.452,57
					₡ -	₡ -

Tabla 12. Mantenimiento calculado para pavimento de concreto asfáltico (con VP). Fuente: Elaboración propia (2016).

La sumatoria total de ambas tablas se resume más adelante, con la respectiva comparación con el pavimento de concreto hidráulico, propiamente en la Tabla 15.

## Pavimento de concreto hidráulico

Refiriéndose al pavimento de concreto hidráulico, se trabajó con una serie de actividades de conservación con la ayuda de expertos del MOPT, CONAVI y CEMEX Costa Rica S.A., que, por el tipo de carretera que representa la ruta que

se está analizando, son de las más comunes y básicas que se aplican, debidos a que la carretera no necesitará altas intervenciones porque se le dará un mantenimiento periódico, de la misma manera que al pavimento de concreto asfáltico.

En el cartel de licitación de la construcción de la Carretera Cañas-Liberia, venía incluido que al pavimento de concreto hidráulico se le haría únicamente cambio del sello de juntas en el año 7 y en el año 14. Sin embargo, se decidió que este procedimiento representaba un mantenimiento poco frecuente, por lo que se decidió añadirle las actividades de sellado de juntas y grietas, fresado de la superficie de

concreto, bacheo con pavimento de concreto y sustitución de losas de concreto.

Los costos de cada actividad de mantenimiento de pavimentos los proporcionó el CONAVI, los cuales se obtuvieron de la licitación pública 2014LN-000018-OCV00 "Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada". Dichos costos corresponden al año 2015 y se adjuntan en el presente documento en el Apéndice 17.

Se señala que para traer los precios a valor presente se utilizó la misma fórmula que la que se usó para el mantenimiento del pavimento de concreto asfáltico (Ecuación 10).

Por último, se estimaron las cantidades de materiales requeridas según las necesidades consideradas, cuyos cálculos se adjuntan en el Apéndice 18, y se obtuvieron los siguientes resultados (una tabla corresponde al costo total al precio de hoy y la otra tabla corresponde al costo total traído a valor presente):

MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO (LOSA DE CONCRETO)						
Ítem	Descripción	Año	Unidad	Cantidad	Costo/unid.	Monto Actual
1	Pavimento de concreto con refuerzo	8	m2	83000,00	₺ 46.994,00	₺ 3.900.502.000,00
2	Pavimento de concreto con refuerzo	16	m2	83000,00	₺ 46.994,00	₺ 3.900.502.000,00
3	Sellado de juntas y grietas	4	m	12652,50	₺ 3.714,00	₺ 46.991.385,00
4	Sellado de juntas y grietas	8	m	12652,50	₺ 3.714,00	₺ 46.991.385,00
5	Sellado de juntas y grietas	12	m	12652,50	₺ 3.714,00	₺ 46.991.385,00
6	Sellado de juntas y grietas	16	m	12652,50	₺ 3.714,00	₺ 46.991.385,00
7	Fresado de la superficie	18	m2	830000,00	₺ 934,00	₺ 775.220.000,00
8	Bacheo del pavimento de concreto	7	m2	83000,00	₺ 20.793,00	₺ 1.725.819.000,00
9	Bacheo del pavimento de concreto	15	m2	83000,00	₺ 20.793,00	₺ 1.725.819.000,00
						₺ -

Tabla 13. Mantenimiento calculado para pavimento de concreto hidráulico (sin VP). Fuente: Elaboración propia (2016).

MANTENIMIENTO PAVIMENTO RÍGIDO (LOSA DE CONCRETO)						
Ítem	Descripción	Año	Unidad	Cantidad	Cost/unid VP	Monto VP
1	Pavimento de concreto con refuerzo	8	m2	83000,00	₺ 18.980,09	₺ 1.575.347.338,50
2	Pavimento de concreto con refuerzo	16	m2	83000,00	₺ 7.665,74	₺ 636.256.368,26
3	Sellado de juntas y grietas	4	m	12652,50	₺ 2.360,31	₺ 29.863.874,70
4	Sellado de juntas y grietas	8	m	12652,50	₺ 1.500,02	₺ 18.979.032,26
5	Sellado de juntas y grietas	12	m	12652,50	₺ 953,29	₺ 12.061.518,11
6	Sellado de juntas y grietas	16	m	12652,50	₺ 605,83	₺ 7.665.312,81
7	Fresado de la superficie	18	m2	830000,00	₺ 121,46	₺ 100.809.291,05
8	Bacheo del pavimento de concreto	7	m2	83000,00	₺ 9.405,70	₺ 780.672.870,46
9	Bacheo del pavimento de concreto	15	m2	83000,00	₺ 3.798,80	₺ 315.300.678,92
					₺ -	₺ -

Tabla 14. Mantenimiento calculado para pavimento de concreto hidráulico (con VP). Fuente: Elaboración propia (2016).

Para evitar confusiones, las actividades 1 y 2 corresponden a la reparación o sustitución de losas. Con los datos de mantenimiento para el pavimento de concreto hidráulico ya obtenidos, se procede a realizar una comparación de

resultados y costos con respecto a los datos del pavimento de concreto asfáltico presentados anteriormente. Dicha comparación se muestra en la siguiente tabla:

MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS							
Pavimento Semi Rígido (Carpeta Asfáltica) (20 años)				Pavimento Rígido (Los de Concreto) (20 años)			
Año	Alternativa	Costo Actual	Costo VP	Año	Alternativa	Costo Actual	Costo VP
1	-	₪ -	₪ -	1	-	₪ -	₪ -
2	-	₪ -	₪ -	2	-	₪ -	₪ -
3	1	₪ 35.019.589,50	₪ 24.926.252,09	3	-	₪ -	₪ -
4	5 y 9	₪ 4.682.565.266,67	₪ 2.975.854.880,28	4	3	₪ 46.991.385,00	₪ 29.863.874,70
5	-	₪ -	₪ -	5	-	₪ -	₪ -
6	-	₪ -	₪ -	6	-	₪ -	₪ -
7	3	₪ 6.517.301.000,00	₪ 2.948.095.993,46	7	8	₪ 1.725.819.000,00	₪ 780.672.870,46
8	7 y 11	₪ 8.529.689.375,00	₪ 3.444.998.478,44	8	1 y 4	₪ 3.947.493.385,00	₪ 1.594.326.370,76
9	-	₪ -	₪ -	9	-	₪ -	₪ -
10	-	₪ -	₪ -	10	-	₪ -	₪ -
11	2	₪ 35.019.589,50	₪ 10.067.295,16	11	-	₪ -	₪ -
12	6 y 10	₪ 4.682.565.266,67	₪ 1.201.897.875,04	12	5	₪ 46.991.385,00	₪ 12.061.518,11
13	-	₪ -	₪ -	13	-	₪ -	₪ -
14	-	₪ -	₪ -	14	-	₪ -	₪ -
15	4	₪ 6.517.301.000,00	₪ 1.190.686.526,23	15	9	₪ 1.725.819.000,00	₪ 315.300.678,92
16	8 y 12	₪ 8.529.689.375,00	₪ 1.391.377.105,85	16	2 y 6	₪ 3.947.493.385,00	₪ 643.921.681,08
17	-	₪ -	₪ -	17	-	₪ -	₪ -
18	-	₪ -	₪ -	18	7	₪ 775.220.000,00	₪ 100.809.291,05
19	-	₪ -	₪ -	19	-	₪ -	₪ -
20	-	₪ -	₪ -	20	-	₪ -	₪ -
<b>TOTAL</b>		<b>₪ 39.529.150.462,33</b>	<b>₪ 13.187.904.406,56</b>	<b>TOTAL</b>		<b>₪ 12.215.827.540,00</b>	<b>₪ 3.476.956.285,08</b>

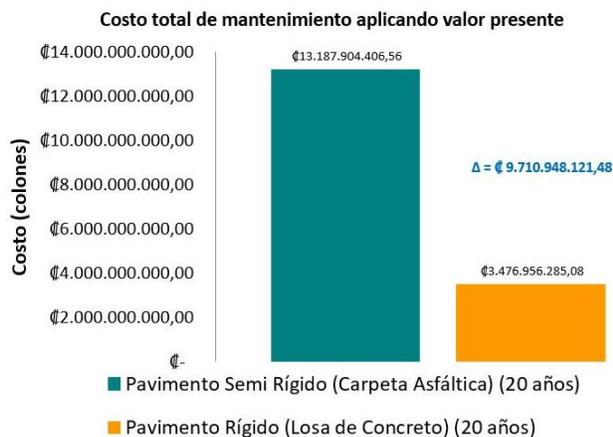
Tabla 15. Comparación de la conservación de los pavimentos en análisis. Fuente: Elaboración propia (2016)

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

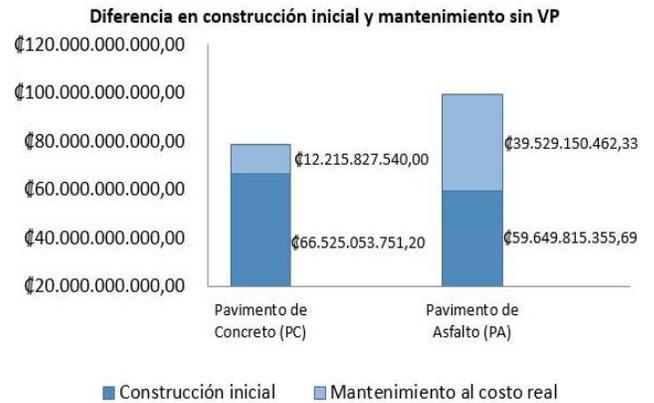
Las diferencias obtenidas se muestran en las siguientes figuras:



**Figura 31.** Diferencia en el costo de mantenimiento sin aplicar valor presente. Fuente: Elaboración propia (2016).



**Figura 32.** Diferencia en el costo de mantenimiento aplicando valor presente. Fuente: Elaboración propia (2016).



**Figura 33.** Diferencia en el costo de mantenimiento y construcción inicial de ambos pavimentos (sin aplicar valor presente). Fuente: Elaboración propia (2016).



**Figura 34.** Diferencia en el costo de mantenimiento y construcción inicial de ambos pavimentos (aplicando valor presente). Fuente: Elaboración propia (2016).

Se destaca que, para el cálculo de las cantidades a estimar para las actividades de mantenimiento, se utilizó un porcentaje del área total de la carretera, dichos porcentajes se indican en el último apéndice del presente trabajo. Además, se deseó observar las diferencias entre los dos pavimentos en análisis, con respecto al mantenimiento acumulado durante los años de servicio; lo cual se demuestra de la siguiente manera:

MANTENIMIENTO ACUMULADO								
Año	Pavimento de Concreto Asfáltico				Pavimento de Concreto Hidráulico			
	Valor Real	Acumulado	Valor Presente	Acumulado	Valor Real	Acumulado	Valor Presente	Acumulado
0	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -
1	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -
2	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -
3	₡ 35.019.589,50	₡ 35.019.589,50	₡ 24.926.252,09	₡ 24.926.252,09	₡ -	₡ -	₡ -	₡ -
4	₡ 4.682.565.266,67	₡ 4.717.584.856,17	₡ 2.975.854.880,28	₡ 3.000.781.132,37	₡ 46.991.385,00	₡ 46.991.385,00	₡ 29.863.874,70	₡ 29.863.874,70
5	₡ -	₡ 4.717.584.856,17	₡ -	₡ 3.000.781.132,37	₡ -	₡ 46.991.385,00	₡ -	₡ 29.863.874,70
6	₡ -	₡ 4.717.584.856,17	₡ -	₡ 3.000.781.132,37	₡ -	₡ 46.991.385,00	₡ -	₡ 29.863.874,70
7	₡ 6.517.301.000,00	₡ 11.234.885.856,17	₡ 2.948.095.993,46	₡ 5.948.877.125,83	₡ 1.725.819.000,00	₡ 1.772.810.385,00	₡ 780.672.870,46	₡ 810.536.745,16
8	₡ 8.529.689.375,00	₡ 19.764.575.231,17	₡ 3.444.998.478,44	₡ 9.393.875.604,27	₡ 3.947.493.385,00	₡ 5.720.303.770,00	₡ 1.594.326.370,76	₡ 2.404.863.115,92
9	₡ -	₡ 19.764.575.231,17	₡ -	₡ 9.393.875.604,27	₡ -	₡ 5.720.303.770,00	₡ -	₡ 2.404.863.115,92
10	₡ -	₡ 19.764.575.231,17	₡ -	₡ 9.393.875.604,27	₡ -	₡ 5.720.303.770,00	₡ -	₡ 2.404.863.115,92
11	₡ 35.019.589,50	₡ 19.799.594.820,67	₡ 10.067.295,16	₡ 9.403.942.899,43	₡ -	₡ 5.720.303.770,00	₡ -	₡ 2.404.863.115,92
12	₡ 4.682.565.266,67	₡ 24.482.160.087,33	₡ 1.201.897.875,04	₡ 10.605.840.774,47	₡ 46.991.385,00	₡ 5.767.295.155,00	₡ 12.061.518,11	₡ 2.416.924.634,03
13	₡ -	₡ 24.482.160.087,33	₡ -	₡ 10.605.840.774,47	₡ -	₡ 5.767.295.155,00	₡ -	₡ 2.416.924.634,03
14	₡ -	₡ 24.482.160.087,33	₡ -	₡ 10.605.840.774,47	₡ -	₡ 5.767.295.155,00	₡ -	₡ 2.416.924.634,03
15	₡ 6.517.301.000,00	₡ 30.999.461.087,33	₡ 1.190.686.526,23	₡ 11.796.527.300,71	₡ 1.725.819.000,00	₡ 7.493.114.155,00	₡ 315.300.678,92	₡ 2.732.225.312,95
16	₡ 8.529.689.375,00	₡ 39.529.150.462,33	₡ 1.391.377.105,85	₡ 13.187.904.406,56	₡ 3.947.493.385,00	₡ 11.440.607.540,00	₡ 643.921.681,08	₡ 3.376.146.994,03
17	₡ -	₡ 39.529.150.462,33	₡ -	₡ 13.187.904.406,56	₡ -	₡ 11.440.607.540,00	₡ -	₡ 3.376.146.994,03
18	₡ -	₡ 39.529.150.462,33	₡ -	₡ 13.187.904.406,56	₡ 775.220.000,00	₡ 12.215.827.540,00	₡ 100.809.291,05	₡ 3.476.956.285,08
19	₡ -	₡ 39.529.150.462,33	₡ -	₡ 13.187.904.406,56	₡ -	₡ 12.215.827.540,00	₡ -	₡ 3.476.956.285,08
20	₡ -	₡ 39.529.150.462,33	₡ -	₡ 13.187.904.406,56	₡ -	₡ 12.215.827.540,00	₡ -	₡ 3.476.956.285,08

**Tabla 16.** Mantenimiento acumulado de ambos pavimentos. Fuente: Elaboración propia (2016).



Figura 35. Mantenimiento acumulado de ambos pavimentos sin aplicar valor presente. Fuente: Elaboración propia (2016).

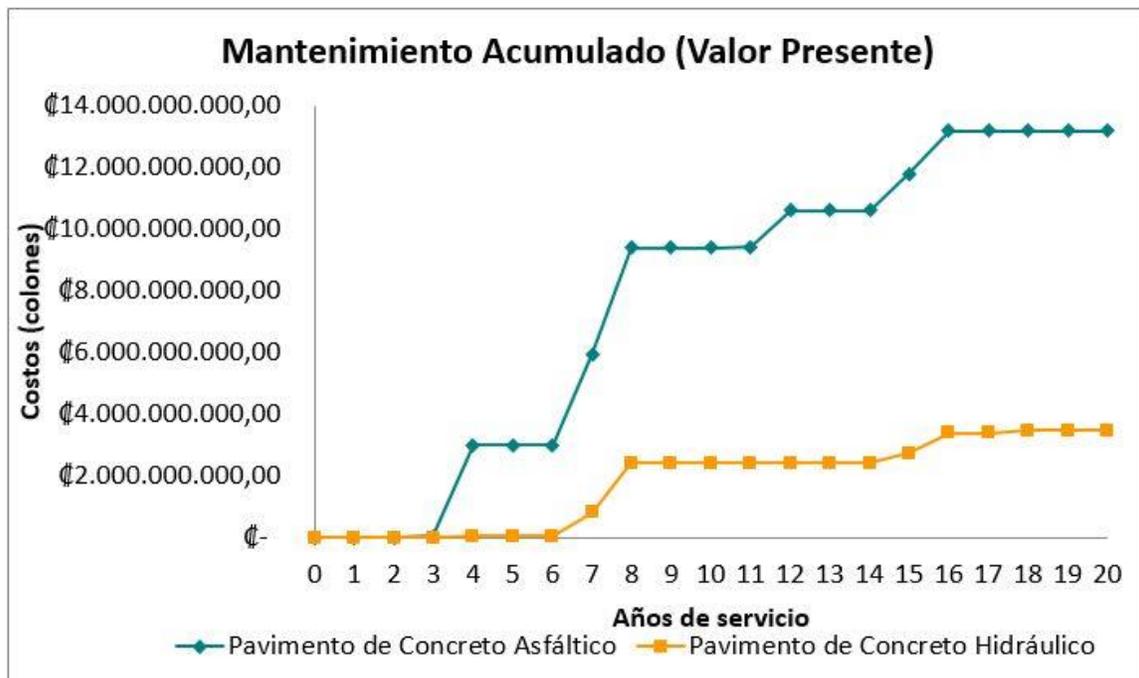


Figura 36. Mantenimiento acumulado de ambos pavimentos aplicando valor presente. Fuente: Elaboración propia (2016)

## Iluminación (alumbrado público)

Se tocará el tema de la iluminación en la ruta nacional en estudio, porque esta representa una diferencia de costos entre la instalación en una carretera de pavimento flexible y una de pavimento rígido, tal y como se mencionó en la sección de los beneficios del pavimento rígido. En dicha sección del presente documento, se justifica esa diferencia con respecto al alumbrado de la carretera, pues una de pavimento de concreto hidráulico necesitará una menor cantidad de iluminación que una de concreto asfáltico, debido a que, por ser una superficie más clara, puede reflejar de una manera más eficiente los rayos de luz que chocan contra ella.

Debido a la razón anterior, existiría un ahorro de dinero en la construcción o instalación de la iluminación entre estas dos estructuras, ya que el pavimento rígido requeriría menor cantidad de postes, luminarias y demás elementos.

Para poder calcular y comparar los costos de construcción del sistema de iluminación de ambos pavimentos, se recurrió a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), en donde se obtuvo información acerca de los elementos por instalar y su respectivo precio. Según la CNFL, para una Ruta Nacional como la que se está analizando, en promedio se utiliza el siguiente sistema de iluminación:

*“Postes tubulares de hierro galvanizado de 11 m de altura útil, en el medio de la vía con una separación de 40 m y doble luminaria de 250 W (vapor de sodio de alta presión) en cada poste con su respectivo brazo metálico de sujeción. La instalación de alumbrado lleva 3 conductores de*

*cobre N° 2 AWG, tipo RHHN a lo largo del recorrido del circuito, en forma subterránea como circuito principal de alimentación y se deriva a cada poste de alumbrado con 6 líneas de Cable de cobre N° 14 AWG tipo THHN para alimentar las luminarias. En otros casos se ha utilizado cable triplex de aluminio N° 2 para el circuito principal de alumbrado, para llevar el cable de alimentación del alumbrado en forma aérea en lugar de subterránea. Además, cada 250m a 300m se instala un tablero de control automatizado para controlar el encendido y apagado del alumbrado, y se alimenta de un transformador.”*

*Fuente: Marín, M. (2016).*

Se destaca que, para los costos calculados, se supuso que la carretera en análisis era una sola recta de 50,61 km, no se consideraron intersecciones, salidas y entradas a la autopista, ni ninguna otra desviación.

## Pavimento de Concreto Asfáltico

Para este pavimento, se tomó como base una separación de postes de iluminación de 40 m, según lo investigado con la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, y también según el Ing. Carlos Chang Albitres en el documento *“El Pavimento Urbano de Concreto como Estructura Sostenible (2011)”*, de la Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM).

De la tabla adjuntada por la CNFL, donde adjuntaron los materiales con su respectivo costo, se calculó la construcción del sistema de iluminación como se muestra a continuación:

<b>ILUMINACIÓN PAVIMENTO SEMI RÍGIDO (CARPETA ASFÁLTICA)</b>				
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo/unid.</b>	<b>Monto total</b>
Poste metálico tubular de 11 m	1265	c/u	₺ 266.203,47	₺ 336.813.938,65
Luminaria tipo horizontal cerrada 250 W	2531	c/u	₺ 54.598,00	₺ 138.160.239,00
Bombillo (lámpara) 250 W	2531	c/u	₺ 5.061,23	₺ 12.807.454,16
Control de iluminación para autopistas	202	c/u	₺ 268.365,55	₺ 54.327.921,82
Brazo para luminaria	2531	c/u	₺ 17.416,76	₺ 44.073.116,24
Fondo de concreto para poste	1265	c/u	₺ 5.339,68	₺ 6.756.035,69
Cable de cobre N°2 AWG	151830	m	₺ 2.254,90	₺ 342.361.072,24
Cable de cobre N°14 AWG	197379	m	₺ 131,04	₺ 25.863.596,74
M.O. instalación luminaria de 250 W	2531	c/u	₺ 31.666,84	₺ 80.132.938,62
M.O. instalación de tablero eléctrico	202	c/u	₺ 296.576,34	₺ 60.038.913,46
M.O. construcción de pedestal de concreto para poste 11 m	1265	c/u	₺ 387.645,80	₺ 490.468.848,45
M.O. canalización y colocación tubería	50610	m	₺ 30.028,90	₺ 1.519.762.629,00
M.O. instalación poste 11 m sobre pedestal de concreto	1265	c/u	₺ 144.684,70	₺ 183.062.316,68
M.O. construcción caja de registro para poste	1265	c/u	₺ 68.247,50	₺ 86.350.149,38
M.O. extensión líneas subterráneas y canalización	50610	m	₺ 46.987,04	₺ 2.378.014.033,67
M.O. instalación de controles en poste	202	c/u	₺ 51.868,10	₺ 10.500.178,16
Varilla de cobre Coperweel para tierra de 15,875 mm x 2,4384 m	1265	c/u	₺ 4.853,76	₺ 6.141.222,62
M.O. instalación transformador distribución 15 KVA y ext. Líneas aéreas	202	c/u	₺ 174.713,60	₺ 35.369.021,18
Perno de 5/8" x 4"	5061	c/u	₺ 371,27	₺ 1.878.979,25
Alambre de cobre S/F N°4 (puesta a tierra)	17713,5	m	₺ 1.321,27	₺ 23.404.344,49
				₺ -
<b>TOTAL</b>				<b>₺ 5.836.286.949,49</b>

**Tabla 17.** Costos de iluminación de la estructura de pavimento de concreto asfáltico. Fuente: Elaboración propia (2016).

## **Pavimento de Concreto Hidráulico**

Para el cálculo de los costos de iluminación de pavimentos de concreto hidráulico se decidió realizar dos procedimientos y poder comparar uno con otro, por lo que se proponen dos alternativas en las cuales se utilizan estudios de CEMEX Costa Rica S.A. y también se toma como referencia el documento *“El Pavimento Urbano de Concreto como Estructura Sostenible (2011)”*, del Ing. Carlos Chang Albitres, de la Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM).

### **Alternativa 1**

Como alternativa 1 para el cálculo del sistema de iluminación del pavimento rígido, se tomó como referencia lo dicho anteriormente en el presente documento, sobre la ventaja de la iluminación

que representaba este sobre el flexible. Según CEMEX Costa Rica S.A., la iluminación puede reducirse en un 30% sin comprometer la visibilidad nocturna. Por lo que, a la cantidad de postes obtenidos para el pavimento de concreto asfáltico, se le aplicó un 30% menos para el cálculo de postes del pavimento de concreto hidráulico, reduciendo los costos tal y como se muestra más adelante.

### **Alternativa 2**

Para la alternativa 2, lo que se consideró para poder realizar el cálculo del costo de la instalación del sistema de iluminación del pavimento rígido, fue basarse en lo que decía el documento mencionado de ASOCEM, que considera que para pavimentos rígidos se debe de utilizar una separación de postes de 60 m, por lo que los cálculos obtenidos se muestran en la tabla a continuación.

<b>ILUMINACIÓN PAVIMENTO RÍGIDO (ALTERNATIVA 1)</b>				
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo/unid.</b>	<b>Monto total</b>
Poste metálico tubular de 11 m	886	c/u	₺ 266.203,47	₺ 235.769.757,05
Luminaria tipo horizontal cerrada 250 W	1771	c/u	₺ 54.598,00	₺ 96.712.167,30
Bombillo (lámpara) 250 W	1771	c/u	₺ 5.061,23	₺ 8.965.217,91
Control de iluminación para autopistas	169	c/u	₺ 268.365,55	₺ 45.273.268,18
Brazo para luminaria	1771	c/u	₺ 17.416,76	₺ 30.851.181,37
Fondo de concreto para poste	886	c/u	₺ 5.339,68	₺ 4.729.224,98
Cable de cobre N°2 AWG	151830	m	₺ 2.254,90	₺ 342.361.072,24
Cable de cobre N°14 AWG	138165,3	m	₺ 131,04	₺ 18.104.517,72
M.O. instalación luminaria de 250 W	1771	c/u	₺ 31.666,84	₺ 56.093.057,03
M.O. instalación de tablero eléctrico	169	c/u	₺ 296.576,34	₺ 50.032.427,88
M.O. construcción de pedestal de concreto para poste 11 m	886	c/u	₺ 387.645,80	₺ 343.328.193,92
M.O. canalización y colocación tubería	50610	m	₺ 30.028,90	₺ 1.519.762.629,00
M.O. instalación poste 11 m sobre pedestal de concreto	886	c/u	₺ 144.684,70	₺ 128.143.621,67
M.O. construcción caja de registro para poste	886	c/u	₺ 68.247,50	₺ 60.445.104,56
M.O. extensión líneas subterráneas y canalización	50610	m	₺ 46.987,04	₺ 2.378.014.033,67
M.O. instalación de controles en poste	169	c/u	₺ 51.868,10	₺ 8.750.148,47
Varilla de cobre Coperweel para tierra de 15,875 mm x 2,4384 m	886	c/u	₺ 4.853,76	₺ 4.298.855,84
M.O. instalación transformador distribución 15 KVA y ext. Líneas aéreas	169	c/u	₺ 174.713,60	₺ 29.474.184,32
Perno de 5/8" x 4"	3542,7	c/u	₺ 371,27	₺ 1.315.285,48
Alambre de cobre S/F N°4 (puesta a tierra)	12399,5	m	₺ 1.321,27	₺ 16.383.041,14
				₺ -
<b>TOTAL</b>				<b>₺ 5.378.806.989,73</b>

**Tabla 18.** Costos de iluminación de la estructura de pavimento de concreto hidráulico (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>ILUMINACIÓN PAVIMENTO RÍGIDO (ALTERNATIVA 2)</b>				
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo/unid.</b>	<b>Monto total</b>
Poste metálico tubular de 11 m	844	c/u	₺ 266.203,47	₺ 224.542.625,76
Luminaria tipo horizontal cerrada 250 W	1687	c/u	₺ 54.598,00	₺ 92.106.826,00
Bombillo (lámpara) 250 W	1687	c/u	₺ 5.061,23	₺ 8.538.302,77
Control de iluminación para autopistas	169	c/u	₺ 268.365,55	₺ 45.273.268,18
Brazo para luminaria	1687	c/u	₺ 17.416,76	₺ 29.382.077,49
Fondo de concreto para poste	844	c/u	₺ 5.339,68	₺ 4.504.023,79
Cable de cobre N°2 AWG	151830	m	₺ 2.254,90	₺ 342.361.072,24
Cable de cobre N°14 AWG	131586	m	₺ 131,04	₺ 17.242.397,83
M.O. instalación luminaria de 250 W	1687	c/u	₺ 31.666,84	₺ 53.421.959,08
M.O. instalación de tablero eléctrico	169	c/u	₺ 296.576,34	₺ 50.032.427,88
M.O. construcción de pedestal de concreto para poste 11 m	844	c/u	₺ 387.645,80	₺ 326.979.232,30
M.O. canalización y colocación tubería	50610	m	₺ 30.028,90	₺ 1.519.762.629,00
M.O. instalación poste 11 m sobre pedestal de concreto	844	c/u	₺ 144.684,70	₺ 122.041.544,45
M.O. construcción caja de registro para poste	844	c/u	₺ 68.247,50	₺ 57.566.766,25
M.O. extensión líneas subterráneas y canalización	50610	m	₺ 46.987,04	₺ 2.378.014.033,67
M.O. instalación de controles en poste	169	c/u	₺ 51.868,10	₺ 8.750.148,47
Varilla de cobre Coperweel para tierra de 15,875 mm x 2,4384 m	844	c/u	₺ 4.853,76	₺ 4.094.148,42
M.O. instalación transformador distribución 15 KVA y ext. Líneas aéreas	169	c/u	₺ 174.713,60	₺ 29.474.184,32
Perno de 5/8" x 4"	3374	c/u	₺ 371,27	₺ 1.252.652,83
Alambre de cobre S/F N°4 (puesta a tierra)	11809,0	m	₺ 1.321,27	₺ 15.602.896,32
				₺ -
<b>TOTAL</b>				<b>₺ 5.330.943.217,07</b>

**Tabla 19.** Costos de iluminación de la estructura de pavimento de concreto hidráulico (Alternativa 2). Fuente: Elaboración propia (2016).

En las siguientes figuras se representa la diferencia en los costos de iluminación para cada pavimento.



**Figura 37.** Comparación de costos de la iluminación entre ambos pavimentos (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia (2016).



**Figura 38.** Comparación de costos de la iluminación entre ambos pavimentos (Alternativa 2). Fuente: Elaboración propia (2016).

## Consumo Energético

Debido a que el consumo energético (en este caso se trata de un consumo de electricidad mensual con su respectiva tarifa) va a estar ligado de la iluminación en las carreteras, este parámetro también va a ser un punto importante de analizar y comparar, debido a la ventaja comparativa del pavimento rígido sobre el pavimento flexible que se explicó en la sección de beneficios de cada uno de los pavimentos.

Para poder realizar los cálculos de consumo energético de las luminarias que posee cada pavimento en análisis, se utilizó la herramienta de “Calculadora Energética” de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, la cual está disponible en su página web y permite calcular el consumo de aparatos eléctricos.

Con respecto a la tarifa que se debe cobrar por el consumo calculado, también se obtuvo de la página web de la CNFL. Dicha tarifa corresponde a ₡3,51 por kWh consumido para alumbrado público.

Con la tarifa ya establecida, se procedió a calcular los costos del consumo energético para cada pavimento en estudio. El resultado de los costos es por el consumo energético mensual, lo cual se muestra a continuación:

CONSUMO ENERGÉTICO MENSUAL	
<b>Aparato</b>	Luminaria 250W
<b>Cantidad</b>	2531
<b>Watts</b>	250
<b>kW</b>	0,25
<b>Horas/día</b>	12
<b>Días/mes</b>	30
<b>kWh</b>	227790
<b>Costo/kWh</b>	₡ 3,51
<b>Costo total de consumo energético mensual</b>	₡ 799.542,90

**Tabla 20.** Consumo energético para el sistema de iluminación del pavimento de concreto asfáltico. Fuente: Elaboración propia (2016).

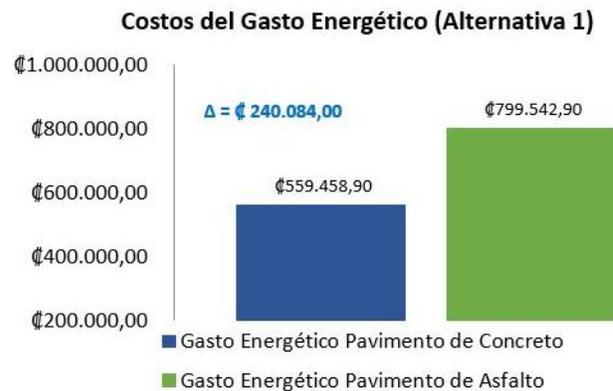
CONSUMO ENERGÉTICO MENSUAL	
<b>Aparato</b>	Luminaria 250W
<b>Cantidad</b>	1687
<b>Watts</b>	250
<b>kW</b>	0,25
<b>Horas/día</b>	12
<b>Días/mes</b>	30
<b>kWh</b>	151830
<b>Costo/kWh</b>	₡ 3,51
<b>Costo total de consumo energético mensual</b>	₡ 532.923,30

**Tabla 22.** Consumo energético para el sistema de iluminación del pavimento de concreto hidráulico (Alternativa 2). Fuente: Elaboración propia (2016).

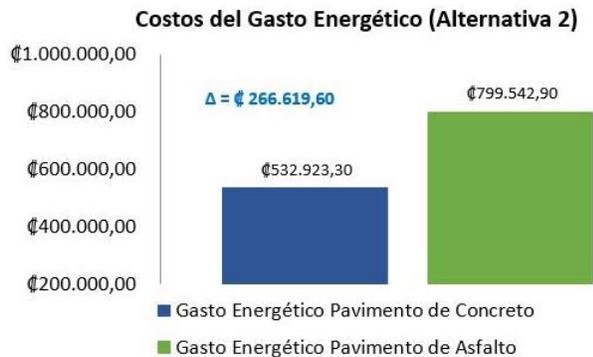
CONSUMO ENERGÉTICO MENSUAL	
<b>Aparato</b>	Luminaria 250W
<b>Cantidad</b>	1771
<b>Watts</b>	250
<b>kW</b>	0,25
<b>Horas/día</b>	12
<b>Días/mes</b>	30
<b>kWh</b>	159390
<b>Costo/kWh</b>	₡ 3,51
<b>Costo total de consumo energético mensual</b>	₡ 559.458,90

**Tabla 21.** Consumo energético para el sistema de iluminación del pavimento de concreto hidráulico (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia (2016).

Las diferencias se representan en los siguientes gráficos:



**Figura 39.** Comparación de costos del consumo energético entre ambos pavimentos (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia (2016).



**Figura 40.** Comparación de costos del consumo energético entre ambos pavimentos (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia (2016).

## Consumo de combustible

Con respecto al consumo de combustible, este aspecto va a ser diferente en cada uno de los pavimentos analizados, según se pudo observar en la sección de beneficios en el presente documento. Ahí, se explica la ventaja del pavimento rígido sobre el pavimento flexible en cuanto al consumo de combustible, ya que, según CEMEX Costa Rica S.A., y con base en el estudio del Instituto Tecnológico de Massachusetts de *“Civil engineers find savings where the rubber meets the road”* (MIT, 2012), en un pavimento rígido se ahorra hasta un 3% de combustible con respecto a un pavimento flexible. Lo anterior es debido a que un pavimento constituido de concreto hidráulico posee mayor rigidez que un pavimento constituido por mezcla asfáltica, por lo que el punto de apoyo del eje del vehículo sobre la capa de rueda (los neumáticos) se va a hundir más en un pavimento de concreto asfáltico, lo que generaría que el motor se esfuerce más en este tipo de superficie causando mayor consumo de combustible.

Para el cálculo de consumo de combustible se tomó como base cuánto consumiría cada vehículo al pasar una vez por la longitud completa de la carretera (50,61 km). Para ello se utilizaron 6 tipos de vehículos: automóviles, caga liviana, buses, dos ejes (C2), tres ejes (C3) y cinco ejes (T3-S2). Para cada tipo de ellos, se buscaron las fichas técnicas de marcas y modelos correspondientes a cada vehículo para obtener el consumo de combustible de cada uno de ellos, pero se promediaron los

consumos (litros/kilómetro) de cada uno de los dos primeros tipos de vehículo (automóviles y carga liviana) por ser los más comunes.

La cantidad de los vehículos para estimar los litros consumidos totales fueron los mismos que se calcularon para el tránsito promedio diario, que se estimó anteriormente.

Respecto a los costos del combustible, se tomaron solo la gasolina Súper y el Diesel, cuyos costos son de ₡579 y de ₡467 (datos tomados el día 6 de octubre del 2016) por cada litro respectivamente, según los precios establecidos por la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP).

Una vez que se tuvo el consumo total de combustible (litros/kilómetro), se le aplicó a la longitud total de la carretera para obtener los litros totales consumidos por los vehículos considerados, multiplicándole los costos por litro de combustible anteriores para obtener los costos requeridos.

Se calcularon los datos costos de combustible para pavimento de concreto asfáltico primero, y una vez obtenidos, se procedió a calcular los costos de pavimento de concreto hidráulico aplicándole un 3% menos a los consumos de los vehículos (lt/km). Los resultados de consumo diario de combustible se muestran a continuación:

PAVIMENTO SEMI RÍGIDO (CARPETA ASFÁLTICA)					
Tipo de vehículo	Cantidad	km / litro	Litros totales	Costo/Litro	Costo total
Automóvil	6685	12,83	26381,26	₡ 579,00	₡ 15.274.752,07
Carga Liviana	5168	7,85	33310,67	₡ 467,00	₡ 15.556.083,02
Buses	666	3,85	8757,44	₡ 467,00	₡ 4.089.724,76
2 Ejes	1674	4,35	19481,27	₡ 467,00	₡ 9.097.754,73
3 Ejes	541	3,85	7109,54	₡ 467,00	₡ 3.320.152,90
5 Ejes	2126	2,86	37616,61	₡ 467,00	₡ 17.566.957,73
<b>TOTAL</b>	<b>16861</b>		<b>132656,80</b>		<b>₡ 64.905.425,21</b>

Tabla 23. Costos del consumo diario de combustible para el pavimento de concreto asfáltico. Fuente: Elaboración propia (2016).

PAVIMENTO RÍGIDO					
Tipo de vehículo	Cantidad	km / litro	Litros totales	Costo/Litro	Costo total
Automóvil	6685	13,21	25612,88	₡ 579,00	₡ 14.829.856,38
Carga Liviana	5168	8,09	32340,46	₡ 467,00	₡ 15.102.993,22
Bus	666	3,97	8502,37	₡ 467,00	₡ 3.970.606,56
2 Ejes	1674	4,48	18913,86	₡ 467,00	₡ 8.832.771,58
3 Ejes	541	3,97	6902,46	₡ 467,00	₡ 3.223.449,41
5 Ejes	2126	2,95	36520,98	₡ 467,00	₡ 17.055.298,77
<b>TOTAL</b>	<b>16861</b>	<b>36,655125</b>	<b>128793,01</b>		<b>₡ 63.014.975,94</b>

Tabla 24. Costos del consumo diario de combustible para el pavimento de concreto hidráulico. Fuente: Elaboración propia (2016).

La diferencia de costos se representa en el siguiente gráfico:



Figura 41. Diferencia en los costos de consumo diario de combustible de ambos pavimentos. Fuente: Elaboración propia (2016).

## Resumen de los resultados obtenidos

A continuación, se adjuntarán los resultados obtenidos en costos para cada pavimento, según los aspectos anteriormente analizados, así como las diferencias entre dichos resultados, con la estructura respectiva que mejor se adapta según el punto de análisis.

TABLA DE COMPARACIÓN DE COSTOS DE AMBOS PAVIMENTOS					
Costos	Pavimento de Concreto (PC)	Pavimento de Asfalto (PA)	Diferencia de Costos		% Diferencia
Construcción inicial	₪ 66.525.053.751,20	₪ 59.649.815.355,69	Más barato PA	₪ 6.875.238.395,51	10,3%
Mantenimiento al costo real	₪ 12.215.827.540,00	₪ 39.529.150.462,33	Más barato PC	₪ 27.313.322.922,33	69,1%
Mantenimiento Valor Presente	₪ 3.476.956.285,08	₪ 13.187.904.406,56	Más barato PC	₪ 9.710.948.121,48	73,6%
Iluminación Alternativa 1	₪ 5.378.806.989,73	₪ 5.836.286.949,49	Más barato PC	₪ 457.479.959,76	7,8%
Iluminación Alternativa 2	₪ 5.330.943.217,07	₪ 5.836.286.949,49	Más barato PC	₪ 505.343.732,42	8,7%
Gasto Energético Mensual Alternativa 1	₪ 559.458,90	₪ 799.542,90	Más barato PC	₪ 240.084,00	30,0%
Gasto Energético Mensual Alternativa 2	₪ 532.923,30	₪ 799.542,90	Más barato PC	₪ 266.619,60	33,3%
Combustible por día	₪ 63.014.975,94	₪ 64.905.425,21	Más barato PC	₪ 1.890.449,28	3%

**Tabla 25.** Comparación de los costos analizados para ambos pavimentos. Fuente: Elaboración propia (2016).

## Métodos de comparación de pavimentos

Para realizar la comparación de los pavimentos analizados con la finalidad de determinar la estructura más viable por construir, según todos los costos y aspectos analizados anteriormente, se recurrió a distintos métodos los cuales consideraban los costos iniciales de construcción de cada estructura de pavimento y sus respectivos costos de conservación o mantenimiento básicamente, para luego compararlos entre ellos y determinar cuál pavimento era el más adecuado para construir según las condiciones presentes. Se destaca que para la utilización del programa HDM-4, no hubo suficiente tiempo para poder realizar el análisis del costo de ciclo de vida, debido a que dicho programa es bastante complejo y se requería el manejo de múltiples variables como mediciones de campo, por lo que se optó por realizar un análisis en el programa Microsoft Excel, realizado por la empresa CEMEX costa Rica, basado en el archivo de Excel para comparación de pavimentos preparado por el MOPT-BID. Además, se adjuntan unos análisis sencillos realizados en Microsoft Excel.

## Highway Development and Management (HDM-4)

El HDM-4 es un programa computacional que tiene como objetivo verificar la viabilidad de una estructura de pavimento según determinadas condiciones, o bien una comparación considerando dos tipos de pavimento. En sí, el HDM-4 es una herramienta diseñada para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la conservación y rehabilitación de pavimentos de redes viales, en aplicaciones principalmente dirigidas a la planeación estratégica, la programación de actividades de intervención y la evaluación técnico-económica de planes y políticas de conservación (Salgado, M., 2013).

El programa mencionado es bastante complejo, por lo que para poder evaluar una estructura de pavimento se requieren muchas variables, tanto de las características y propiedades del pavimento como de las condiciones ambientales presentes. Las variables principales son las siguientes:

### Condiciones locales

En esta sección es donde se definen los parámetros externos presentes en el lugar y las condiciones bajo las cuales estará sometido el pavimento a analizar; es decir, el programa se debe adaptar a las condiciones locales en análisis. Entre ellas están:

- Definición de los modelos de tránsito: este punto va de la mano con la definición del tránsito promedio diario. Se representa el flujo horario de los vehículos durante todo un año, es decir, se determina el número acumulado de horas que transitan los distintos tipos de vehículos definidos en un año.
- Definición de climas: la zona climática en la cual va a estar ubicada la carretera en análisis se debe caracterizar, definiendo la clasificación de la zona por humedad y por temperatura, el índice de humedad, la duración de la estación seca, la precipitación media, la temperatura media, el rango de temperatura promedio de la zona, el índice de congelamiento y el porcentaje del tiempo en que la carretera estará cubierta por nieve y por agua.
- Definición de los parámetros agregados: se deben de agregar el tipo de pavimento a considerar, el material del cual va a estar constituida la superficie, los deterioros superficiales presentes, valores de IRI, propiedades geométricas, propiedades de la capa de ruedo, base, sub-base y sub-rasante (espesores de capa, módulo de reacción, módulo de elasticidad, módulo de ruptura en el caso del concreto hidráulico, entre otros).
- Definición de relaciones de velocidad-capacidad: se definen datos como el número de carriles, el tipo de carretera, capacidad última de la carretera, capacidad a la cual cesa la condición del flujo libre, capacidad nominal, velocidad a la capacidad última de la carretera, entre otros puntos, generando una gráfica de velocidad en función del flujo horario de vehículos.

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

- Definición de accidentes: el programa considera la tasa de accidentes por 100 millones de vehículos por kilómetro, añadiendo los tipos de accidentes, ya sean fatales, heridos o sólo daños.

## Flota vehicular

En flota vehicular se definirán los tipos de vehículos que pasarán por la carretera, así como su número y proporción, incluyendo las propiedades de cada tipo de vehículo.

- Identificación de vehículos por tipo: se realizará una clasificación de los vehículos que pasen por la carretera según su tipo, ya sean automóviles, carga liviana, autobuses, camiones de dos ejes, camiones de tres ejes o camiones de cinco ejes.
- Definir factores de equivalencia de carga: se definirá la carga ejercida por los vehículos a la superficie de ruedo, como peso promedio en operación por tipo de vehículo, necesario para el posterior cálculo de los ejes equivalentes de diseño, juntos con los respectivos factores de equivalencia de cargas.
- Definición de precios unitarios de consumo: se tomarán en cuenta los costos de adquisición del vehículo nuevo y los demás gastos de operación del mismo, como neumáticos, combustible, lubricante, mano de obra de mantenimiento, salario de los operadores, y gastos generales anuales.
- Definición del valor de tiempo de viaje: se considerarán el costo promedio del tiempo de trabajo de los pasajeros, costo promedio del tiempo de ocio de los pasajeros y el costo promedio del retraso de carga.

## Trabajos

Este aspecto contempla todas las actividades de conservación y de mejora que se le deben de

aplicar al pavimento en estudio, para la cual se debe considerar lo siguiente:

- Definir trabajos y criterios de aplicación: se incluye la definición de las actividades de conservación por realizar, el tipo de superficie por tratar, el espesor, el porcentaje de compactación, además de su respectiva intervención, es decir, cada cuánto tiempo o bajo qué parámetro (que también se deben definir) se debe realizar la actividad de conservación.
- Definición de precios unitarios de las obras: para cada actividad de conservación se definirán los costos económicos y financieros que las representan.

Una vez definidos todos estos parámetros antes vistos, con el diagnóstico e identificación de necesidades para la red de caminos analizada, el programa crea una modelación de deterioro, para lo cual se le deben aplicar los aspectos definidos en la sección de trabajos, y a partir de ahí se toman las decisiones con respecto a si la estructura a construir es viable o no, con los resultados que arroja el programa, que en este caso lo que se reporta es el VAN (Valor Actual Neto) correspondiente al pavimento. Además, con los modelos de deterioro creados, se calcula una efectividad para cada pavimento, por lo que este valor junto con el VAN, determinan el pavimento más efectivo, más conveniente.



Figura 42. Inicio del software HDM-4. Fuente: HDM-4 (2016).

## Hoja de cálculo de comparación de pavimentos

Con los costos de construcción inicial del pavimento rígido y el pavimento semi-rígido, además de sus respectivos costos de mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida, se decidió utilizar una hoja de cálculo de Microsoft Excel que pudiera determinar la relación efectividad/costo de cada una de las estructuras que se analizaron.

Esta hoja de cálculo, que la proporcionó la empresa CEMEX Costa Rica S.A., se programó años atrás cuando se pensaba construir la carretera en análisis (Ruta Nacional N° 1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia), y se hizo propiamente para esta estructura.

Para explicar la hoja de cálculo, primero se comienza por colocarle los datos de diseño, tanto del pavimento rígido como del pavimento flexible, además de los datos de tránsito promedio diario, el porcentaje de distribución según los vehículos y demás datos que se requieren para el cálculo de los ejes equivalentes para cada estructura. A partir de estos datos introducidos, la hoja de cálculo realiza una estimación de los valores de PSI (Present Serviceability Index o Índice de Serviciabilidad) de cada pavimento durante cada año de su período de diseño, y con base en los valores de PSI obtenidos, la hoja de cálculo realiza una conversión de estos valores a datos de IRI (International Roughness Index o Índice de Rugosidad Internacional), de igual manera para cada año del período para el cual se está analizando.

Teniendo los valores anteriormente mencionados, se procede a graficarlos en

función del período de diseño para así obtener modelos de deterioro de ambas estructuras de pavimento, tanto con datos de PSI como con datos de IRI, para proceder a calcular la efectividad de cada pavimento. Para esto, básicamente lo que se realiza es una multiplicación de la resta del valor de IRI o PSI de cada año y el valor de IRI o PSI correspondiente a la falla, con el dato de tránsito promedio diario para el año que se está analizando, obteniendo como producto la efectividad del pavimento por año. Posteriormente, se realiza este procedimiento para cada año de la vida útil del pavimento, para sumar todas las efectividades para obtener la total correspondiente a todo el período de diseño.

Una vez obtenida la efectividad total para cada pavimento, tanto para valores de IRI como para PSI, la hoja de cálculo estimaba una relación de estas con los costos totales de cada pavimento, que básicamente era dividir la efectividad obtenida del pavimento entre el costo total de construcción inicial y mantenimiento traído a valor presente, dando como resultado una razón o relación correspondiente a la Efectividad/Costo, en la cual, la relación que resultara mayor sería la opción de pavimento más conveniente a construir.

Se señala que los valores de los índices de PSI y de IRI corresponden a valores únicamente teóricos, por lo que algunos valores de alejan de la realidad. Sin embargo, si estos fueran experimentales o medidos en el sitio se tendrían resultados más exactos y confiables.

Los datos obtenidos se muestran a continuación:

Pavimento de Concreto Asfáltico										
Año		TPD	PSI	PSI promedio	IRI promedio	TPD prom	(PSI prom -PSIfalla) *TPDprom	(IRI final- IRI prom) *TPDprom	Efectividad PSI Descontada	Efectividad IRI Descontada
0	2016	16.861,00	4,2	4,19	1,06	17.366,83	29.314,30	26.082,62	26.173,49	26.082,62
1	2017	17.873,00	4,18	4,16	1,07	18.408,84	30.614,96	27.392,30	24.406,06	24.457,41
2	2018	18.945,00	4,15	4,14	1,09	19.513,37	31.934,05	28.743,43	22.730,03	22.914,08
3	2019	20.082,00	4,12	4,11	1,1	20.684,17	33.263,89	30.132,21	21.139,80	21.447,51
4	2020	21.287,00	4,09	4,08	1,12	21.925,22	34.594,75	31.553,29	19.629,99	20.052,68
5	2021	22.564,00	4,06	4,05	1,14	23.240,74	35.914,39	32.999,34	18.195,35	18.724,71
6	2022	23.918,00	4,03	4,01	1,16	24.635,18	37.207,39	34.460,49	16.830,74	17.458,76
7	2023	25.353,00	3,99	3,97	1,18	26.113,29	38.454,38	35.923,49	15.531,08	16.249,96
8	2024	26.874,00	3,95	3,93	1,21	27.680,09	39.630,85	37.370,66	14.291,28	15.093,38
9	2025	28.486,00	3,91	3,89	1,24	29.340,89	40.705,65	38.778,33	13.106,13	13.983,85
10	2026	30.195,00	3,86	3,84	1,27	31.101,35	41.638,78	40.114,59	11.970,15	12.915,82
11	2027	32.007,00	3,81	3,79	1,3	32.967,43	42.378,19	41.335,92	10.877,43	11.883,09
12	2028	33.928,00	3,76	3,73	1,35	34.945,47	42.854,85	42.381,86	9.821,22	10.878,37
13	2029	35.963,00	3,7	3,66	1,39	37.042,20	42.974,67	43.166,18	8.793,47	9.892,57
14	2030	38.121,00	3,63	3,59	1,45	39.264,73	42.604,59	43.561,17	7.783,70	8.913,48
15	2031	40.408,00	3,55	3,5	1,52	41.620,62	41.545,54	43.366,78	6.776,98	7.922,95
16	2032	42.833,00	3,45	3,39	1,6	44.117,86	39.472,98	42.241,40	5.749,02	6.890,49
17	2033	45.403,00	3,34	3,26	1,71	46.764,93	35.772,11	39.507,92	4.651,79	5.754,10
18	2034	48.127,00	3,19	3,08	1,89	49.570,82	28.820,14	33.303,96	3.346,21	4.330,83
19	2035	51.015,00	2,97	2,74	2,26	52.545,07	12.399,95	15.635,88	1.285,46	1.815,43
20	2036	54.076,00	2,5	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Sumatoria</b>							<b>722.096,43</b>	<b>708.051,81</b>	<b>263.089,38</b>	<b>277.662,12</b>

**Tabla 26.** Efectividad calculada para el pavimento de concreto asfáltico. Fuente: Hoja de cálculo de comparación de pavimentos (2016).

Pavimento de Concreto Hidráulico										
Año		TPD	PSI	PSI promedio	IRI promedio	TPD prom	(PSI prom - PSIref) *TPDprom	(IRI final- IRI prom) *TPDprom	Efectividad PSI Descontada	Efectividad IRI Descontada
0	2016	16.861,00	4,5	4,47	0,91	17.366,83	34.280,13	28.635,27	30.607,26	28.635,27
1	2017	17.873,00	4,45	4,42	0,94	18.408,84	35.354,54	29.878,68	28.184,43	26.677,39
2	2018	18.945,00	4,39	4,36	0,96	19.513,37	36.389,21	31.131,11	25.901,12	24.817,53
3	2019	20.082,00	4,34	4,31	0,99	20.684,17	37.370,74	32.383,31	23.749,78	23.049,80
4	2020	21.287,00	4,28	4,25	1,02	21.925,22	38.283,77	33.623,87	21.723,24	21.368,58
5	2021	22.564,00	4,22	4,18	1,06	23.240,74	39.110,76	34.838,81	19.814,73	19.768,48
6	2022	23.918,00	4,15	4,12	1,1	24.635,18	39.831,72	36.011,11	18.017,85	18.244,35
7	2023	25.353,00	4,08	4,05	1,14	26.113,29	40.423,91	37.120,09	16.326,54	16.791,24
8	2024	26.874,00	4,01	3,98	1,18	27.680,09	40.861,53	38.140,74	14.735,08	15.404,40
9	2025	28.486,00	3,94	3,9	1,23	29.340,89	41.115,38	39.042,85	13.238,05	14.079,24
10	2026	30.195,00	3,86	3,82	1,28	31.101,35	41.152,45	39.790,02	11.830,35	12.811,32
11	2027	32.007,00	3,78	3,74	1,33	32.967,43	40.935,51	40.338,47	10.507,13	11.596,35
12	2028	33.928,00	3,7	3,66	1,4	34.945,47	40.422,67	40.635,53	9.263,83	10.430,13
13	2029	35.963,00	3,61	3,57	1,46	37.042,20	39.566,84	40.617,97	8.096,16	9.308,59
14	2030	38.121,00	3,52	3,48	1,53	39.264,73	38.315,26	40.209,84	7.000,05	8.227,73
15	2031	40.408,00	3,43	3,38	1,61	41.620,62	36.608,87	39.320,02	5.971,70	7.183,62
16	2032	42.833,00	3,33	3,28	1,7	44.117,86	34.381,86	37.839,23	5.007,52	6.172,40
17	2033	45.403,00	3,23	3,17	1,8	46.764,93	31.561,04	35.636,48	4.104,18	5.190,25
18	2034	48.127,00	3,12	3,07	1,9	49.570,82	28.065,56	32.555,09	3.258,60	4.233,45
19	2035	51.015,00	3,01	2,95	2,02	52.545,07	23.806,86	28.408,26	2.467,98	3.298,39
20	2036	54.076,00	2,9	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Sumatoria</b>							<b>737.838,61</b>	<b>716.156,73</b>	<b>279.805,58</b>	<b>287.288,51</b>

**Tabla 27.** Efectividad calculada para el pavimento de concreto hidráulico. Fuente: Hoja de cálculo de comparación de pavimentos (2016).

CALCULO VALOR ACTUAL NETO (EN DÓLARES)					
Año		Pavimento de Concreto Asfáltico		Pavimento de Concreto Hidráulico	
		Flujo de efectivo	Flujo de efectivo Descontado	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo Descontado
0	2016	\$ 106.521.332,00	\$ 106.521.332,00	\$ 118.798.982,00	\$ 118.798.982,00
1	2017	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
2	2018	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
3	2019	\$ 62.537,00	\$ 44.513,00	\$ -	\$ -
4	2020	\$ 8.362.132,00	\$ 5.314.286,00	\$ 83.916,00	\$ 53.330,00
5	2021	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
6	2022	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
7	2023	\$ 11.638.453,00	\$ 5.264.645,00	\$ 3.081.930,00	\$ 1.394.108,00
8	2024	\$ 510.468,00	\$ 206.170,00	\$ 7.049.347,00	\$ 2.847.113,00
9	2025	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
10	2026	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
11	2027	\$ 65.537,00	\$ 18.840,00	\$ -	\$ -
12	2028	\$ 8.362.132,00	\$ 2.146.351,00	\$ 83.916,00	\$ 21.539,00
13	2029	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
14	2030	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
15	2031	\$ 11.638.453,00	\$ 2.126.302,00	\$ 3.081.930,00	\$ 563.057,00
16	2032	\$ 510.468,00	\$ 83.268,00	\$ 7.049.347,00	\$ 1.149.901,00
17	2033	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
18	2034	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
19	2035	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
20	2036	\$ (76.694.040,00)	\$ (7.950.623,00)	\$ (111.474.662,00)	\$ (11.556.218,00)
<b>Sumatoria</b>		<b>\$ 70.977.474,00</b>	<b>\$ 113.775.084,00</b>	<b>\$ 27.754.706,00</b>	<b>\$ 113.271.813,00</b>

Tabla 28. Costo total de los pavimentos en análisis. Fuente: Hoja de cálculo de comparación de pavimentos (2016).

RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO					
Pavimento	VAN	Efectividad PSI	Efectividad IRI	Efectividad IRI /Costo	Efectividad PSI /Costo
Semi-rígido	\$113.775.084	263.089,00	277.662,00	2,4	2,3
Rígido	\$113.271.813	279.806,00	287.289,00	2,5	2,5

Tabla 29. Relación efectividad/costo obtenida. Fuente: Hoja de cálculo de comparación de pavimentos (2016).

## Comparación Beneficios/Costos

Se decidió utilizar también una comparación sencilla y rápida en el programa Microsoft Excel, considerando los costos obtenidos anteriormente de ambos pavimentos, tanto de su construcción inicial como los de las actividades de mantenimiento o conservación a lo largo del período de diseño. Además, también se tomaron en cuenta los costos o ahorros de los beneficios que se obtienen con cada pavimento, para lo que, con el pavimento rígido se obtuvieron beneficios

en mantenimiento, iluminación y consumo de combustible, y para el pavimento semi-rígido beneficios en el costo inicial de construcción.

La relación que se utilizó fue la siguiente:

$$\text{Relación BC} = \frac{\text{Ahorros con los beneficios}}{\text{Costo inicial de Construcción}}$$

**Ecuación 11.** Relación beneficio/costo. Fuente: Elaboración propia (2016).

Con lo cual fue posible obtener los siguientes resultados:

Costos Totales de los Pavimentos		
Costo	Pavimento de Concreto	Pavimento de Asfalto
Construcción inicial	₡ 66.525.053.751,20	₡ 59.649.815.355,69
Mantenimiento (valor real)	₡ 12.215.827.540,00	₡ 39.529.150.462,33
Mantenimiento (valor presente)	₡ 3.476.956.285,08	₡ 13.187.904.406,56
Sumatoria Valor Real	₡ 78.740.881.291,20	₡ 99.178.965.818,03
Sumatoria Valor Presente	₡ 70.002.010.036,28	₡ 72.837.719.762,25

**Tabla 30.** Costos de construcción inicial y mantenimiento de los pavimentos. Fuente: Elaboración propia (2016).

Costos de los Ahorros de los Beneficios		
Costo	Pavimento de Concreto	Pavimento de Asfalto
Construcción inicial	-	₡ 6.875.238.395,51
Mantenimiento (valor real)	₡ 27.313.322.922,33	-
Mantenimiento (valor presente)	₡ 9.710.948.121,48	-
Iluminación Alternativa 1	₡ 457.479.959,76	-
Iluminación Alternativa 2	₡ 505.343.732,42	-
Gasto Energético Mensual Alternativa 1	₡ 240.084,00	-
Gasto Energético Mensual Alternativa 2	₡ 266.619,60	-
Combustible por día	₡ 1.890.449,28	-
Sumatoria Alternativa 1 (VR)	₡ 27.772.933.415,37	₡ 6.875.238.395,51
Sumatoria Alternativa 2 (VR)	₡ 27.820.823.723,63	₡ 6.875.238.395,51
Sumatoria Alternativa 1 (VP)	₡ 10.170.558.614,52	₡ 6.875.238.395,51
Sumatoria Alternativa 2 (VP)	₡ 10.218.448.922,78	₡ 6.875.238.395,51

**Tabla 31.** Ahorros obtenidos con ambos pavimentos. Fuente: Elaboración propia (2016).

Relación Beneficio/Costo			
	Pavimento de Concreto Hidráulico		Pavimento de Concreto Asfáltico
	Alternativa 1	Alternativa 2	
Valor Real	41,75%	41,82%	11,53%
Valor Presente	15,29%	15,36%	11,53%

**Tabla 32.** Relación Beneficio/Costo obtenida. Fuente: Elaboración propia (2016).

Con los resultados obtenidos, se tiene que el pavimento de concreto hidráulico es la estructura más ventajosa, si se compara con el pavimento de concreto asfáltico, ya que se tiene una relación beneficio/costo mayor para la primer estructura que para la segunda.

## Análisis de costos de las propuestas

Teniendo los resultados finales del pavimento rígido y del pavimento flexible, se optó por realizar una comparación entre ambas estructuras, para lo cual se sumaron los costos

de construcción de cada pavimento con sus respectivos costos de mantenimiento y rehabilitación, restándole a su vez el valor residual de cada uno. Se destaca que el valor residual, se calculó como un porcentaje del valor original de la estructura en función de su capacidad remanente, y no como un valor calculado como la reconstrucción de un pavimento en el año cero, lo que sería agregar un nuevo ciclo o período de análisis.

Una vez realizada la suma de costos, se trajo a valor presente utilizando el programa Microsoft Excel y se obtuvieron los siguientes resultados:

Datos Generales	Valor
Período de diseño	20 años
Tasa de interes al año	12%
Inflación	0%
Propuesta en Concreto	₪ 66.525.053.751,20
Propuesta en Asfalto	₪ 59.649.815.355,69
Valor Residual para Concreto	55%
Valor Residual para Asfalto	60%
Tipo de cambio a dólares	₪ 559,98

**Tabla 33.** Datos generales para análisis de pavimentos. Fuente: Elaboración propia (2016).

Año	Pavimento Flexible				Pavimento Rígido				
	Monto (Colones)	Monto (USD)	Monto + Inflación	Valor Presente	Monto (Colones)	Monto (USD)	Monto + Inflación	Valor Presente	
0	₡ 59.649.815.355,69	\$ 106.521.331,75	\$ 106.521.331,75	\$ 106.521.331,75	₡ 66.525.053.751,20	\$ 118.798.981,66	\$ 118.798.981,66	\$ 118.798.981,66	
1	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
2	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
3	₡ 35.019.589,50	\$ 62.537,21	\$ 62.537,21	\$ 44.512,75	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
4	₡ 4.682.565.266,67	\$ 8.362.022,33	\$ 8.362.022,33	\$ 5.314.216,37	₡ 46.991.385,00	\$ 83.916,18	\$ 83.916,18	\$ 53.330,25	
5	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
6	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
7	₡ 6.517.301.000,00	\$ 11.638.453,16	\$ 11.638.453,16	\$ 5.264.645,15	₡ 1.725.819.000,00	\$ 3.081.929,71	\$ 3.081.929,71	\$ 1.394.108,49	
8	₡ 8.529.689.375,00	\$ 15.232.132,17	\$ 15.232.132,17	\$ 6.152.002,71	₡ 3.947.493.385,00	\$ 7.049.347,09	\$ 7.049.347,09	\$ 2.847.113,06	
9	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
10	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
11	₡ 35.019.589,50	\$ 62.537,21	\$ 62.537,21	\$ 17.977,95	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
12	₡ 4.682.565.266,67	\$ 8.362.022,33	\$ 8.362.022,33	\$ 2.146.322,86	₡ 46.991.385,00	\$ 83.916,18	\$ 83.916,18	\$ 21.539,19	
13	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
14	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
15	₡ 6.517.301.000,00	\$ 11.638.453,16	\$ 11.638.453,16	\$ 2.126.301,88	₡ 1.725.819.000,00	\$ 3.081.929,71	\$ 3.081.929,71	\$ 563.057,04	
16	₡ 8.529.689.375,00	\$ 15.232.132,17	\$ 15.232.132,17	\$ 2.484.690,71	₡ 3.947.493.385,00	\$ 7.049.347,09	\$ 7.049.347,09	\$ 1.149.901,21	
17	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
18	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ 775.220.000,00	\$ 1.384.370,87	\$ 1.384.370,87	\$ 180.023,02	
19	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	₡ -	\$ -	\$ -	\$ -	
Valor Residual	₡ -	\$ -	\$ -	\$ (63.912.799,05)	₡ -	\$ -	\$ -	\$ (65.339.439,91)	
<b>TOTAL (USD)</b>				<b>66.159.203,09</b>	<b>TOTAL (USD)</b>				<b>59.668.614,01</b>

Tabla 34. Análisis de las propuestas. Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

# Análisis de los resultados

El diseño del pavimento flexible que se pretendía obtener, no resultó ser totalmente flexible, sino que se obtuvo un diseño de un pavimento semi-rígido, el cual corresponde a una carpeta asfáltica apoyada en una base estabilizada. Esto es a causa de que, como se trata de una carretera de tránsito pesado, las cargas aplicadas al pavimento van a ser mayores, y por lo tanto los esfuerzos y deformaciones en la estructura también, por lo que una carpeta asfáltica sobre una base granular no sería lo más económico, por los espesores requeridos, sino que se necesita de una base estabilizada para aumentar la capacidad de soporte del pavimento.

Para el diseño del pavimento rígido equivalente al semi-rígido, se basó en la estructura propuesta por el CONAVI y se calculó un nuevo espesor de losa considerando los parámetros de diseño actuales, por lo que el resultado fue una losa de 26,52 cm de espesor. Una vez con los dos diseños completos, se procedió a calcular las cantidades de materiales necesarios y sus respectivos costos.

La construcción inicial obtenida fue de \$59.649.815.355,69 para el pavimento de concreto asfáltico y de \$66.525.053.751,20 para el pavimento de concreto hidráulico, aplicado a la carretera en estudio.

De los resultados obtenidos se puede afirmar que el pavimento de concreto hidráulico representa un mayor costo inicial de construcción que el pavimento de concreto asfáltico, siendo el primero más costoso por \$6.875.238.395,51, y con una diferencia de 10,3% en el mismo parámetro entre ambos pavimentos, lo cual está cercano al valor de 10% mencionado anteriormente. La diferencia obtenida se puede ver representada en la Figura 30.

Con respecto a las actividades de conservación analizadas, para el pavimento de concreto hidráulico se tuvo un total en costos de mantenimiento de \$12.215.827.540,00, aplicando la Ecuación 10 el costo es de \$3.476.956.285,08, y para el pavimento de concreto asfáltico el total

de costos de mantenimiento es de \$39.529.150.462,33, aplicando la misma ecuación el costo es de \$13.187.904.406,56, existiendo una diferencia aproximada del 70% entre los costos de mantenimiento entre ambos pavimentos a lo largo de sus ciclos de vida.

Como es posible observar en los resultados, el pavimento rígido requiere un menor mantenimiento que el pavimento flexible si se enfoca en los costos de conservación obtenidos para cada estructura, siendo la conservación del primero mucho más barata que la del segundo por \$27.313.322.922,33 durante los 20 años del período de diseño al valor de hoy, y aplicando la fórmula del valor presente (Ecuación 10) esa diferencia sería de \$9.710.948.121,48, siendo el pavimento rígido más barato en ambos casos. En cuanto a la frecuencia en que se presentan las actividades propuestas de mantenimiento, en realidad en ambos pavimentos, esa frecuencia es parecida. Las diferencias obtenidas se muestran en la Figura 31 y Figura 32.

Según los resultados obtenidos de los costos de la instalación de la iluminación, se tiene un ahorro importante dependiendo del tipo de pavimento por construir. Como ya se dijo, el costo de instalación de la iluminación en un pavimento de concreto hidráulico es menor al costo del mismo parámetro en un pavimento de concreto asfáltico, y representa un ahorro de \$457.479.959,76 para la alternativa 1, lo que sería una diferencia de 7,8% y 379 postes menos, y \$505.343.732,42 para la alternativa 2, con un 8,7% de diferencia y 421 postes menos. En la Figura 37 y Figura 38 se representa la diferencia en los costos de iluminación para cada pavimento.

Con los resultados obtenidos para los costos del consumo energético para ambas estructuras de pavimento, se verifica lo que ya se había mencionado con la ventaja comparativa del pavimento rígido sobre el pavimento flexible, que se encuentra en la sección de beneficios de los pavimentos. Con la alternativa 1 se da un ahorro

mensual de ₡240.084,00, representando una diferencia de 30,0% y 68.400 kWh menos, y con la alternativa 2 se produjo un ahorro mensual de ₡266.619,60, siendo una diferencia de 33,3% y 75.960 kWh menos, comparado con el pavimento de concreto asfáltico. Los ahorros anuales que se darían considerando que todas las variables se mantienen, serían de ₡2.881.008,00 para la alternativa 1, y ₡3.199.435,20 para la alternativa 2. Las diferencias se representan en la Figura 39 y Figura 40.

Respecto al consumo de combustible obtenido, se obtuvo una diferencia de ₡1.890.449,28 y 3.863,79 litros de combustible, lo que representa el ahorro al día que se tendría con el pavimento rígido sobre el pavimento flexible, con una diferencia de 3% de consumo de combustible. Si se tratara del ahorro que se daría en un mes, esa suma sería de ₡56.713.478,34 y 115.913,70 litros de combustible, esto si se mantuvieran los mismos costos de combustible y si pasaran por la carretera de 50,61 km la misma cantidad y proporción de vehículos todos los días durante ese mes. La diferencia de costos se representa en la Figura 41.

Con respecto a la comparación de los pavimentos, el programa HDM-4 fue la herramienta que se utilizó para elegir la estructura que recién se acabó de construir, para observar la viabilidad de los dos diseños de pavimentos, en el cual resultó ser más conveniente el pavimento de concreto hidráulico que el pavimento de concreto asfáltico. Sin embargo, la utilización de este programa no fue posible para este trabajo, por lo cual se recurrió a otro método de comparación ya explicado.

Refiriéndose a los cálculos realizados para las efectividades de los pavimentos analizados, así como a las relaciones efectividad/costo obtenidas, a partir de la hoja de cálculo proporcionada, la estructura más conveniente a construir corresponde al pavimento rígido. Con base al PSI, para este pavimento se reportó una efectividad de 279.806 con una relación efectividad/costo de 2,5, comparada a una efectividad de 263.089 y una relación de 2,3 correspondiente al pavimento semi-rígido de carpeta asfáltica. Con respecto al IRI, el pavimento rígido tuvo una efectividad de 287.289 y una relación efectividad/costo de 2,5, comparada a una efectividad de 277.662 y una relación de 2,4 correspondiente al pavimento semi-rígido de carpeta asfáltica.

Con respecto a los análisis sencillos realizados en Excel, y los resultados generales obtenidos, se tiene que el pavimento rígido es la estructura más ventajosa, si se compara con el pavimento flexible, o en este caso semi-rígido, ya que con respecto a los cálculos realizados, se tiene una relación beneficio/costo mayor para la primera estructura (15,29% para la alternativa 1 y 15,36% para la alternativa 2, ambas aplicando la fórmula de valor presente) que para la segunda (11,53%), por lo que se diría que el pavimento rígido es el más viable a construir para las condiciones que se consideraron.

Además, con el análisis de las propuestas realizado, en donde se sumaron los costos de construcción inicial y los de mantenimiento y rehabilitación, restándole el valor de rescate y trayendo todo a valor presente, se dice que el pavimento rígido es la estructura más viable a construir debido a que presenta una sumatoria de costos menor que el pavimento semi-rígido, según el análisis anteriormente mencionado.

# Conclusiones

- 1) Fue posible la obtención del diseño del pavimento flexible gracias a instituciones públicas como el MOPT y el CONAVI. La segunda institución fue la que aconsejó analizar la Ruta Nacional N°1 Carretera Interamericana Norte Sección Cañas-Liberia, ya que se necesitaba una ruta de tránsito pesado, y se facilitó el expediente de licitación de la ruta junto con los diseños propuestos: pavimento rígido y pavimento semi-rígido.
- 2) Analizando los diseños obtenidos, se decidió utilizar el programa WinPAS 12 y el procedimiento de diseño AASHTO 1993 para el diseño de pavimento rígido, el cual es equivalente al diseño de pavimento flexible facilitado, y se obtuvo como resultado una losa de concreto de aproximadamente 26,5 cm de espesor (26,52 cm).
- 3) Para la construcción inicial, la diferencia obtenida fue de  $\text{C}\$6.875.238.395,51$ , representando un 10,3% más costoso el pavimento de concreto hidráulico que el pavimento de concreto asfáltico. El porcentaje obtenido se acerca al valor promedio de diferencia entre estos dos pavimentos, el cual es de 10% aproximadamente.
- 4) Se investigaron y obtuvieron datos y precios actualizados de construcción y mantenimiento de pavimentos, con la ayuda del Consejo Nacional de Vialidad y de empresas constructoras con servicio de venta de materiales y alquiler de maquinaria.
- 5) El pavimento de concreto asfáltico tiende a ser mucho más costoso cuando se analiza el aspecto de mantenimiento, ya que se requiere conservarlo con más frecuencia o cantidad debido al tipo de material de la superficie de ruedo. Se tuvo una diferencia de  $\text{C}\$27.313.322.922,33$  durante los 20 años del período de diseño al costo actual, y de  $\text{C}\$9.710.948.121,48$  aplicando la fórmula de valor presente, siendo el pavimento de concreto hidráulico menos costoso.
- 6) Con respecto a los costos de iluminación y de consumo energético, resultaron menos costosos para pavimento rígido. Para la alternativa 1, se obtuvieron ahorros de  $\text{C}\$457.479.959,76$  (diferencia de 7,8%) para iluminación, y  $\text{C}\$240.084,00$  (diferencia de 30,0%) para consumo energético. Para la alternativa 2, los ahorros fueron de  $\text{C}\$505.343.732,42$  (8,7% de diferencia) y  $\text{C}\$266.619,60$  (diferencia de 33,3%) respectivamente.
- 7) Con un pavimento de concreto hidráulico en lugar de un pavimento de concreto asfáltico, se ahorra hasta un 3% en el consumo de combustible, lo cual significa un ahorro de  $\text{C}\$1.890.449,28$  diarios considerados para la carretera en análisis. Los ahorros mensuales serían de  $\text{C}\$56.713.478,34$ .
- 8) Se concluye, a partir del análisis de la efectividad de pavimentos y su relación efectividad/costo, que el pavimento rígido es la estructura más conveniente a construir para el caso analizado y las condiciones consideradas, en otras palabras, para carreteras de tránsito pesado.
- 9) Se llegó a la conclusión, de que con la comparación de Beneficio/Costo de ambas estructuras, el pavimento rígido es más ventajoso y por lo tanto más viable,

presentando un mayor porcentaje beneficio/costo que el pavimento de concreto asfáltico.

- 10) Según el análisis de costos realizado para ambas propuestas, se concluye que el pavimento rígido es el más adecuado para construir debido a que presentó una sumatoria total de costos menor que la de la otra propuesta, considerando todo el período de diseño.

- 11) Se señala, además, que, para el presente trabajo, existieron varias limitaciones que no fue posible calcularlas o no se tomaron en cuenta. La principal de ellas fue la no utilización del programa HDM-4 por las razones ya mencionadas, y también no se calculó el valor residual de los pavimentos ni se tomaron en cuenta los costos de operación de los usuarios, tales como costos de operación de los vehículos, tiempos de recorrido, accidentes, combustible, etc.

# Recomendaciones

- 1) La recomendación más importante, es que, para una comparación de pavimentos con mucho mayor credibilidad, se debe utilizar el software HDM-4 para determinar la estructura más viable, ya que constituye la herramienta más aceptable y más utilizada internacionalmente para tal fin, debido a que permite gran precisión de los resultados conforme las variables requeridas sean más reales.
- 2) Realizar o conseguir un diseño más actualizado para el pavimento de concreto asfáltico, debido a que, según las condiciones actuales, las cantidades de materiales por utilizar podrían ser mayores, lo que significaría un aumento en su costo inicial.
- 3) En cuanto a los precios de los materiales considerados para la construcción de los pavimentos, sería más recomendable recopilar los precios por unidad de la mayor cantidad de empresas constructoras y proveedoras de materiales, para así obtener un promedio de cada costo, utilizando valores más confiables.
- 4) Con respecto a las actividades de mantenimiento o conservación de pavimentos, es recomendable consultar a varios profesionales en el tema, sobre el parecer de ellos sobre la propuesta de mantenimiento planteada para cada estructura, además de utilizar los precios más actualizados posibles de cada actividad.
- 5) Aunque no sea un resultado tan importante como la construcción inicial o las actividades de mantenimiento de las estructuras, para el costo de la instalación de la iluminación, se recomienda realizar los cálculos y revisarlos junto con un profesional en el tema, para que los datos y cálculos del costo sean más precisos.
- 6) Realizar los cálculos de valor de rescate para ambos pavimentos, además de estimar y considerar los costos de operación de los usuarios para obtener resultados más precisos.
- 7) Con respecto a los valores de índices obtenidos de PSI y de IRI, corresponden a valores teóricos como ya se mencionó anteriormente, por lo que puede haber valores que no concuerden con la realidad. Por lo que, con valores de PSI y de IRI experimentales o medidos en el sitio, los resultados que se obtienen serían mucho más confiables y exactos.

# Referencias bibliográficas.

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Avendaño, M. (28 de Octubre de 2015). *Lanamme: Costa Rica necesita tres tipos diferentes de asfalto para tener mejores carreteras*. Obtenido de La Nación: [http://www.nacion.com/nacional/infraestructura/Lanamme-Costa-Rica-diferentes-carreteras\\_0\\_1520847987.html](http://www.nacion.com/nacional/infraestructura/Lanamme-Costa-Rica-diferentes-carreteras_0_1520847987.html)
- Baltodano, G. CONAVI. (29 de Julio de 2016). Diseño de pavimento flexible. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Barrantes, J. C. MOPT. (8 de Setiembre de 2016). Conservación de pavimentos. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Barrantes, R., & Sanabria, J. (15 de Junio de 2014). *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica*. Obtenido de Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/evaluaci%C3%B3n-red-vial-nacional-rv/informes-evaluaci%C3%B3n-red-vial-nacional/informes-evaluaci%C3%B3n-red-vial-nacional,-a%C3%B1o-2012-2014.html>
- Bolaños, L. Grupo Laboro. (6 de Agosto de 2016). Construcción de pavimento flexible. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Calo, D. (20 de Abril de 2010). *Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón*. Obtenido de Instituto del Cemento Portland Argentino: <http://dbase.icpa.org.ar/files/dnv%20santiago/disenio%20santiago.pdf>
- Camarena, A. CEMEX. (16 de Agosto de 2016). Diseño de pavimento rígido y conservación de pavimentos. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Campos, I. ICCYC. (13 de Octubre de 2016). Metodología de comparación de pavimentos. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Castro, P. (2016). Curso Construcción de Pavimentos. *Diseño estructural de pavimentos de acuerdo con la metodología AASHTO 1993*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Castro, P. (2016). Curso Construcción de Pavimentos. *Diseño estructural de pavimentos rígidos*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- CEMEX México. (2010). *Manual de Pavimentos de Concreto CEMEX*. México: Talleres Gráficos Imprenta Print S.A.
- CEMEX México. (2011). *Pavimentos de Concreto*. Obtenido de CEMEX: <http://www.cemex.com/ES/ProductosServicios/Pavimentos.aspx>
- Chang, C. (2009). *Guía Metodológica de Diseños Equivalentes de Pavimentos Rígidos y Flexibles*. Lima, Perú: ASOCCEM.
- Chang, C. (25 de Junio de 2011). *El Pavimento Urbano de Concreto como Estructura Sostenible*. Obtenido de Web ASOCCEM: [http://web.asocem.org.pe/asocem/bib\\_img/84629-8-1.pdf](http://web.asocem.org.pe/asocem/bib_img/84629-8-1.pdf)
- Consejo Nacional de Vialidad. (21 de Marzo de 2011). LPI N°2011LI-000004-ODI00. *Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional N°1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia*. San José, San José, Costa Rica.
- Consejo Nacional de Vialidad. (25 de Noviembre de 2014). LP N°2014LN-000018-0CV00. *Mantenimiento Periódico y Rehabilitación del Pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada*. San José, San José, Costa Rica.

- Fernández, S. (2016). Curso Construcción de Pavimentos. *Diseño de Pavimentos Rígidos*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Fernández, S. TEC. (8 de Octubre de 2016). Módulo de reacción de sub-rasante y revisión de resultados. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Figueroa, T. MOPT. (20 de Octubre de 2016). Metodología de comparación de pavimentos. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Garro, C. CEMEX. (20 de Setiembre de 2016). Revisión de resultados. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Grupo Nación. (2016). *De Cañas a Liberia en una vía de primer mundo*. Obtenido de La Nación: [http://www.nacion.com/brandvoice/Canas-Liberia-via-primer-mundo\\_19\\_1557034282.html](http://www.nacion.com/brandvoice/Canas-Liberia-via-primer-mundo_19_1557034282.html)
- Gutiérrez, D. CONAVI. (6 de Setiembre de 2016). Uso del software HDM-4. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Herrera, L. (3 de Junio de 2013). *Costa Rica usa asfalto no apto para carga vehicular y temperaturas*. Obtenido de La Nación: [http://www.nacion.com/nacional/comunidades/Costa-Rica-asfalto-vehicular-temperaturas\\_0\\_1345465542.html](http://www.nacion.com/nacional/comunidades/Costa-Rica-asfalto-vehicular-temperaturas_0_1345465542.html)
- Herrero, E. (7 de Junio de 2004). *Carreteras, ¿asfalto o concreto?* Obtenido de La Nación: [http://www.nacion.com/ln\\_ee/2004/junio/07/opinion7.html](http://www.nacion.com/ln_ee/2004/junio/07/opinion7.html)
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Madrigal, R. (25 de Noviembre de 2014). *Inversión en carreteras de concreto implica menos gastos en mantenimiento*. Obtenido de Noticias CRHoy: <http://www.crhoy.com/archivo/inversion-en-carreteras-de-concreto-implica-menos-gastos-en-mantenimiento/>
- Marín, M. CNFL. (26 de Agosto de 2016). Iluminación de carreteras. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile. (2008). *Diseño Estructural de Pavimentos Rígidos*. Obtenido de MINVU: [http://www.minvu.cl/incjs/download.aspx?gls\\_cod\\_nodo=20101122145644&hdd\\_nodo\\_archivo=SECCI%C3%93N%2015%20DISE%C3%91O%20ESTRUCTURAL%20DE%20PAVIMENTOS%20RIGIDOS.pdf](http://www.minvu.cl/incjs/download.aspx?gls_cod_nodo=20101122145644&hdd_nodo_archivo=SECCI%C3%93N%2015%20DISE%C3%91O%20ESTRUCTURAL%20DE%20PAVIMENTOS%20RIGIDOS.pdf)
- Molina, E. ICCYC. (1 de Setiembre de 2016). Uso y obtención del software HDM-4. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Pavement Interactive. (15 de Agosto de 2007). *Jointed Plain Concrete Pavement*. Obtenido de Pavement Interactive : <http://www.pavementinteractive.org/article/jointed-plain-concrete-pavement/>
- Rico, A., Mendoza, A., & Téllez, R. (1998). *Algunos aspectos comparativos entre pavimentos flexibles y rígidos*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt103.pdf>
- Salas, M. LanammeUCR. (15 de Julio de 2016). Posibles carreteras a analizar. (J. D. Coto, Entrevistador)
- Salgado, M. (25 de Noviembre de 2013). Posibilidades del HDM-4 en el ámbito de la gestión de infraestructura vial. *Pavimentando ICH*. Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Guatemala: Secretaría de Integración Económica Centroamericana.
- Solano, J. (19 de Octubre de 2016). Metodología de comparación de pavimentos. (J. D. Coto, Entrevistador)

# Apéndices

En esta sección se presentarán todos los diseños y cálculos que contempla el presente trabajo, demostrando de qué manera se obtuvo los valores presentados en la sección de Resultados.

# Apéndice 1.

Proceso de construcción de ambos pavimentos en análisis.

ALTERNATIVA PAVIMENTO RÍGIDO	
ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EXISTENTE	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PARA LA AMPLIACIÓN
Recuperar espesor promedio de 20 cm de la estructura existente, incorporarle cemento, homogenizar y compactar para obtener BE-35.	Excavaciones, limpiezas y obras necesarias de acuerdo a los planos.
Sobre esta superficie construir losa de concreto hidráulico de 25 cm de espesor.	Sobre superficie conformada y compactada, colocar 20 cm de espesor de material de préstamo seleccionado para acabado caso 2, con CBR mayor o igual a 10, compactado 95% de la densidad máxima establecida.
	Sobre este material se colocará un espesor de 20 cm de sub-base gradación B, compactado al 95% de la densidad máxima establecida.
	Sobre la sub-base, se construirá una capa de 20 cm de base estabilizada BE-35.
	Sobre base estabilizada, construir losa de concreto de 25 cm espesor.

**Tabla 35.** Proceso de construcción para pavimento de concreto hidráulico. Fuente: Consejo Nacional de Vialidad (2011).

ALTERNATIVA PAVIMENTO SEMI RÍGIDO	
ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EXISTENTE	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PARA LA AMPLIACIÓN
Reacondicionamiento de calzada, recuperar espesor promedio de 10 cm, para conformar la calzada existente.	Excavaciones, limpiezas y obras necesarias de acuerdo a los planos.
Sobre la anterior, compactada y conformada, se construirá capa de 20 cm de base estabilizada BE-35.	Sobre sub-rasante conformada y compactada, colocar espesor de 45 cm de material de préstamo seleccionado para acabado clase 2, con CBR mayor o igual a 10, compactados al 95%.
Sobre esta base estabilizada, colocar una carpeta asfáltica de 15 cm de espesor.	Sobre el material de préstamo compactado, se colocará un espesor de 30 cm de sub-base graduación B, compactados al 95% de la densidad máxima establecida.
	Sobre lo anterior, construir capa de 20 cm de base estabilizada BE-35.
	Sobre la base estabilizada colocar carpeta asfáltica de 15 cm de espesor.

**Tabla 36.** Proceso de construcción para pavimento de concreto asfáltico. Fuente: Consejo Nacional de Vialidad (2011).

## Apéndice 2.

Diseño propuesto de pavimento de concreto asfáltico.

EJES EQUIVALENTES TOTALES 8,2 TON (2013)			
Pavimento Semi-Rígido			
Período (años)	20	Período (años)	12
Eeq	24.760.604	Eeq	11.355.259

Tabla 37. Ejes equivalentes pavimento de concreto asfáltico. Fuente: CONAVI (2011).

CBR DE LA SUBRASANTE	
CBR de diseño	Módulo Resilente (psi)
3,2%	4800

CBR MATERIAL DE PRÉSTAMO	
CBR de diseño	Módulo Resilente (psi)
10%	10000

CBR DE SUB-BASE		
Estructura	CBR de diseño	Módulo Resilente (psi)
Ampliación	30%	14800
Existente	6,50%	4530

CBR DE LA BASE ESTABILIZADA	
Resistencia Mín. Permissible a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo Resilente (psi)
40	650000
30	600000

Tabla 38. Propiedades de las capas de soporte del pavimento de concreto asfáltico. Fuente: CONAVI (2011).

PARÁMETROS DE DISEÑO PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
Período de Diseño	20 años		Correspondencia
Características	Valor con base estabilizada		
W18	24.760.604		Número de ejes equivalentes de 8,2 ton
Log10 (W18)	7,39		-
So	0,43		Error estándar de diseño
R	90%		Nivel de confianza de diseño
dPSI	1,7		Diferencia entre índice de servicio final e inicial
SN	6,4		Número estructural requerido
	Ampliación	Existente	-
a1	0,45	0,45	Coficiente estructural carpeta asfáltica
a2	0,17	0,14	Coficiente estructural base granular o estabilizada
a3	0,11	0,06	Coficiente estructural sub-base granular
a4	0,08	-	Coficiente estructural material de préstamo
m1	1,00	1,00	Coficiente de drenabilidad carpeta asfáltica
m2	1,00	0,90	Coficiente de drenabilidad base granular o estabilizada
m3	0,90	0,90	Coficiente de drenabilidad sub-base granular
m4	0,90	0,90	Número de ejes equivalentes de 8,2 ton

Tabla 39. Parámetros de diseño utilizados para pavimento semi-rígido. Fuente: CONAVI (2011).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)	
Estructura propuesta	Espesor (cm)
Sub-Rasante (CBR 3,2%)	-
Préstamo (CBR=>10%)	45
Sub-Base Granular	30
Base Estabilizada BE-35	20
Carpeta Asfáltica	15

**Tabla 40.** Estructura de pavimento semi-rígido propuesta. Fuente: Consejo Nacional de Vialidad (2011).

## Apéndice 3.

Desglose de los costos totales del pavimento de concreto asfáltico por actividad.

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA						
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)						
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 201.01	Limpieza y desmonte	ha	75,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Tractor de orugas D6T	1,00	-	ha/día	750,00	₺ 38.220,00	₺ 28.665.000,00
Excavadora de orugas 322	1,00	-	ha/día	750,00	₺ 38.220,00	₺ 28.665.000,00
Vagoneta tandem A	4,00	-	ha/día	2949,07	₺ 17.472,00	₺ 51.526.151,04
Canon escombrera	1,00	-	ha/día	97500,00	₺ 600,00	₺ 58.500.000,00
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 167.356.151,04</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operario	2,00	-	hr	1500,00	₺ 1.075,48	₺ 1.613.221,50
Chofer	1,00	-	hr	2949,07	₺ 1.268,50	₺ 3.740.901,19
Peón	2,00	-	hr	1500,00	₺ 971,14	₺ 1.456.704,00
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 6.810.826,69</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
-				₺ -		
<b>Subtotal</b>						<b>₺ -</b>
RESUMEN DE COSTOS						
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₺ 174.166.977,73				
Subtotal precio unitario		₺ 2.322.226,37				
Imprevistos	5,00%	₺ 116.111,32				
Administración	5,00%	₺ 116.111,32				
Utilidad	10,00%	₺ 232.222,64				
Precio unitario		₺ 2.786.671,64				

**Tabla 41.** Actividad de limpieza y desmonte (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 203.01	Remoción (estructuras y obstrucciones)	unid.	50,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Excavadora de oruga 322	1,00	-	m3/día	100,00	₡ 38.220,00	₡ 3.822.000,00																					
Martillo hidráulico	1,00	-	-	100,00	₡ 13.977,60	₡ 1.397.760,00																					
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	146,65	₡ 17.472,00	₡ 2.562.268,80																					
Tractor de orugas	0,25	-	-	25,00	₡ 38.220,00	₡ 955.500,00																					
Canon escombrera	1,00	-	m3	650,00	₡ 600,00	₡ 390.000,00																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 9.127.528,80</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operario	2,00	-	hr	200,00	₡ 1.075,48	₡ 215.096,20																					
Chofer	1,00	-	hr	146,65	₡ 1.268,50	₡ 186.025,82																					
Capataz		-	hr	100,00	₡ 1.268,50	₡ 126.850,20																					
Peón	3,00	-	hr	300,00	₡ 971,14	₡ 291.340,80																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 819.313,02</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
				₡ -																							
<b>Subtotal</b>						<b>₡ -</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 9.946.841,82</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 198.936,84</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 9.946,84</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 9.946,84</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 19.893,68</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 238.724,20</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 9.946.841,82	Subtotal precio unitario		₡ 198.936,84	Imprevistos	5,00%	₡ 9.946,84	Administración	5,00%	₡ 9.946,84	Utilidad	10,00%	₡ 19.893,68	Precio unitario		₡ 238.724,20
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 9.946.841,82																									
Subtotal precio unitario		₡ 198.936,84																									
Imprevistos	5,00%	₡ 9.946,84																									
Administración	5,00%	₡ 9.946,84																									
Utilidad	10,00%	₡ 19.893,68																									
Precio unitario		₡ 238.724,20																									

**Tabla 42.** Actividad de remoción de estructuras y obstrucciones (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 203.02	Remoción (tuberías)	m	1500,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Excavadora de orugas 322	1,00	-	m3/día	416,44	₡ 38.220,00	₡ 15.916.336,80
Vagoneta convencional	1,00	-	-	342,53	₡ 17.472,00	₡ 5.984.684,16
Vagoneta convencional	1,00	-	-	1271,30	₡ 17.472,00	₡ 22.212.153,60
Compactador manual	10,00	-	-	4164,38	₡ 3.412,50	₡ 14.210.946,75
Cabezal	1,00	-	-	238,93	₡ 15.000,00	₡ 3.583.950,00
Carreta plana	1,00	-	-	238,93	₡ 5.000,00	₡ 1.194.650,00
Back hoe 416E	2,00	-	-	238,93	₡ 17.472,00	₡ 4.174.584,96
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 67.277.306,27</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	3,00	-	hr	1249,31	₡ 1.075,48	₡ 1.343.609,17
Chofer	1,00	-	hr	1852,76	₡ 1.268,50	₡ 2.350.229,77
Peón	12,00	-	hr	4997,26	₡ 971,14	₡ 4.853.019,09
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 8.546.858,02</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Agregados para relleno	7166,25	m3	₡ 8.500,00	₡ 60.913.125,00		
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 60.913.125,00</b>
RESUMEN DE COSTOS						
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 136.737.289,29				
Subtotal precio unitario		₡ 91.158,19				
Imprevistos	5,00%	₡ 4.557,91				
Administración	5,00%	₡ 4.557,91				
Utilidad	10,00%	₡ 9.115,82				
Precio unitario		₡ 109.389,83				

**Tabla 43.** Actividad de remoción de tuberías (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

<b>PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA</b> <b>PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)</b>																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 204.05 (a)	Excavación de préstamo seleccionado para acabado (caso 2)	m3	950000,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	71744,98	₺ 17.472,00	₺ 1.253.528.290,56																					
Motoniveladora 140 H	1,00	-	m3/día	12350,00	₺ 43.680,00	₺ 539.448.000,00																					
Compactadora CS533	1,00	-	-	12350,00	₺ 35.490,00	₺ 438.301.500,00																					
Tanque de agua	2,00	-	-	24700,00	₺ 6.000,00	₺ 148.200.000,00																					
<b>Subtotal</b>					<b>₺</b>	<b>2.379.477.790,56</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Chofer	1,00	-	hr	96444,98	₺ 1.268,50	₺ 122.340.650,02																					
Operador de equipo	2,00	-	hr	24700,00	₺ 1.075,48	₺ 26.564.380,70																					
Peón	3,00	-	hr	37050,00	₺ 971,14	₺ 35.980.588,80																					
Capataz	1,00	-	hr	12350,00	₺ 1.268,50	₺ 15.665.999,70																					
<b>Subtotal</b>					<b>₺</b>	<b>200.551.619,22</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Agregado préstamo para acabado caso 2	1235000,00	m3	₺ 8.500,00	₺ 10.497.500.000,00																							
<b>Subtotal</b>					<b>₺</b>	<b>10.497.500.000,00</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₺ 13.077.529.409,78</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 13.765,82</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 688,29</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 688,29</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₺ 1.376,58</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 16.518,98</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₺ 13.077.529.409,78	Subtotal precio unitario		₺ 13.765,82	Imprevistos	5,00%	₺ 688,29	Administración	5,00%	₺ 688,29	Utilidad	10,00%	₺ 1.376,58	Precio unitario		₺ 16.518,98
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₺ 13.077.529.409,78																									
Subtotal precio unitario		₺ 13.765,82																									
Imprevistos	5,00%	₺ 688,29																									
Administración	5,00%	₺ 688,29																									
Utilidad	10,00%	₺ 1.376,58																									
Precio unitario		₺ 16.518,98																									

**Tabla 44.** Actividad excavación de préstamo seleccionado para acabado (caso 2) (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 301.06	Sub base de agregados, graduación B	m3	200000,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	40925,93	₡ 17.472,00	₡ 715.057.848,96																					
Motoniveladora 140 H	1,00	-	m3/día	3250,00	₡ 43.680,00	₡ 141.960.000,00																					
Compactadora CS533	1,00	-	-	3250,00	₡ 35.490,00	₡ 115.342.500,00																					
Tanque de agua	1,00	-	-	3250,00	₡ 6.000,00	₡ 19.500.000,00																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 991.860.348,96</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	3,00	-	hr	6500,00	₡ 1.075,48	₡ 6.990.626,50																					
Chofer	1,00	-	hr	44175,93	₡ 1.268,50	₡ 56.037.255,56																					
Peón	3,00	-	hr	9750,00	₡ 971,14	₡ 9.468.576,00																					
Capataz	1,00	-	hr	3250,00	₡ 1.268,50	₡ 4.122.631,50																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 76.619.089,56</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Agregado para sub-base	260000,00	m3	₡ 11.250,00	₡ 2.925.000.000,00																							
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 2.925.000.000,00</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 3.993.479.438,52</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 19.967,40</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 998,37</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 998,37</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 1.996,74</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 23.960,88</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 3.993.479.438,52	Subtotal precio unitario		₡ 19.967,40	Imprevistos	5,00%	₡ 998,37	Administración	5,00%	₡ 998,37	Utilidad	10,00%	₡ 1.996,74	Precio unitario		₡ 23.960,88
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 3.993.479.438,52																									
Subtotal precio unitario		₡ 19.967,40																									
Imprevistos	5,00%	₡ 998,37																									
Administración	5,00%	₡ 998,37																									
Utilidad	10,00%	₡ 1.996,74																									
Precio unitario		₡ 23.960,88																									

**Tabla 45.** Actividad de sub-base de agregados, graduación B (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 209.01 (a)	Excavación (para estructuras)	m3	35000,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Excavadora de orugas 322	1,00	-	m3/día	1400,00	₡ 38.220,00	₡ 53.508.000,00
Vagoneta convencional	1,00	-	-	1966,05	₡ 17.472,00	₡ 34.350.825,60
Tractor de orugas	1,00	-	-	1400,00	₡ 38.220,00	₡ 53.508.000,00
Tanque de agua	1,00	-	-	1400,00	₡ 6.000,00	₡ 8.400.000,00
<b>Subtotal</b>					<b>₡</b>	<b>149.766.825,60</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	2,00	-	hr	2800,00	₡ 1.075,48	₡ 3.011.346,80
Chofer	1,00	-	hr	1966,05	₡ 1.268,50	₡ 2.493.938,36
<b>Subtotal</b>					<b>₡</b>	<b>5.505.285,16</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Canon escombrera	45500,00	m3	₡ 600,00	₡ 27.300.000,00		
<b>Subtotal</b>					<b>₡</b>	<b>27.300.000,00</b>
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 182.572.110,76				
Subtotal precio unitario		₡ 5.216,35				
Imprevistos	5,00%	₡ 260,82				
Administración	5,00%	₡ 260,82				
Utilidad	10,00%	₡ 521,63				
Precio unitario		₡ 6.259,62				

**Tabla 46.** Actividad de excavación para estructuras (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 414.01	Riego de liga (tipo CRS-1 capa de liga)	lt	1350000,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Barredora	0,50	-	lt/día	2275,71	₡ 19.110,00	₡ 43.488.818,10
Distribuidor de asfalto WA64T	0,50	-	-	2275,71	₡ 15.000,00	₡ 34.135.650,00
Cabezal	1,00	-	-	1495,84	₡ 15.000,00	₡ 22.437.600,00
Cisterna	1,00	-	-	1495,84	₡ 3.000,00	₡ 4.487.520,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 104.549.588,10</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Chofer	2,00	-	hr	3771,56	₡ 1.268,50	₡ 4.784.231,40
Peón	3,00	-	hr	4551,43	₡ 971,14	₡ 4.420.057,52
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 9.204.288,93</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Emulsión asfáltica litro	1350000,00	lt	₡ 480,80	₡ 649.073.250,00		
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 649.073.250,00</b>
RESUMEN DE COSTOS						
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 762.827.127,03				
Subtotal precio unitario		₡ 565,06				
Imprevistos	5,00%	₡ 28,25				
Administración	5,00%	₡ 28,25				
Utilidad	10,00%	₡ 56,51				
Precio unitario		₡ 678,07				

**Tabla 47.** Actividad de riego de liga (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 413.02	Riego de imprimación	lt	1350000,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Barredora	0,50	-	lt/día	2844,64	₡ 19.110,00	₡ 54.361.070,40																					
Distribuidor de asfalto WA64T	0,50	-	-	2844,64	₡ 15.000,00	₡ 42.669.600,00																					
Cabezal	1,00	-	-	1495,84	₡ 15.000,00	₡ 22.437.600,00																					
Cisterna	1,00	-	-	1495,84	₡ 3.000,00	₡ 4.487.520,00																					
					<b>Subtotal</b>	<b>₡ 123.955.790,40</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Chofer	2,00	-	hr	4340,49	₡ 1.268,50	₡ 5.505.920,25																					
Peón	3,00	-	hr	5689,29	₡ 971,14	₡ 5.525.074,33																					
					<b>Subtotal</b>	<b>₡ 11.030.994,58</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Emulsión asfáltica litro	1350000,00	lt	₡ 480,80	₡ 649.073.250,00																							
					<b>Subtotal</b>	<b>₡ 649.073.250,00</b>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 784.060.034,98</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 580,79</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 29,04</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 29,04</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 58,08</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 696,94</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 784.060.034,98	Subtotal precio unitario		₡ 580,79	Imprevistos	5,00%	₡ 29,04	Administración	5,00%	₡ 29,04	Utilidad	10,00%	₡ 58,08	Precio unitario		₡ 696,94
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 784.060.034,98																									
Subtotal precio unitario		₡ 580,79																									
Imprevistos	5,00%	₡ 29,04																									
Administración	5,00%	₡ 29,04																									
Utilidad	10,00%	₡ 58,08																									
Precio unitario		₡ 696,94																									

**Tabla 48.** Actividad de riego de imprimación (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 413.03	Material de secado	m3	7500,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Distribuidor de agregados	0,50	-	m3/día	937,50	₡ 10.920,00	₡ 10.237.500,00																					
Vagoneta convencional	1,00	-	-	1418,13	₡ 17.472,00	₡ 24.777.567,36																					
Back hoe 416 E	0,50	-	-	937,50	₡ 17.472,00	₡ 16.380.000,00																					
Compactadora CB534	0,50	-	-	937,50	₡ 3.276,00	₡ 3.071.250,00																					
Tanque de agua	0,50	-	-	937,50	₡ 6.000,00	₡ 5.625.000,00																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 60.091.317,36</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	2,00	-	hr	1875,00	₡ 1.075,48	₡ 2.016.526,88																					
Chofer	1,00	-	hr	3293,13	₡ 1.268,50	₡ 4.177.341,99																					
Peón	2,00	-	hr	937,50	₡ 971,14	₡ 910.440,00																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 7.104.308,87</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Agregados	7500,00	m3	₡ 8.500,00	₡ 63.750.000,00																							
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 63.750.000,00</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 130.945.626,23</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 17.459,42</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 872,97</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 872,97</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 1.745,94</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 20.951,30</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 130.945.626,23	Subtotal precio unitario		₡ 17.459,42	Imprevistos	5,00%	₡ 872,97	Administración	5,00%	₡ 872,97	Utilidad	10,00%	₡ 1.745,94	Precio unitario		₡ 20.951,30
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 130.945.626,23																									
Subtotal precio unitario		₡ 17.459,42																									
Imprevistos	5,00%	₡ 872,97																									
Administración	5,00%	₡ 872,97																									
Utilidad	10,00%	₡ 1.745,94																									
Precio unitario		₡ 20.951,30																									

**Tabla 49.** Actividad de material de secado (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

<b>PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA</b> <b>PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)</b>						
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 303.04 (a)	Reacondicionamiento de la calzada existente	m2	300000,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Recuperadora	1,00	-	m2/día	1818,18	₡ 60.000,00	₡ 109.090.800,00
Motoniveladora 140 H	1,00	-	-	1818,18	₡ 43.680,00	₡ 79.418.102,40
Compactadora CS533	1,00	-	-	1818,18	₡ 35.490,00	₡ 64.527.208,20
Tanque de agua	1,00	-	-	1818,18	₡ 6.000,00	₡ 10.909.080,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 263.945.190,60</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	2,00	-	hr	3636,36	₡ 1.075,48	₡ 3.910.836,09
Operador de equipo	1,00	-	hr	1818,18	₡ 1.075,48	₡ 1.955.418,04
Peón	2,00	-	hr	3636,36	₡ 971,14	₡ 3.531.400,10
Chofer	1,00	-	hr	1818,18	₡ 1.268,50	₡ 2.306.364,97
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 11.704.019,21</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
				₡ -		
<b>Subtotal</b>				<b>₡ -</b>		
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 275.649.209,81				
Subtotal precio unitario		₡ 918,83				
Imprevistos	5,00%	₡ 45,94				
Administración	5,00%	₡ 45,94				
Utilidad	10,00%	₡ 91,88				
Precio unitario		₡ 1.102,60				

**Tabla 50.** Actividad de reacondicionamiento de la calzada existente (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA</b> <b>PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)</b>																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 302.01 (a)	Base estabilizada con cemento Portland tipo BE-35, 20 cm espesor	m2	1000000,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Recuperadora	1,00	-	m2/día	4775,90	₡ 60.000,00	₡ 286.554.000,00																					
Motoniveladora 140 H	2,00	-	m3/día	9551,80	₡ 43.680,00	₡ 417.222.624,00																					
Compactadora CS533	2,00	-	-	9551,80	₡ 35.490,00	₡ 338.993.382,00																					
Tanque de agua	2,00	-	-	9551,80	₡ 6.000,00	₡ 57.310.800,00																					
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	28264,90	₡ 17.472,00	₡ 493.844.332,80																					
Cabezal	1,00	-	-	9214,29	₡ 15.000,00	₡ 138.214.350,00																					
Carreta plana	1,00	-	-	9214,29	₡ 5.000,00	₡ 46.071.450,00																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 1.778.210.938,80</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	2,00	-	hr	14327,70	₡ 1.075,48	₡ 15.409.169,12																					
Operador de equipo	-	-	hr	9551,80	₡ 1.075,48	₡ 10.272.779,42																					
Peón	4,00	-	hr	38207,20	₡ 971,14	₡ 37.104.387,38																					
Chofer	-	-	hr	47030,98	₡ 1.268,50	₡ 59.658.892,19																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 122.445.228,11</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Cemento más desperdicio	579600,00	sacos	₡ 6.115,00	₡ 3.544.254.000,00																							
Agregados para base estabilizada más desperdicio	260000,00	m3	₡ 12.250,00	₡ 3.185.000.000,00																							
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 6.729.254.000,00</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 8.629.910.166,91</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 8.629,91</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 431,50</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 431,50</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 862,99</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 10.355,89</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 8.629.910.166,91	Subtotal precio unitario		₡ 8.629,91	Imprevistos	5,00%	₡ 431,50	Administración	5,00%	₡ 431,50	Utilidad	10,00%	₡ 862,99	Precio unitario		₡ 10.355,89
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 8.629.910.166,91																									
Subtotal precio unitario		₡ 8.629,91																									
Imprevistos	5,00%	₡ 431,50																									
Administración	5,00%	₡ 431,50																									
Utilidad	10,00%	₡ 862,99																									
Precio unitario		₡ 10.355,89																									

**Tabla 51.** Actividad de base estabilizada con cemento (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)						
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19 mm, de 15 cm de espesor compactado para superficie de ruedo	m2	830000,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Planta de asfalto	1,00	600,00	ton/día	5120,06	₡ 160.000,00	₡ 819.209.600,00
Planta eléctrica 3412	1,00	-	-	5120,06	₡ 35.000,00	₡ 179.202.100,00
Cargador de llantas 938 G	1,00	-	-	5120,06	₡ 30.030,00	₡ 153.755.401,80
Vagoneta covencional	13,00	-	-	64449,91	₡ 17.472,00	₡ 1.126.068.827,52
Pavimentadora 1055	1,00	-	-	5120,06	₡ 32.000,00	₡ 163.841.920,00
Compactadora CB634	1,00	-	-	5120,06	₡ 32.760,00	₡ 167.733.165,60
Compactador de llantas grande	1,00	-	-	5120,06	₡ 35.490,00	₡ 181.710.929,40
Tanque de agua	1,00	-	-	5120,06	₡ 6.000,00	₡ 30.720.360,00
Barredora RJ 350	0,50	-	-	2560,03	₡ 19.110,00	₡ 48.922.173,30
Distribuidora de asfalto WA64T	0,50	-	-	2560,03	₡ 15.000,00	₡ 38.400.450,00
Back hoe 416 E	0,50	-	-	2560,03	₡ 17.472,00	₡ 44.728.844,16
Vagoneta 3 ejes	-	-	-	12066,88	₡ 18.000,00	₡ 217.203.840,00
Cabezal	1,00	-	-	21471,93	₡ 15.000,00	₡ 322.078.950,00
Cisterna	1,00	-	-	21471,93	₡ 3.000,00	₡ 64.415.790,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 3.557.992.351,78</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	-	-	hr	5120,06	₡ 1.075,48	₡ 5.506.527,25
Operario	-	-	hr	5120,06	₡ 1.075,48	₡ 5.506.527,25
Chofer	-	-	hr	64449,91	₡ 1.268,50	₡ 81.754.839,73
Ayudante	2,00	-	hr	10240,13	₡ 1.056,04	₡ 10.813.997,13
Operario	4,00	-	hr	17920,22	₡ 1.075,48	₡ 19.272.856,13
Chofer	-	-	hr	46218,89	₡ 1.268,50	₡ 58.628.754,40
Peón	2,00	-	hr	10240,13	₡ 971,14	₡ 9.944.558,89
Rastrilleros asfalto	6,00	-	hr	30720,38	₡ 971,14	₡ 29.833.666,95
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 221.261.727,73</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Mezcla asfáltica	305000,00	ton	₡ 49.000,00	₡ 14.945.000.000,00		
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 14.945.000.000,00</b>
RESUMEN DE COSTOS						
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 18.724.254.079,51				
Subtotal precio unitario		₡ 22.559,34				
Imprevistos	5,00%	₡ 1.127,97				
Administración	5,00%	₡ 1.127,97				
Utilidad	10,00%	₡ 2.255,93				
Precio unitario		₡ 27.071,21				

**Tabla 52.** Actividad de pavimento de concreto asfáltico para superficie de ruedo (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 401.01 (b)	Pavimento de concreto asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19 mm, de espesor compactado variable para espaldones, (cuña de 15 a 7 cm)	m2	170000,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Planta de asfalto	1,00	600,00	ton/día	769,04	₡ 160.000,00	₡ 123.046.400,00
Planta eléctrica 3412	1,00	-	-	769,04	₡ 35.000,00	₡ 26.916.400,00
Cargador de llantas 938 G	1,00	-	-	769,04	₡ 30.030,00	₡ 23.094.271,20
Vagoneta covencional	13,00	-	-	9680,43	₡ 17.472,00	₡ 169.136.472,96
Pavimentadora 1055	1,00	-	-	769,04	₡ 32.000,00	₡ 24.609.280,00
Compactadora CB634	1,00	-	-	769,04	₡ 32.760,00	₡ 25.193.750,40
Compactador de llantas grande	1,00	-	-	769,04	₡ 35.490,00	₡ 27.293.229,60
Tanque de agua	1,00	-	-	769,04	₡ 6.000,00	₡ 4.614.240,00
Barredora RJ 350	0,50	-	-	384,52	₡ 19.110,00	₡ 7.348.177,20
Distribuidora de asfalto WA64T	0,50	-	-	384,52	₡ 15.000,00	₡ 5.767.800,00
Back hoe 416 E	0,50	-	-	384,52	₡ 17.472,00	₡ 6.718.333,44
Vagoneta 3 ejes	-	-	-	2563,46	₡ 18.000,00	₡ 46.142.280,00
Cabezal	1,00	-	-	3225,10	₡ 15.000,00	₡ 48.376.500,00
Cisterna	1,00	-	-	3225,10	₡ 3.000,00	₡ 9.675.300,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 547.932.434,80</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	-	-	hr	769,04	₡ 1.075,48	₡ 827.087,91
Operario	-	-	hr	769,04	₡ 1.075,48	₡ 827.087,91
Chofer	-	-	hr	9680,43	₡ 1.268,50	₡ 12.279.644,82
Ayudante	2,00	-	hr	1538,08	₡ 1.056,04	₡ 1.624.275,54
Operario	4,00	-	hr	2691,63	₡ 1.075,48	₡ 2.894.796,92
Chofer	-	-	hr	6942,12	₡ 1.268,50	₡ 8.806.093,10
Peón	2,00	-	hr	1538,08	₡ 971,14	₡ 1.493.684,86
Rastrilleros asfalto	6,00	-	hr	4614,23	₡ 971,14	₡ 4.481.044,87
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 33.233.715,93</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Mezcla asfáltica	45815,00	m3/ton	₡ 49.000,00	₡ 2.244.935.000,00		
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 2.244.935.000,00</b>
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 2.826.101.150,73				
Subtotal precio unitario		₡ 16.624,12				
Imprevistos	5,00%	₡ 831,21				
Administración	5,00%	₡ 831,21				
Utilidad	10,00%	₡ 1.662,41				
Precio unitario		₡ 19.948,95				

**Tabla 53.** Actividad de pavimento de concreto asfáltico para espaldones (Pavimento Semi-rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

## Apéndice 4.

### Cálculo de los ejes equivalentes de diseño para el pavimento rígido.

Para el cálculo de los ejes equivalentes de diseño se utilizó la siguiente ecuación:

$$EEq = TPD_{anual} * F. Camión * F. Crecimiento * F. Sentido * F. Carril$$

TPD anual: tránsito promedio diario anual.

F. Camión: factor camión (Tabla 54).

F. Crecimiento: factor de crecimiento (Figura 43).

F. Sentido: factor de sentido (0,5 para ambas direcciones).  
F. Carril: factor carril.

**Ecuación 12.** Ejes equivalentes de diseño. Fuente: Castro, P. (2016)

Los factores de crecimiento, en función del porcentaje de crecimiento se muestran a continuación:

**Table D.20. Traffic Growth Factors\***

Analysis Period Years (n)	Annual Growth Rate, Percent (g)							
	No Growth	2	4	5	6	7	8	10
1	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
2	2 0	2 02	2 04	2 05	2 06	2 07	2 08	2 10
3	3 0	3 06	3 12	3 15	3 18	3 21	3 25	3 31
4	4 0	4 12	4 25	4 31	4 37	4 44	4 51	4 64
5	5 0	5 20	5 42	5 53	5 64	5 75	5 87	6 11
6	6 0	6 31	6 63	6 80	6 98	7 15	7 34	7 72
7	7 0	7 43	7 90	8 14	8 39	8 65	8 92	9 49
8	8 0	8 58	9 21	9 55	9 90	10 26	10 64	11 44
9	9 0	9 75	10 58	11 03	11 49	11 98	12 49	13 58
10	10 0	10 95	12 01	12 58	13 18	13 82	14 49	15 94
11	11 0	12 17	13 49	14 21	14 97	15 78	16 65	18 53
12	12 0	13 41	15 03	15 92	16 87	17 89	18 98	21 38
13	13 0	14 68	16 63	17 71	18 88	20 14	21 50	24 52
14	14 0	15 97	18 29	19 16	21 01	22 55	24 21	27 97
15	15 0	17 29	20 02	21 58	23 28	25 13	27 15	31 77
16	16 0	18 64	21 82	23 66	25 67	27 89	30 32	35 95
17	17 0	20 01	23 70	25 84	28 21	30 84	33 75	40 55
18	18 0	21 41	25 65	28 13	30 91	34 00	37 45	45 60
19	19 0	22 84	27 67	30 54	33 76	37 38	41 45	51 16
20	20 0	24 30	29 78	33 06	36 79	41 00	45 76	57 28
25	25 0	32 03	41 65	47 73	54 86	63 25	73 11	98 35
30	30 0	40 57	56 08	66 44	79 06	94 46	113 28	164 49
35	35 0	49 99	73 65	90 32	111 43	138 24	172 32	271 02

**Figura 43.** Factores de crecimiento de tránsito de la AASHTO. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país

FACTOR CAMIÓN		
Tipo	Factor Camión Promedio	
	Rígido	Flexible
Liviano	0,0005	0,0005
Carga Liviana	0,01	0,01
Bus	3,05	2,29
C2	0,63	0,63
C3	1,71	1,28
T3-S2	3,17	2,38

**Tabla 54.** Factores camión utilizados. Fuente: CONAVI (2016).

EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO 20 AÑOS (2016)								
Tipo de vehículo	TPD	TPD Anual	Factor Camión	% Crecimiento	Factor de crecimiento a 20 años	Factor de sentido	Factor carril	EEQ diseño
Automóviles	6.685	2.440.111	0,0005	6%	36,79	0,5	0,7	15.710
Carga Liviana	5.168	1.886.461	0,01	6%	36,79	0,5	0,7	242.910
Buses	666	243.161	3,05	6%	36,79	0,5	0,7	9.549.753
2 Ejes	1.674	611.172	0,63	6%	36,79	0,5	0,7	4.957.943
3 Ejes	541	197.405	1,71	6%	36,79	0,5	0,7	4.346.627
5 Ejes	2.126	775.894	3,17	6%	36,79	0,5	0,7	31.670.822
<b>TOTAL</b>	<b>16.861</b>	<b>6.154.203</b>	-	-	-	-	-	<b>50.783.765</b>

**Tabla 55.** Ejes equivalentes de diseño obtenidos para pavimento de concreto hidráulico. Fuente: Elaboración propia (2016).

## Apéndice 5.

### Diseño propuesto de pavimento de concreto hidráulico.

Con respecto a los parámetros de diseño que se usaron para el diseño del pavimento, se decidió utilizar los mismos valores con los que el CONAVI trabajó cuando realizó los diseños, para el caso de los coeficientes de drenaje y de transferencia de carga y las propiedades del

concreto. Los ejes equivalentes de diseño y el módulo de reacción de la capa de soporte de la losa, juntos con los parámetros restantes si se calcularon con los procedimientos vistos en secciones anteriores.

PARÁMETROS DE DISEÑO PAVIMENTO RÍGIDO		
Características	Valor con base estabilizada	Correspondencia
W18	50.783.765	Número de ejes equivalentes de 8,2 ton
So	0,35	Error estándar de diseño
R	90%	Nivel de confianza de diseño
dPSI	2	Diferencia entre índice de servicio final e inicial
J	2,7	Coefficiente de transferencia de cargas
K (pci)	300	Módulo de reacción
Ec (psi)	4.800.397	Módulo de elasticidad del concreto
Cd	1,1	Coefficiente de drenaje
S'c (psi)	711	Módulo de ruptura del concreto

Tabla 56. Parámetros de diseño utilizados para pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia (2016).

**Losa de Concreto**

Rigid Design Inputs

PCC Thickness  inches

Design ESAL

Reliability  percent

Overall Deviation

Modulus of Rupture  psi

Modulus of Elasticity  psi

Load Transfer, J

Drainage Coefficient

Mod. Sub. Reaction, k  psi/in

Initial Serviceability, Po

Terminal Serviceability, Pt

Solve For

**Pavement Thickness**  
**10.44 inches**

Figura 44. Diseño de la losa de concreto (WinPAS 12). Fuente: Elaboración propia (2016).

PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)	
Estructura propuesta	Espesor (cm)
Sub-Rasante (CBR 3,2%)	-
Préstamo (CBR=>10%)	20,00
Sub-Base Granular	20,00
Base Estabilizada BE-35	20,00
Losa de concreto	26,52

Tabla 57. Estructura de pavimento semi-rígido propuesta. Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país

## Apéndice 6.

### Procedimiento para el cálculo del espesor de la losa de concreto.

El procedimiento de diseño para pavimentos de concreto hidráulico, según AASHTO 93, que utiliza el programa utilizado ya mencionado, se resume a continuación:

- Cálculo de los ejes equivalentes de diseño (ya calculado anteriormente).
- Determinación del módulo de reacción (k) en capa de apoyo de la losa.

Para esto, se requiere de las variables de módulo de rigidez de la sub-base y de la sub-rasante, para poder determinar el factor "k" necesario, correspondiente al módulo de reacción en la capa de apoyo de la losa. Además, se

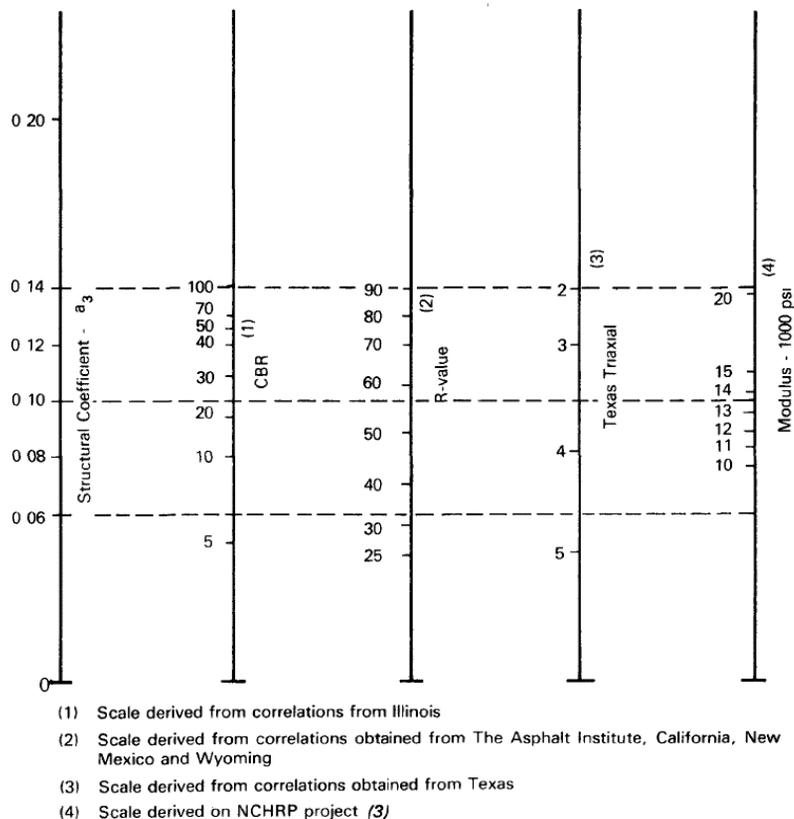
necesita suponer un espesor de la sub-base, para el cual se utilizó 8 pulgadas (aproximadamente 20 cm).

Para el cálculo del módulo resiliente de la sub-rasante se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$M_R = 1500 * CBR$$

**Ecuación 13.** Módulo resiliente de la sub-rasante. Fuente: Huang, Y. (2004).

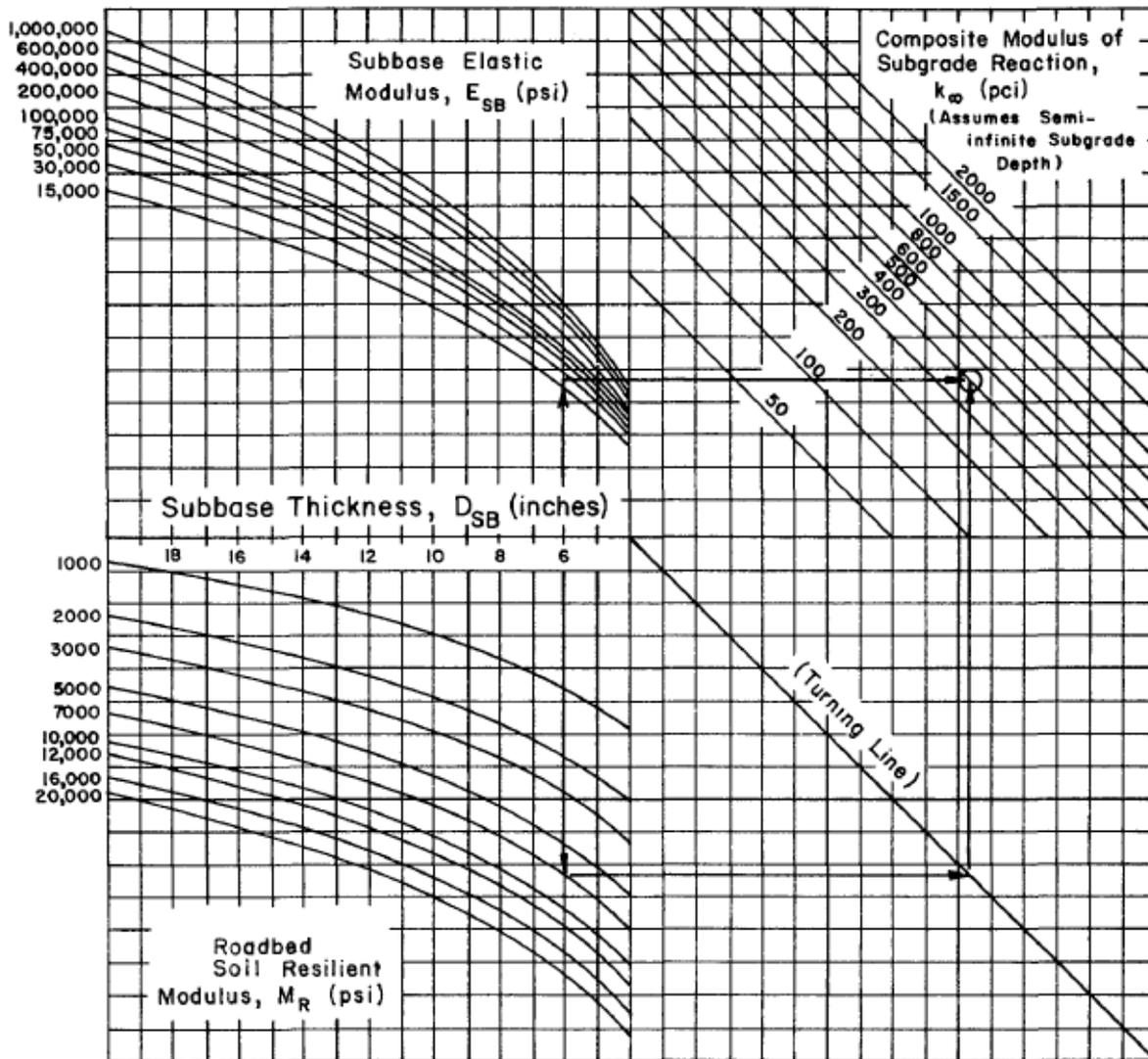
Además, para poder determinar el módulo de elasticidad de la sub-base, se utilizó la siguiente figura:



**Figure 2.7. Variation in Granular Subbase Layer Coefficient ( $a_3$ ) with Various Subbase Strength Parameters (3)**

**Figura 45.** Módulo de elasticidad de la sub-rasante. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.



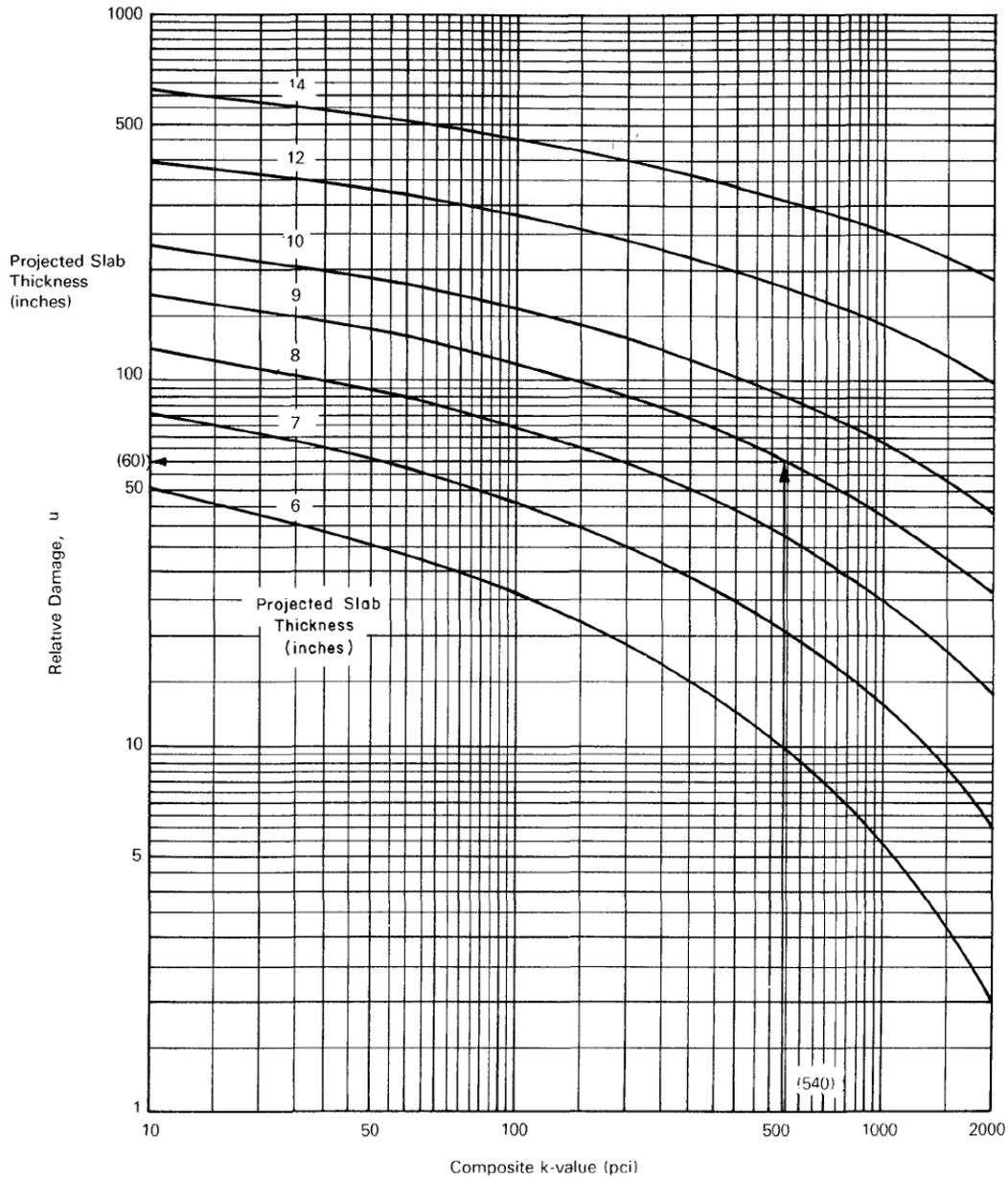
**Figure 3.3. Chart for Estimating Composite Modulus of Subgrade Reaction,  $k_{\infty}$ , Assuming a Semi-Infinite Subgrade Depth. (For practical purposes, a semi-infinite depth is considered to be greater than 10 feet below the surface of the subgrade.)**

**Figura 46.** Factor "k" Módulo de reacción compuesto de la capa de apoyo de la losa. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

Posteriormente, se utiliza la figura anterior para la determinación del factor "k" compuesto. Ahora se debe calcular el daño relativo durante los meses

del año según las condiciones climáticas y los módulos de reacción compuestos determinados, por medio de la siguiente figura:

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país



**Figure 3.5. Chart for Estimating Relative Damage to Rigid Pavements Based on Slab Thickness and Underlying Support**

**Figura 47.** Estimación del daño relativo. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

Luego de esto, se promedian los daños relativos obtenidos y con el resultado se determina un nuevo módulo de reacción compuesto, con la figura anterior. Ahora, se debe suponer una pérdida en la capacidad de soporte de la capa de

apoyo de la losa, lo cual va a afectar el valor de "k" ya determinado. Para lo cual se utilizará la siguiente figura, entrando con el factor que se determinó anteriormente, obteniendo un nuevo valor de "k" ya corregido:

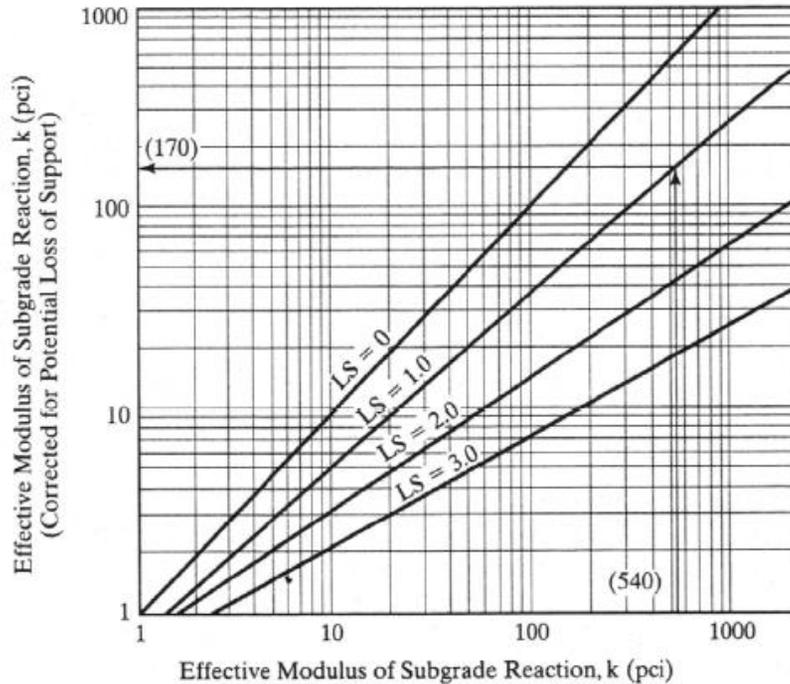


FIGURE 12.21

Correction of effective modulus of subgrade reaction due to loss of foundation contact (1 pci = 271.3 kN/m<sup>3</sup>). (After McCullough and Elkins (1979).)

Figura 48. Factor "k" corregido por pérdida en capacidad de soporte. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (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 49. Valores de pérdida de soporte según la capa de apoyo de la losa de concreto. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país

Como conclusión, el módulo de reacción efectivo (factor “k”) determinado fue de 300 pci. El procedimiento de cálculo del mismo se detalla en el Apéndice 7.

- Nivel de confianza de la carretera en análisis: se consideró una confiabilidad del 90%.

**Table 2.2. Suggested Levels of Reliability for Various Functional Classifications**

Functional Classification	Recommended Level of Reliability	
	Urban	Rural
Interstate and Other Freeways	85-99	90-99
Principal Arterials	80-99	75-95
Collectors	80-95	75-95
Local	50-80	50-80

NOTE: Results based on a survey of the AASHTO Pavement Design Task Force

**Figura 50.** Niveles de confianza. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

- Índice de Servicio Terminal: generalmente es 2,5 para carreteras importantes.

**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 52.** Coeficiente de drenaje. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

- Desviación estándar: para pavimentos rígidos corresponde a 0,35.

**TABLE 11.15 Standard Normal Deviates for Various Levels of Reliability**

Reliability (%)	Standard normal deviate ( $Z_R$ )	Reliability (%)	Standard normal deviate ( $Z_R$ )
50	0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

**Figura 51.** Desviación estándar normal según el nivel de confiabilidad. Fuente: Huang, Y. (2004)

- Cambio en el Índice de Servicio ( $\Delta PSI$ ): corresponde a la diferencia del PSI inicial (4,5 para pavimentos rígidos) y el PSI terminal.
- Coeficiente de drenaje. Se considera la eficiencia del sistema de drenaje y el porcentaje del tiempo que ocurre precipitación, para lo cual se consideró un drenaje excelente y más de un 25% del tiempo para precipitación ( $C_d=1,1$ ). Se determina de la siguiente manera:

- Coeficiente de transferencia de cargas entre las losas: Se considera el tipo de pavimento a construir y los sistemas de

transferencia de cargas (dovelas), para un J = 2,7. Se determina con la siguiente figura:

**Table 2.6. Recommended Load Transfer Coefficient for Various Pavement Types and Design Conditions**

Shoulder	Asphalt		Tied P.C.C.	
	Yes	No	Yes	No
<b>Load Transfer Devices</b>				
<b>Pavement Type</b>				
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 53.** Coeficiente de transferencia de cargas. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

- Cálculo del espesor de la losa. Con respecto al cálculo del espesor de la losa de concreto, una vez obtenidos

todos los parámetros de diseño necesarios, se procederá a determinar dicho espesor con la siguiente ecuación:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 7,35 * (\log_{10}(D + 1)) - 0,06 + \left( \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right)}{1 + \frac{1,624 * 10^7}{(D + 1)^{3,46}}} \right) + (4,22 - (0,32 * PSI_f)) * \log_{10} \left( \frac{S'_c * C_d * (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 * J * \left( D^{0,75} - \left( \frac{18,42}{\left( \frac{E_c}{k} \right)^{0,25}} \right)} \right)} \right)$$

- k: Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante (pci)
- W18: Número de Ejes equivalentes 8,2 ton
- Ec: Módulo de elasticidad del concreto (psi)
- S'c: Módulo de ruptura del concreto (S'c) (psi)
- Cd: Coeficiente de drenaje
- J: Coeficiente de transferencia de carga
- ΔPSI: Diferencia de serviciabilidad
- PSI<sub>f</sub>: índice de serviciabilidad final
- So: Desviación estándar
- Z<sub>R</sub>: desviación estándar normal
- D: espesor de la losa de concreto (in)

**Ecuación 14.** Determinación del espesor de la losa de concreto. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

Para el cálculo del espesor de la losa de concreto hidráulico (Apéndice 8.), también se pueden emplear, con los parámetros anteriormente definidos, las siguientes figuras para la obtención del espesor de la losa.

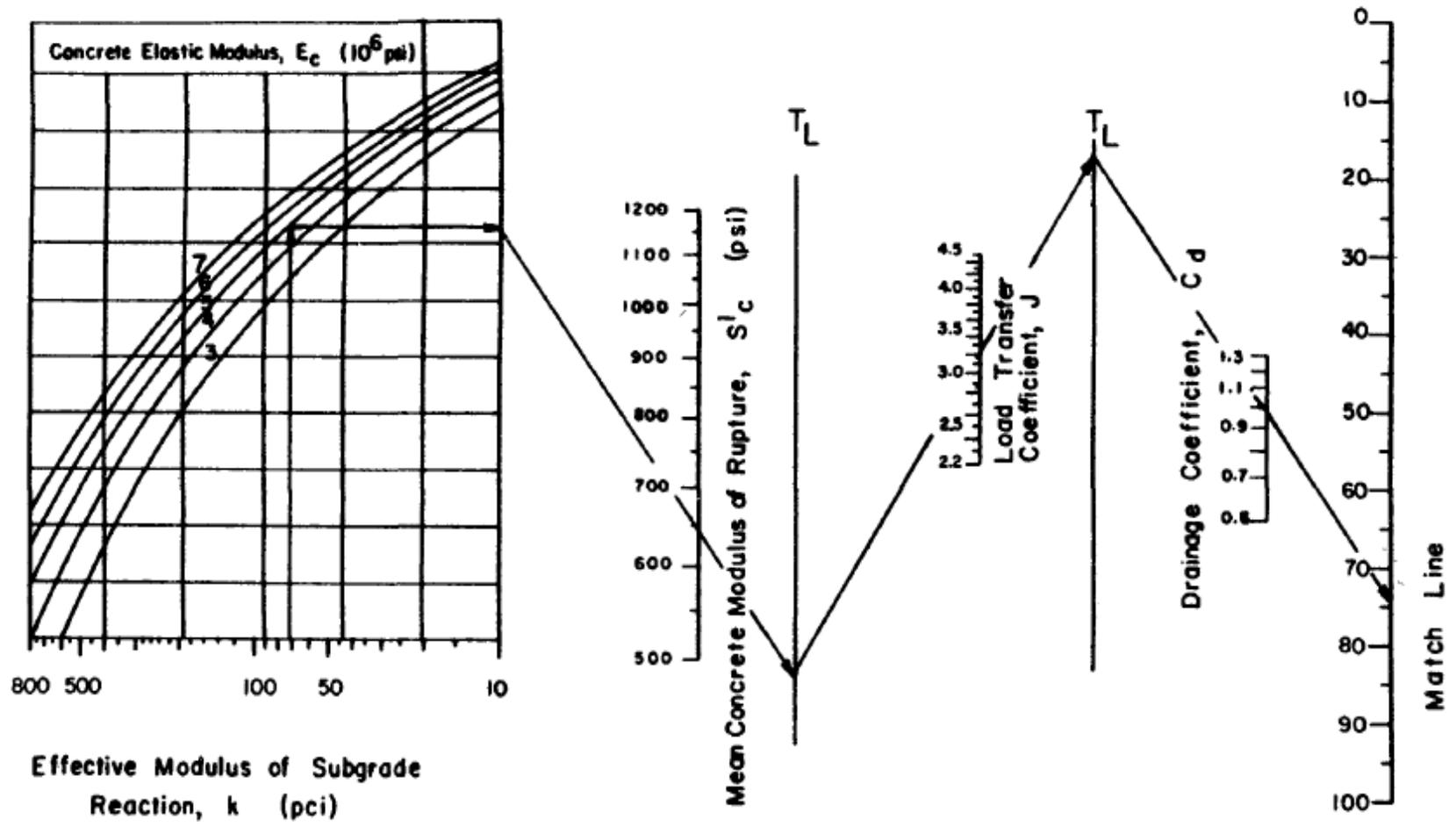


Figura 54. Determinación del espesor de la losa. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

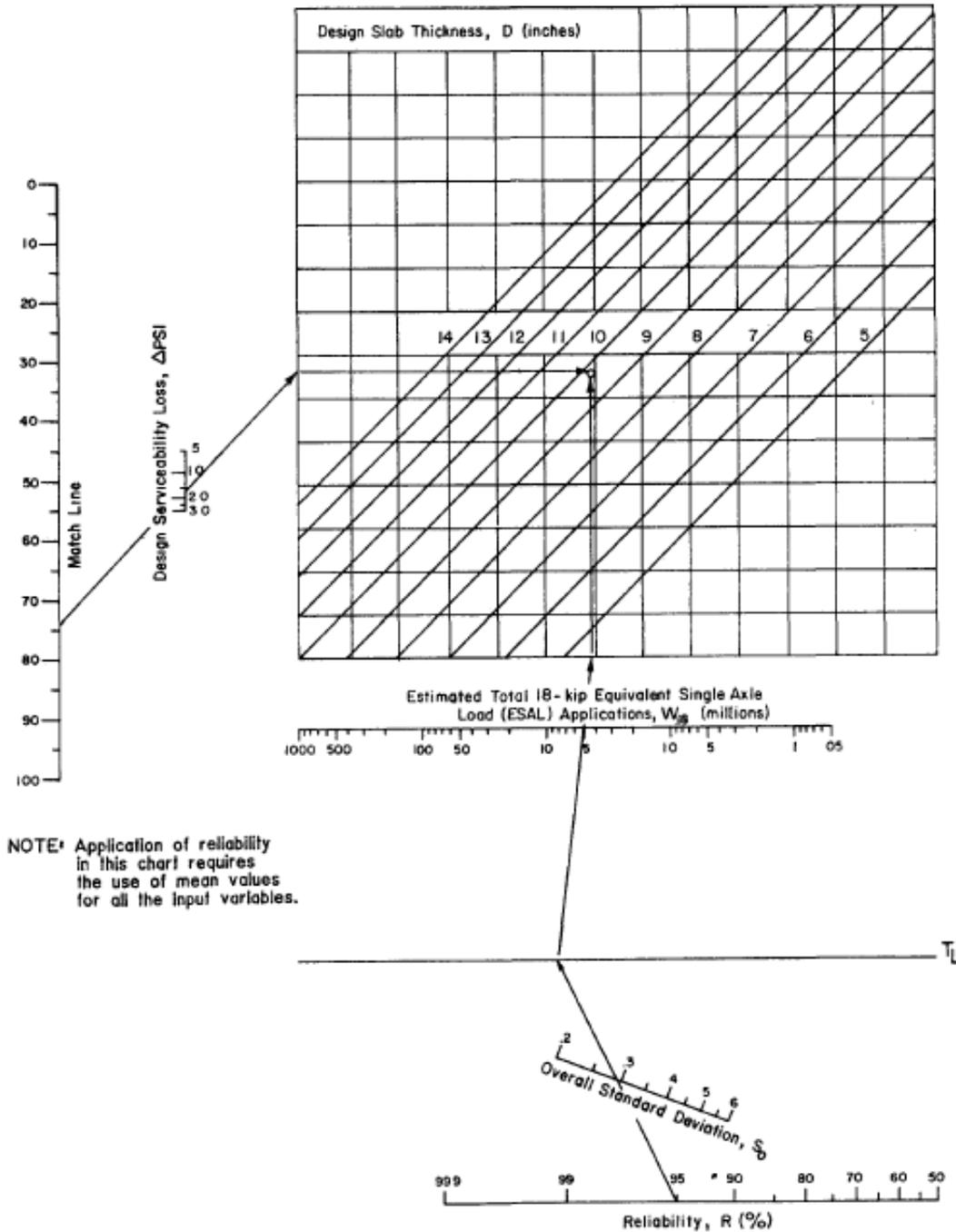


Figura 55. Determinación del espesor de la losa. Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993).

El resultado final fue una losa de 10,44 pulgadas, o 26.52 cm, lo que corresponde aproximadamente a una losa de 26,5 cm de

espesor. Las cantidades calculadas de concreto se detallan en el Apéndice 9.

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país

## Apéndice 7.

Cálculo del módulo de reacción de la sub-rasante (k).

MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUB-RASANTE							
		CBR Sub-Rasante (%)		3,20			
		CBR Sub-Base (%)		30,00			
		Pérdida de soporte		0,00		<i>Considerando que es una base estabilizada</i>	
		Porcentaje a sumar al CBR en condiciones lluviosas		20%			
Mes	Condición	CBR		Módulo Resiliente Sub-Rasante (psi)	Módulo de Elasticidad Sub-Base (psi)	Módulo de Reacción Compuesto (pci)	Daño relativo ( $\mu r$ )
		Sub-Rasante	Sub-Base				
Enero	Seca	3,20	30,00	4800	14800	280	0,52
Febrero	Seca	3,20	30,00	4800	14800	280	0,52
Marzo	Seca	3,20	30,00	4800	14800	280	0,52
Abril	Seca	3,20	30,00	4800	14800	280	0,52
Mayo	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Junio	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Julio	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Agosto	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Septiembre	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Octubre	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Noviembre	Lluviosa	3,84	36,00	5760	16000	350	0,47
Diciembre	Seca	3,20	30,00	4800	14800	280	0,52
<b>Sumatoria</b>							5,89
		Daño relativo promedio ( $\mu r$ )		0,4908			
		Módulo de Reacción Compuesto (pci)		300			
		Módulo de Reacción Efectivo (pci)		300			

Tabla 58. Estimación del módulo de reacción de la sub-rasante (k). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

## Apéndice 8.

Diseño de la losa de concreto.

DISEÑO DE LA LOSA DE CONCRETO (AASHTO 1993)	
<b>Parámetros de Diseño de la Losa de Concreto</b>	
Número de Ejes equivalentes 8,2 ton (W18)	50.783.765,00
Resistencia a la compresión del concreto (f'c) (psi)	5.470,00
Módulo de elasticidad del concreto (Ec) (psi)	4.800.397,00
Módulo de ruptura del concreto (S'c) (psi)	711
Módulo de reacción efectivo de la sub-rasante (k) (pci)	300
Coefficiente de drenaje (Cd)	1,1
Coefficiente de transferencia de carga (J)	2,7
Índice de serviciabilidad inicial	4,5
Índice de serviciabilidad final	2,5
Nivel de confianza (R)	90%
Desviación estándar (So)	0,35
Desviación estándar normal (Zr)	-1,282
<b>Variables obtenidas</b>	
Diferencia de serviciabilidad (ΔPSI)	2
Log(W18)	7,7057
Zr * So	-0,4487
Log(ΔPSI/(4,5-1,5))	-0,1761
<b>Espesor de losa</b>	
Espesor de entrada (in)	10,4381
Espesor de losa de concreto propuesto (in)	10,44
Espesor de losa de concreto propuesto (cm)	26,51
<b>Resultados</b>	
<i>La ecuación debe ser igual a cero</i>	
F (x) =	0,0000
<b>Por lo tanto:</b>	<i>Se acepta el espesor</i>
$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 7,35 * (\log_{10}(D + 1)) - 0,06 + \left( \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right)}{1 + \frac{1,624 * 10^7}{(D + 1)^{8,45}}} \right) + (4,22 - (0,32 * PSI_f)) * \log_{10} \left( \frac{S'_c * C_d * (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 * J * \left( D^{0,75} - \left( \frac{18,42}{\left( \frac{E_c}{k} \right)^{0,25}} \right)} \right)} \right)$	

**Tabla 59.** Cálculo del espesor de la losa de concreto hidráulico. Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país

# Apéndice 9.

Cálculo de las cantidades de concreto necesario.

DISEÑO DE LA LOSA DE CONCRETO	
<i>WinPAS</i>	
<b>Losa de Concreto</b>	<b>Cantidades de concreto</b>
<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Rigid Design Inputs</p> <p>PCC Thickness <input type="text" value="10,44"/> inches</p> <p>Design ESAL <input type="text" value="50.783.765"/></p> <p>Reliability <input type="text" value="90,00"/> percent</p> <p>Overall Deviation <input type="text" value="0,35"/></p> <p>Modulus of Rupture <input type="text" value="711,0"/> psi</p> <p>Modulus of Elasticity <input type="text" value="4.800.397,0"/> psi</p> <p>Load Transfer, J <input type="text" value="2,70"/></p> <p>Drainage Coefficient <input type="text" value="1,10"/></p> <p>Mod. Sub. Reaction, k <input type="text" value="300,0"/> psi/in</p> <p>Initial Serviceability, Po <input type="text" value="4,50"/></p> <p>Terminal Serviceability, Pt <input type="text" value="2,50"/></p> <p>Solve For</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; display: inline-block;"> <p><b>Pavement Thickness</b> <b>10,44 inches</b></p> </div> <input type="button" value="Solve For"/> </div>	
<p>Espesor de losa (in) 10,44</p> <p>Espesor de losa (m) 0,2652</p> <p>Espesor de espaldón (m) 0,2300</p> <p>Área de capa de ruedo (m3) 830.000,00</p> <p>Área de espaldones (m3) 170.000,00</p> <p>Densidad de mezcla (ton/m3) 2,4</p> <p>% Desperdicio 5%</p>	
<b>Cantidades para capa de ruedo</b>	
<p>Volumen (m3) 220.096,08</p> <p>Peso total (ton) 528.230,59</p> <p>Volumen con desperdicio (m3) 231.100,88</p> <p>Peso total con desperdicio (ton) 554.642,12</p>	
<b>Cantidades para espaldones</b>	
<p>Volumen (m3) 39.100,00</p> <p>Peso total (ton) 93.840,00</p> <p>Volumen con desperdicio (m3) 41.055,00</p> <p>Peso total con desperdicio (ton) 98.532,00</p>	

Tabla 60. Cantidad de concreto estimada. Fuente: Elaboración propia (2016).

## Apéndice 10.

Cálculo de las cantidades para la construcción de la base estabilizada de ambos pavimentos.

BASE ESTABILIZADA BE-35			
Espesor de base			0,2 m
Área de capa de ruedo (m3)			830.000,00 m2
Área de espaldones (m3)			170.000,00 m2
<b>Volumen</b>			200.000,00 m3
<b>Densidad</b>			2,3 ton/m3
<b>Peso de material</b>			460.000,00 ton
<b>% Material no compactado</b>			25%
<b>% Desperdicio</b>			5%
<b>Volumen con desperdicio</b>			260.000,00 m3
<b>Peso de material con desperdicio</b>			598.000,00 ton
<b>% cemento/agregado</b>			6%
<b>Peso de cemento</b>			27.600,00 ton
<b>Sacos sin desperdicio</b>			552.000,00 sacos
<b>Peso de cemento con desperdicio</b>			28.980,00 ton
Cemento		Base	
Cantidad total de sacos	579.600,00	Material de base (m3)	260.000,00
Saco de cemento 50 kg	₡ 6.115,00	Precio de material /m3	₡ 12.250,00
Costo total	₡ 3.544.254.000,00	Costo total	₡ 3.185.000.000,00
<b>Precio de la base estabilizada</b>	<b>₡ 6.729.254.000,00</b>		

**Tabla 61.** Estimación de cantidades de materiales para base estabilizada. Fuente: Elaboración propia (2016).

*Nota: el peso de los sacos de cemento se consideró de 50 kg exactos.*

# Apéndice 11.

Tablas para el diseño del acero.

Tabla 7-36  
Resumen de especificaciones para colocación de dovelas

Espesor de losa (cm)	1	2	3	4	5
	Diámetro de Dovelas cm (plg)	Largo de Dovelas (cm)	Diámetro comercial de dovela (plg)	Profundidad de dovelas (cm)	Separación entre dovelas (cm)
15	1.88 (0.74)	28	3/4	7.50	30.00
16	2.01 (0.79)	29	3/4	8.00	30.00
17	2.13 (0.84)	31	7/8	8.50	30.00
18	2.26 (0.89)	32	7/8	9.00	30.00
19	2.39 (0.94)	34	1	9.50	30.00
20	2.49 (0.98)	35	1	10.00	30.00
21	2.62 (1.03)	37	1	10.50	30.00
22	2.74(1.08)	38	1 1/8	11.00	30.00
23	2.87 (1.13)	40	1 1/8	11.50	30.00
24	3.00 (1.18)	41	1 1/8	12.00	30.00
25	3.12 (1.23)	43	1 1/4	12.50	30.00
26	3.25 (1.28)	44	1 1/4	13.00	30.00
27	3.38 (1.33)	46	1 3/8	13.50	30.00
28	3.51(1.38)	47	1 3/8	14.00	30.00
29	3.63 (1.43)	49	1 3/8	14.50	30.00
30	3.76 (1.48)	50	1 1/2	15.00	30.00
31	3.89 (1.53)	52	1 1/2	15.50	30.00
32	3.99 (1.57)	53	1 1/2	16.00	30.00
33	4.11 (1.62)	55	1 5/8	16.50	30.00
34	4.24 (1.67)	56	1 5/8	17.00	30.00
35	4.37 (1.72)	58	1 3/4	17.50	30.00

- Columna 1: El diámetro de la dovela , es de 1/8 del espesor de la losa, en pulgadas
- Columna 2: Largo de dovelas es igual a 12 veces su diámetro más 5 centímetros
- Columna 3: Diámetro de la dovela convertido a Diámetro comercial, en pulgadas
- Columna 4: La profundidad de instalación de la dovela es 1/2 del espesor de la losa, en centímetros
- Columna 5: La separación recomendable entre dovelas, en centímetros

Figura 56. Especificaciones para colocación de dovelas. Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (2002).

**Tabla 7-35**  
**Resumen de especificaciones para colocación de juntas**

Espesor de losa (cm)	1	2	3	4
	Espaciamiento entre juntas (cm)	Profundidad de corte de juntas (cm)	Profundidad del material de sellado (cm)	Ancho del corte para la junta (cm)
15	360	5.00	1.00	0.50
16	384	5.33	1.07	0.53
17	408	5.67	1.13	0.57
18	432	6.00	1.20	0.60
19	456	6.33	1.27	0.63
20	480	6.67	1.33	0.67
21	504	7.00	1.40	0.70
22	528	7.33	1.47	0.73
23	552	7.67	1.53	0.77
24	576	8.00	1.60	0.80
25	600	8.33	1.67	0.83
26	624	8.67	1.73	0.87
27	648	9.00	1.80	0.90
28	672	9.33	1.87	0.93
29	696	9.67	1.93	0.97
30	720	10.00	2.00	1.00
31	744	10.33	2.07	1.03
32	768	10.67	2.13	1.07
33	792	11.00	2.20	1.10
34	816	11.33	2.27	1.13
35	840	11.67	2.33	1.17

- Columna 1: El espaciamiento entre juntas, es 24 veces el espesor de la losa, en centímetros
- Columna 2: La profundidad del corte de la junta, es 1/3 del espesor de la losa, en centímetros.
- Columna 3: La profundidad del material de sellado, es 1/5 de la profundidad de la junta, en centímetros
- Columna 4: Al ancho del corte de la junta es 1/10 de la profundidad de la junta, en centímetros

**Figura 57.** Especificaciones para dimensiones de juntas. Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (2002).

**TABLE 4.1 Yield Strength and Allowable Stress for Steel**

Type and grade of steel	Yield strength (psi)	Allowable stress (psi)
Billet steel, intermediate grade	40,000	27,000
Rail steel or hard grade of billet steel	50,000	33,000
Rail steel, special grade	60,000	40,000
Billet steel, 60,000 psi minimum yield	60,000	40,000
Cold drawn wire (smooth)	65,000	43,000
Cold drawn wire (deformed)	70,000	46,000

Note. 1 psi = 6.9 kPa.

**Figura 58.** Esfuerzos de fluencia y admisible del acero. Fuente: Huang, Y. (2004).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS VARILLA CORRUGADA				
N° Varilla	Diámetro Nominal		Peso kg/m	Área cm <sup>2</sup>
	mm	in		
3	9,52	3/8	0,560	0,71
4	12,70	1/2	0,994	1,29
5	15,88	5/8	1,552	2,00
6	19,05	3/4	2,235	2,84
7	22,22	7/8	3,042	3,87
8	25,40	1	3,973	5,10
9	28,65	1 1/8	5,060	6,45
10	32,26	1 1/4	6,404	8,19
11	35,81	1 3/8	7,907	10,06

**Tabla 62.** Especificaciones de la varilla corrugada. Fuente: ArcelorMittal (2013).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS VARILLA LISA				
N° Varilla	Diámetro Nominal		Peso kg/m	Área cm <sup>2</sup>
	mm	in		
3	9,50	3/8	0,557	0,71
4	12,70	1/2	0,994	1,27
5	15,88	5/8	1,554	1,98
6	19,05	3/4	2,237	2,85
8	25,40	1	3,978	5,07
10	31,80	1 1/4	6,225	7,94

**Tabla 63.** Especificaciones de la varilla lisa. Fuente: ArcelorMittal (2013).

TABLA SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CARGA							
Especificaciones Barras Longitudinales							
Espesor de losa		Diámetro		Longitud		Separación	
cm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13,0 - 14,0	5,0 - 6,0	12,7	1/2	64,0	25,0	76,0	30,0
15,0 - 18,0	6,0 - 8,0	12,7	1/2	71,0	28,0	76,0	30,0
19,0 - 22,0	8,0 - 12,0	12,7	1/2	79,0	31,0	76,0	30,0
23,0 - 25,4	12,0 - 17,0	15,9	5/8	81,0	32,0	91,0	36,0
25,5 - 30,0	17,0 - 20,0	15,9	5/8	91,0	36,0	91,0	36,0
Especificaciones Barras Pasajuntas							
Espesor de losa		Diámetro		Longitud		Separación	
cm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13,0 - 15,0	5,0 - 6,0	19,0	3/4	41,0	16,0	30,0	12,0
16,0 - 20,0	6,0 - 8,0	25,0	1	46,0	18,0	30,0	12,0
21,0 - 30,0	8,0 - 12,0	32,0	1 1/4	46,0	18,0	30,0	12,0
31,0 - 43,0	12,0 - 17,0	38,0	1 1/2	51,0	20,0	38,0	15,0
44,0 - 50,0	17,0 - 20,0	45,0	1 3/4	56,0	22,0	46,0	18,0

**Tabla 64.** Especificaciones para las dovelas y las barras de amarre longitudinal. Fuente: CEMEX Concretos (2010).

# Apéndice 12.

Memoria de cálculo para las dovelas (barras pasajuntas).

DISEÑO DE DOVELAS			
<b>Glosario</b>			
<b>L:</b> rigidez relativa		<b>Pdi:</b> carga en dovela	
<b>Ec:</b> módulo elasticidad del concreto		<b>Ea:</b> módulo de rigidez del acero	
<b>μ:</b> coeficiente de Poisson		<b>I:</b> momento de inercia de dovela	
<b>h:</b> espesor de losa		<b>D:</b> diámetro de dovela	
<b>k:</b> módulo de reacción de subrasante (pci)		<b>z:</b> ancho de la junta	
<b>ob:</b> esfuerzo aplicado para dovela crítica		<b>f'c:</b> resistencia a la compresión concreto	
<b>Kd:</b> módulo interacción dovela-concreto (pci)		<b>fb:</b> esfuerzo de falla en dovela	
Pavimento nuevo (pci)	300000	<b>s:</b> espaciamiento de dovelas	
Pavimento viejo (pci)	1500000	<b>Le:</b> Longitud influencia sobre dovelas = 1,8 L	
Valor típico (pci)	700000		
Datos Generales Pavimento		Características de dovela	
<b>Ec (psi)</b>	4800397,00	<b>P (lb)</b>	4500,00
<b>h (in)</b>	10,44	<b>Kd (pci)</b>	1500000,00 (más crítico)
<b>μ</b>	0,15	<b>d (in)</b>	1,25
<b>k (pci)</b>	300,00	<b>z (in)</b>	0,34
<b>f'c (psi)</b>	5470,00	<b>s (in)</b>	12,00
<b>Ea (psi)</b>	29869020,94		
Rigidez Relativa		Inercia de la dovela	
$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}$	<b>L (in)</b>	$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$	<b>I (in<sup>4</sup>)</b>
	35,30		0,12
<b>Longitud de influencia sobre dovelas (1,8L)</b>	<b>Le (in)</b>		
	63,53		

Continúa en página siguiente.

Factores de capacidad por dovela																				
	Dovelas involucradas: 5,29																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dovela</th> <th>Factor de capacidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1,00</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,81</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,62</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,43</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,24</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,06</td></tr> <tr><td>7</td><td>-</td></tr> <tr><td><math>\Sigma x_i</math></td><td>3,17</td></tr> </tbody> </table>	Dovela	Factor de capacidad	1	1,00	2	0,81	3	0,62	4	0,43	5	0,24	6	0,06	7	-	$\Sigma x_i$	3,17	
Dovela	Factor de capacidad																			
1	1,00																			
2	0,81																			
3	0,62																			
4	0,43																			
5	0,24																			
6	0,06																			
7	-																			
$\Sigma x_i$	3,17																			
$P_t = P / \Sigma x_i$	Pt (lb)	1420,94																		
Esfuerzo aplicado para dovela crítica		Esfuerzo de falla en la dovela																		
$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_d \times d}{4EI}}$	$\beta$ (in)	0,60																		
$\sigma_b = \frac{K_d \times P d_i}{4 \times \beta^3 \times EI} \times [2 + \beta \times z]$	$\sigma$ (psi)	906,85																		
		$f_b = \left[ \frac{4-d}{3} \right] \times f'_c$	fb (psi) 5014,17																	
		$\sigma_b \leq f_b$	Por lo tanto Cumple																	

Tabla 65. Memoria de cálculo para diseño de dovelas. Fuente: Elaboración propia (2016).

# Apéndice 13.

Memoria de cálculo para las barras de amarre longitudinal.

DISEÑO DE BARRAS LONGITUDINALES					
Glosario		Dimensiones y pesos de barras de refuerzo			
<b>As:</b> área de acero transversal		N°	Peso (lb/ft)	Diámetro (in)	Área trans. (in <sup>2</sup> )
<b>γ<sub>c</sub>:</b> peso unitario concreto hidráulico		3	0,376	0,375	0,11
<b>h:</b> espesor de losa		4	0,668	0,5	0,2
<b>L':</b> distancia mínima de junta al borde libre		5	1,043	0,625	0,31
<b>fa:</b> factor de fricción losa/capa soporte		6	1,502	0,75	0,44
<b>fs:</b> esfuerzo de acero permisible		7	2,044	0,875	0,6
<b>t:</b> longitud de barra (se le agrega 3 in por seguridad)		8	2,67	1	0,79
<b>d:</b> diámetro de barra		9	3,4	1,128	1
<b>μ:</b> resistencia de adherencia (valor típico 350 psi)		10	4,303	1,27	1,27
		11	5,313	1,41	1,56
Datos Generales Pavimento		Características de barra de transferencia			
<b>γ<sub>c</sub> (lb/in<sup>3</sup>)</b>	0,0867	<b>fs (psi)</b>	33000		
<b>h (in)</b>	10,44	<b>μ (psi)</b>	350		
<b>L' (in)</b>	144	<b>d (in)</b>	0,5		
<b>fa</b>	1,8				
Acero requerido por ft lineal		Escogencia de barra			
$A_s = \frac{\gamma_c \times h \times L' \times f_a}{f_s}$	<b>As (in<sup>2</sup>/in)</b>	0,0071	<b>Barra N°</b>	4	
	<b>As (in<sup>2</sup>/ft)</b>	0,0853	<b>Diámetro (in)</b>	0,5	
	<b>Acero:</b>	<i>Cumple</i>	<b>Área (in<sup>2</sup>)</b>	0,2	
Longitud de barras		Espaciamiento de barras			
$t = \frac{1}{2} \left[ \frac{f_s * d}{\mu} \right]$	<b>t (in)</b>	26,57	<b>s (in)</b>	28,13	
	<b>t (cm)</b>	67,49	<b>s (cm)</b>	71,45	

Tabla 66. Memoria de cálculo para diseño de barras longitudinales. Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

## Apéndice 14.

Cálculo del sello elastomérico y del badroad para las juntas.

PARA LAS JUNTAS			
Características del elastomérico		Cantidad de sello para las juntas	
Tipo de sello	Isoflex 880	Ancho de junta (cm)	0,87
Volumen de producto (gal)	1,75	Profundidad de sello (cm)	1,73
Volumen de producto (lt)	6,62	Ancho de junta (m)	0,0087
Precio de lista/gal	\$ 75,00	Profundidad de sello (m)	0,0173
Precio de lista/lt	\$ 11,32	Longitud de juntas (m)	386.063,46
Precio de lista/lt	₡ 6.175,85		
Cantidades totales de sello		Cantidades del Bad-Road	
Volumen de sello requerido (m3)	58,11	Rollo (m/ud)	607,50
Volumen de sello requerido (lt)	58.106,41	Precio de lista/ud	\$ 53,21
% Desperdicio	5%	Precio de lista/m	\$ 0,09
Volumen sello + desperdicio (lt)	61.011,73	Precio de lista/m	₡ 47,78
Costo total	₡ 376.799.426,89	Longitud de juntas (m)	386.063,46
		% Desperdicio	5%
		Longitud con desperdicio (m)	405.366,63
		Costo total	₡ 19.367.865,90

Tabla 67. Estimación de cantidades del sello elastomérico y badroad. Fuente: Elaboración propia (2016).

## Apéndice 15.

Cantidades estimadas de acero por utilizar.

CANTIDADES A ESTIMAR			
<b>Dimensiones de carretera</b>			
Longitud (m)			50610,00
Ancho (m)			14,60
Espaldón (m)			1,80
<b>Dimensiones de losas</b>			
Largo (m)			6,24
Ancho (m)			4,15
<b>Dimensiones de juntas</b>			
Ancho (m)			0,0083
Separación de juntas (m)			6,24
Longitud transversal de juntas (m)			16,40
<b>Dimensiones de dovelas</b>		<b>Dimensiones de barras</b>	
Diámetro (m)	0,0318	Diámetro (m)	0,0127
Longitud (m)	0,4500	Longitud (m)	0,6749
Separación (m)	0,3048	Separación (m)	0,7145
<b>Estimaciones</b>		<b>Estimaciones</b>	
Dovelas totales	436395,87	Barras totales	354146,77
Longitud total (m)	196378,14	Longitud total (m)	239018,71
Peso acero (kg/m)	6,23	Peso acero (kg/m)	0,99
Peso total (ton)	1222,45	Peso total (ton)	237,58
<b>Costos de acero</b>		<b>Costos de acero</b>	
Varilla N°	10	Varilla N°	4
Longitud (m)	6	Longitud (m)	9
Precio	₡ 15.792,00	Precio	₡ 4.092,00
Dovelas por varilla	13,33	Barras por varilla	13,34
Dovelas por varilla	13	Barras por varilla	13
Cantidad de varillas	33569	Cantidad de varillas	27242
Desperdicio (%)	5%	Desperdicio (%)	5%
Cantidad de varillas + desperdicio	35247	Cantidad de varillas + desperdicio	28604
Costo total	₡ 556.626.290,59	Costo total	₡ 117.048.231,06
<b>Costos de la canastilla</b>			
Total de juntas transversales (m)			133013,46
Total de juntas longitudinales (m)			253050,00
Desperdicio (%)			5%
Total de juntas + desperdicio			405366,63
Costos de la canastilla/m		₡	4.000,00
Costos totales		₡	1.621.466.538,46

**Tabla 68.** Cálculo de las cantidades de acero por estimar. Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

## Apéndice 16.

Desglose de los costos totales del pavimento de concreto hidráulico por actividad.

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 201.01	Limpieza y desmonte	ha	75,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Tractor de orugas D6T	1,00	-	ha/día	750,00	₡ 38.220,00	₡ 28.665.000,00																					
Excavadora de orugas 322	1,00	-	ha/día	750,00	₡ 38.220,00	₡ 28.665.000,00																					
Vagoneta tandem A	4,00	-	ha/día	2949,07	₡ 17.472,00	₡ 51.526.151,04																					
Canon escombrera	1,00	-	ha/día	97500,00	₡ 600,00	₡ 58.500.000,00																					
					<b>Subtotal</b>	<b>₡ 167.356.151,04</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operario	2,00	-	hr	1500,00	₡ 1.075,48	₡ 1.613.221,50																					
Chofer	1,00	-	hr	2949,07	₡ 1.268,50	₡ 3.740.901,19																					
Peón	2,00	-	hr	1500,00	₡ 971,14	₡ 1.456.704,00																					
					<b>Subtotal</b>	<b>₡ 6.810.826,69</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
				₡ -																							
					<b>Subtotal</b>	<b>₡ -</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 174.166.977,73</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 2.322.226,37</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 116.111,32</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 116.111,32</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 232.222,64</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 2.786.671,64</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 174.166.977,73	Subtotal precio unitario		₡ 2.322.226,37	Imprevistos	5,00%	₡ 116.111,32	Administración	5,00%	₡ 116.111,32	Utilidad	10,00%	₡ 232.222,64	Precio unitario		₡ 2.786.671,64
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 174.166.977,73																									
Subtotal precio unitario		₡ 2.322.226,37																									
Imprevistos	5,00%	₡ 116.111,32																									
Administración	5,00%	₡ 116.111,32																									
Utilidad	10,00%	₡ 232.222,64																									
Precio unitario		₡ 2.786.671,64																									

**Tabla 69.** Actividad de limpieza y desmonte (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 203.01	Remoción (estructuras y obstrucciones)	unid.	50,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Excavadora de oruga 322	1,00	-	m3/día	100,00	₡ 38.220,00	₡ 3.822.000,00
Martillo hidráulico	1,00	-	-	100,00	₡ 13.977,60	₡ 1.397.760,00
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	146,65	₡ 17.472,00	₡ 2.562.268,80
Tractor de orugas	0,25	-	-	25,00	₡ 38.220,00	₡ 955.500,00
Canon escombrera	1,00	-	m3	650,00	₡ 600,00	₡ 390.000,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 9.127.528,80</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operario	2,00	-	hr	200,00	₡ 1.075,48	₡ 215.096,20
Chofer	1,00	-	hr	146,65	₡ 1.268,50	₡ 186.025,82
Capataz		-	hr	100,00	₡ 1.268,50	₡ 126.850,20
Peón	3,00	-	hr	300,00	₡ 971,14	₡ 291.340,80
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 819.313,02</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
				₡ -		
<b>Subtotal</b>						<b>₡ -</b>
RESUMEN DE COSTOS						
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 9.946.841,82				
Subtotal precio unitario		₡ 198.936,84				
Imprevistos	5,00%	₡ 9.946,84				
Administración	5,00%	₡ 9.946,84				
Utilidad	10,00%	₡ 19.893,68				
Precio unitario		₡ 238.724,20				

**Tabla 70.** Actividad de remoción de estructuras y obstrucciones (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 203.02	Remoción (tuberías)	m	1500,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Excavadora de orugas 322	1,00	-	m3/día	416,44	₡ 38.220,00	₡ 15.916.336,80																					
Vagoneta convencional	1,00	-	-	342,53	₡ 17.472,00	₡ 5.984.684,16																					
Vagoneta convencional	1,00	-	-	1271,30	₡ 17.472,00	₡ 22.212.153,60																					
Compactador manual	10,00	-	-	4164,38	₡ 3.412,50	₡ 14.210.946,75																					
Cabezal	1,00	-	-	238,93	₡ 15.000,00	₡ 3.583.950,00																					
Carreta plana	1,00	-	-	238,93	₡ 5.000,00	₡ 1.194.650,00																					
Back hoe 416E	2,00	-	-	238,93	₡ 17.472,00	₡ 4.174.584,96																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 67.277.306,27</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	3,00	-	hr	1249,31	₡ 1.075,48	₡ 1.343.609,17																					
Chofer	1,00	-	hr	1852,76	₡ 1.268,50	₡ 2.350.229,77																					
Peón	12,00	-	hr	4997,26	₡ 971,14	₡ 4.853.019,09																					
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 8.546.858,02</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Agregados para relleno	7166,25	m3	₡ 8.500,00	₡ 60.913.125,00																							
<b>Subtotal</b>				<b>₡ 60.913.125,00</b>																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 136.737.289,29</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 91.158,19</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 4.557,91</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 4.557,91</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 9.115,82</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 109.389,83</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 136.737.289,29	Subtotal precio unitario		₡ 91.158,19	Imprevistos	5,00%	₡ 4.557,91	Administración	5,00%	₡ 4.557,91	Utilidad	10,00%	₡ 9.115,82	Precio unitario		₡ 109.389,83
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₡ 136.737.289,29																									
Subtotal precio unitario		₡ 91.158,19																									
Imprevistos	5,00%	₡ 4.557,91																									
Administración	5,00%	₡ 4.557,91																									
Utilidad	10,00%	₡ 9.115,82																									
Precio unitario		₡ 109.389,83																									

**Tabla 71.** Actividad de remoción de tuberías (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD							
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad				
CR 204.05 (a)	Excavación de préstamo seleccionado para acabado (caso 2)	m3	800000,00				
MAQUINARIA							
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total	
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	60295,21	₡ 17.472,00	₡ 1.053.477.909,12	
Motoniveladora 140 H	1,00	-	m3/día	10400,00	₡ 43.680,00	₡ 454.272.000,00	
Compactadora CS533	1,00	-	-	10400,00	₡ 35.490,00	₡ 369.096.000,00	
Tanque de agua	2,00	-	-	20800,00	₡ 6.000,00	₡ 124.800.000,00	
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 2.001.645.909,12</b>	
MANO DE OBRA							
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total	
Chofer	1,00	-	hr	81095,21	₡ 1.268,50	₡ 102.869.436,08	
Operador de equipo	2,00	-	hr	20800,00	₡ 1.075,48	₡ 22.370.004,80	
Peón	3,00	-	hr	31200,00	₡ 971,14	₡ 30.299.443,20	
Capataz	1,00	-	hr	10400,00	₡ 1.268,50	₡ 13.192.420,80	
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 168.731.304,88</b>	
MATERIALES							
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total			
Agregado préstamo para acabado caso 2	1040000,00	m3	₡ 8.500,00	₡ 8.840.000.000,00			
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 8.840.000.000,00</b>	
Rubro	Porcentaje	Monto					
Subtotal		₡ 11.010.377.214,00					
Subtotal precio unitario		₡ 13.762,97					
Imprevistos	5,00%	₡ 688,15					
Administración	5,00%	₡ 688,15					
Utilidad	10,00%	₡ 1.376,30					
Precio unitario		₡ 16.515,57					

**Tabla 72.** Actividad excavación de préstamo seleccionado para acabado (caso 2) (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)																												
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																												
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																									
CR 301.06	Sub base de agregados, graduación B	m3	140000,00																									
MAQUINARIA																												
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	40925,93	₡ 17.472,00	₡ 715.057.848,96																						
Motoniveladora 140 H	1,00	-	m3/día	2275,00	₡ 43.680,00	₡ 99.372.000,00																						
Compactadora CS533	1,00	-	-	2275,00	₡ 35.490,00	₡ 80.739.750,00																						
Tanque de agua	1,00	-	-	2275,00	₡ 6.000,00	₡ 13.650.000,00																						
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 908.819.598,96</b>																						
MANO DE OBRA																												
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Operador de equipo	3,00	-	hr	4550,00	₡ 1.075,48	₡ 4.893.438,55																						
Chofer	1,00	-	hr	43200,00	₡ 1.268,50	₡ 54.799.286,40																						
Peón	3,00	-	hr	6825,00	₡ 971,14	₡ 6.628.003,20																						
Capataz	1,00	-	hr	2275,00	₡ 1.268,50	₡ 2.885.842,05																						
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 69.206.570,20</b>																						
MATERIALES																												
Descripción		Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Agregado para sub-base		182000,00	m3	₡ 11.250,00	₡ 2.047.500.000,00																							
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 2.047.500.000,00</b>																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 3.025.526.169,16</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 21.610,90</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 1.080,55</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 1.080,55</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 2.161,09</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 25.933,08</td> </tr> </tbody> </table>								Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 3.025.526.169,16	Subtotal precio unitario		₡ 21.610,90	Imprevistos	5,00%	₡ 1.080,55	Administración	5,00%	₡ 1.080,55	Utilidad	10,00%	₡ 2.161,09	Precio unitario		₡ 25.933,08
Rubro	Porcentaje	Monto																										
Subtotal		₡ 3.025.526.169,16																										
Subtotal precio unitario		₡ 21.610,90																										
Imprevistos	5,00%	₡ 1.080,55																										
Administración	5,00%	₡ 1.080,55																										
Utilidad	10,00%	₡ 2.161,09																										
Precio unitario		₡ 25.933,08																										

**Tabla 73.** Actividad de sub-base de agregados, graduación B (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 209.01 (a)	Excavación (para estructuras)	m3	35000,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Excavadora de orugas 322	1,00	-	m3/día	1400,00	₡ 38.220,00	₡ 53.508.000,00
Vagoneta convencional	1,00	-	-	1966,05	₡ 17.472,00	₡ 34.350.825,60
Tractor de orugas D6R	1,00	-	-	1400,00	₡ 38.220,00	₡ 53.508.000,00
Tanque de agua	1,00	-	-	1400,00	₡ 6.000,00	₡ 8.400.000,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 149.766.825,60</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	2,00	-	hr	2800,00	₡ 1.075,48	₡ 3.011.346,80
Chofer	1,00	-	hr	1966,05	₡ 1.268,50	₡ 2.493.938,36
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 5.505.285,16</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Canon escombrera	45500,00	m3	₡ 600,00	₡ 27.300.000,00		
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 27.300.000,00</b>
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₡ 182.572.110,76				
Subtotal precio unitario		₡ 5.216,35				
Imprevistos	5,00%	₡ 260,82				
Administración	5,00%	₡ 260,82				
Utilidad	10,00%	₡ 521,63				
Precio unitario		₡ 6.259,62				

**Tabla 74.** Actividad de excavación para estructuras (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																												
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																									
CR 414.01	Agregados para base mejorada	m3	10000,00																									
MAQUINARIA																												
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Vagoneta tandem	1,00	-	-	1211,90	₡ 17.472,00	₡ 21.174.316,80																						
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 21.174.316,80</b>																						
MANO DE OBRA																												
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Chofer	-	-	hr	1211,90	₡ 1.268,50	₡ 1.537.297,57																						
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 1.537.297,57</b>																						
MATERIALES																												
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																								
Agregados para base estabilizada	13000,00	m3	₡ 12.250,00	₡ 159.250.000,00																								
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 159.250.000,00</b>																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 181.961.614,37</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 18.196,16</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 909,81</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 909,81</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 1.819,62</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 21.835,39</td> </tr> </tbody> </table>								Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 181.961.614,37	Subtotal precio unitario		₡ 18.196,16	Imprevistos	5,00%	₡ 909,81	Administración	5,00%	₡ 909,81	Utilidad	10,00%	₡ 1.819,62	Precio unitario		₡ 21.835,39
Rubro	Porcentaje	Monto																										
Subtotal		₡ 181.961.614,37																										
Subtotal precio unitario		₡ 18.196,16																										
Imprevistos	5,00%	₡ 909,81																										
Administración	5,00%	₡ 909,81																										
Utilidad	10,00%	₡ 1.819,62																										
Precio unitario		₡ 21.835,39																										

**Tabla 75.** Actividad de agregados para base mejorada (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

**INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD**

Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad
CR 413.02	Base mejorada con cemento (recuperación de pavimento existente de 20 cm de espesor)	m2	320000,00

**MAQUINARIA**

Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Recuperadora	1,00	-	m2/día	1697,96	₡ 60.000,00	₡ 101.877.600,00
Motoniveladora 140 H	1,00	-	-	1697,96	₡ 43.680,00	₡ 74.166.892,80
Compactadora CS533	1,00	-	-	1697,96	₡ 35.490,00	₡ 60.260.600,40
Tanque de agua	2,00	-	-	3395,92	₡ 6.000,00	₡ 20.375.520,00
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 256.680.613,20</b>

**MANO DE OBRA**

Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	2,00	-	hr	3395,92	₡ 1.075,48	₡ 3.652.247,44
Operador de equipo	-	-	hr	1697,96	₡ 1.075,48	₡ 1.826.123,72
Peón	12,00	-	hr	20375,51	₡ 971,14	₡ 19.787.391,28
Chofer	-	-	hr	3395,92	₡ 1.268,50	₡ 4.307.731,31
<b>Subtotal</b>						<b>₡ 29.573.493,75</b>

**MATERIALES**

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total
				₡ -
<b>Subtotal</b>				<b>₡ -</b>

Rubro	Porcentaje	Monto
Subtotal		₡ 286.254.106,95
Subtotal precio unitario		₡ 894,54
Imprevistos	5,00%	₡ 44,73
Administración	5,00%	₡ 44,73
Utilidad	10,00%	₡ 89,45
Precio unitario		₡ 1.073,45

**Tabla 76.** Actividad de base mejorada con cemento para recuperación (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)																												
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																												
Rubro	Actividad					Unidad	Cantidad																					
CR 303.04 (a)	Cemento para base mejorada					ton	11200,00																					
MAQUINARIA																												
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Cabezal	1,00	-	-	3775,03	₡ 15.000,00	₡	56.625.450,00																					
Carreta plana	1,00	-	-	3775,03	₡ 5.000,00	₡	18.875.150,00																					
						<b>Subtotal</b>	<b>₡ 75.500.600,00</b>																					
MANO DE OBRA																												
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Chofer	-	-	hr	3775,03	₡ 1.268,50	₡	4.788.633,11																					
						<b>Subtotal</b>	<b>₡ 4.788.633,11</b>																					
MATERIALES																												
Descripción			Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																						
Cemento			224000,00	sacos	₡ 6.115,00	₡	1.369.760.000,00																					
						<b>Subtotal</b>	<b>₡ 1.369.760.000,00</b>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₡ 1.450.049.233,11</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 129.468,68</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 6.473,43</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₡ 6.473,43</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₡ 12.946,87</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₡ 155.362,42</td> </tr> </tbody> </table>								Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₡ 1.450.049.233,11	Subtotal precio unitario		₡ 129.468,68	Imprevistos	5,00%	₡ 6.473,43	Administración	5,00%	₡ 6.473,43	Utilidad	10,00%	₡ 12.946,87	Precio unitario		₡ 155.362,42
Rubro	Porcentaje	Monto																										
Subtotal		₡ 1.450.049.233,11																										
Subtotal precio unitario		₡ 129.468,68																										
Imprevistos	5,00%	₡ 6.473,43																										
Administración	5,00%	₡ 6.473,43																										
Utilidad	10,00%	₡ 12.946,87																										
Precio unitario		₡ 155.362,42																										

**Tabla 77.** Cemento para base mejorada (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 413.03	Material de secado	m3	600,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Distribuidor de agregados	0,50	-	m3/día	75,00	₺ 10.920,00	₺ 819.000,00
Vagoneta convencional	1,00	-	-	113,45	₺ 17.472,00	₺ 1.982.198,40
Back hoe 416 E	0,50	-	-	75,00	₺ 17.472,00	₺ 1.310.400,00
Compactadora CB534	0,50	-	-	75,00	₺ 3.276,00	₺ 245.700,00
Tanque de agua	0,50	-	-	75,00	₺ 6.000,00	₺ 450.000,00
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 4.807.298,40</b>
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	2,00	-	hr	150,00	₺ 1.075,48	₺ 161.322,15
Chofer	1,00	-	hr	263,45	₺ 1.268,50	₺ 334.186,85
Peón	2,00	-	hr	75,00	₺ 971,14	₺ 72.835,20
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 568.344,20</b>
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Agregados	600,00	m3	₺ 8.500,00	₺ 5.100.000,00		
<b>Subtotal</b>				<b>₺ 5.100.000,00</b>		
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		₺ 10.475.642,60				
Subtotal precio unitario		₺ 17.459,40				
Imprevistos	5,00%	₺ 872,97				
Administración	5,00%	₺ 872,97				
Utilidad	10,00%	₺ 1.745,94				
Precio unitario		₺ 20.951,29				

**Tabla 78.** Material de secado (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 302.01 (a)	Base estabilizada con cemento Portland tipo BE-35, 20 cm espesor	m2	1000000,00																								
	Dosificación del cemento	% por peso	6,00%																								
	Peso específico	ton/m3	2,30																								
	Espesor	m	0,20																								
	Agregados	m3	200000,00																								
	Cemento	sacos	552000,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Recuperadora	1,00	-	m2/día	4775,90	₺ 60.000,00	₺ 286.554.000,00																					
Motoniveladora 140 H	2,00	-	m3/día	9551,80	₺ 43.680,00	₺ 417.222.624,00																					
Compactadora CS533	2,00	-	-	9551,80	₺ 35.490,00	₺ 338.993.382,00																					
Tanque de agua	2,00	-	-	9551,80	₺ 6.000,00	₺ 57.310.800,00																					
Vagoneta tandem A	1,00	-	-	28264,90	₺ 17.472,00	₺ 493.844.332,80																					
Cabezal	1,00	-	-	9214,29	₺ 15.000,00	₺ 138.214.350,00																					
Carreta plana	1,00	-	-	9214,29	₺ 5.000,00	₺ 46.071.450,00																					
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 1.778.210.938,80</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	2,00	-	hr	14327,70	₺ 1.075,48	₺ 15.409.169,12																					
Operador de equipo	-	-	hr	9551,80	₺ 1.075,48	₺ 10.272.779,42																					
Peón	4,00	-	hr	38207,20	₺ 971,14	₺ 37.104.387,38																					
Chofer	-	-	hr	47030,98	₺ 1.268,50	₺ 59.658.892,19																					
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 122.445.228,11</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Cemento más desperdicio	579600,00	sacos	₺ 6.115,00	₺ 3.544.254.000,00																							
Agregados para base estabilizada más desperdicio	260000,00	m3	₺ 12.250,00	₺ 3.185.000.000,00																							
<b>Subtotal</b>						<b>₺ 6.729.254.000,00</b>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₺ 8.629.910.166,91</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 8.629,91</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 431,50</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 431,50</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₺ 862,99</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 10.355,89</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₺ 8.629.910.166,91	Subtotal precio unitario		₺ 8.629,91	Imprevistos	5,00%	₺ 431,50	Administración	5,00%	₺ 431,50	Utilidad	10,00%	₺ 862,99	Precio unitario		₺ 10.355,89
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₺ 8.629.910.166,91																									
Subtotal precio unitario		₺ 8.629,91																									
Imprevistos	5,00%	₺ 431,50																									
Administración	5,00%	₺ 431,50																									
Utilidad	10,00%	₺ 862,99																									
Precio unitario		₺ 10.355,89																									

**Tabla 79.** Actividad de base estabilizada con cemento para ampliación (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

**PROYECTO:** AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA  
**PROPUESTA TÉCNICA:** PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo de 25 cm de espesor compactado y módulo de ruptura de 50 kg/cm <sup>2</sup> para superficie de ruedo.	m <sup>2</sup>	830000,00																								
	Espesor de la losa	m	0,2652																								
	Volumen de concreto	m <sup>3</sup>	220096,08																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Máquina colocadora de concreto	1,00	-	m <sup>3</sup> /día	9431,82	₺ 160.000,00	₺ 1.509.091.200,00																					
Máquina para terminado	1,00	-	-	9431,82	₺ 4.363,92	₺ 41.159.707,93																					
Máquina para texturizado (Gomaco TC-400)	1,00	-	-	9431,82	₺ 5.454,90	₺ 51.449.634,92																					
Máquina de corte de concreto	3,00	-	-	28295,45	₺ 3.408,40	₺ 96.442.211,78																					
Máquina colocadora de elastomérico	3,00	-	-	32495,45	₺ -	₺ -																					
<b>Subtotal</b>					₺	<b>1.698.142.754,63</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	7,00	-	hr	66022,73	₺ 1.075,48	₺ 71.006.191,68																					
Capataz	1,00	-	hr	9431,82	₺ 1.268,50	₺ 11.964.282,53																					
Doblaje y colocación de acero /kg	1,00	-	kg	2070222,30	₺ 500,00	₺ 1.035.111.147,50																					
Peón	7,00	-	hr	66022,73	₺ 971,14	₺ 64.117.049,92																					
<b>Subtotal</b>					₺	<b>1.182.198.671,64</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Suministro de concreto	231100,88	m <sup>3</sup>	₺ 90.000,00	₺ 20.799.079.200,00																							
Acero Varilla N° 10	35247	ud	₺ 15.792,00	₺ 556.620.624,00																							
Acero Varilla N°4	28604	ud	₺ 4.092,00	₺ 117.047.568,00																							
Canastillas	405366,63	m	₺ 4.000,00	₺ 1.621.466.520,00																							
Bad-Road para juntas	405366,63	m	₺ 47,78	₺ 19.368.417,58																							
Elastomérico Isoflex 880	61011,73	lt	₺ 6.175,85	₺ 376.799.292,72																							
<b>Subtotal</b>					₺	<b>23.490.381.622,30</b>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₺ 26.370.723.048,57</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 31.771,96</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 1.588,60</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 1.588,60</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₺ 3.177,20</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 38.126,35</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₺ 26.370.723.048,57	Subtotal precio unitario		₺ 31.771,96	Imprevistos	5,00%	₺ 1.588,60	Administración	5,00%	₺ 1.588,60	Utilidad	10,00%	₺ 3.177,20	Precio unitario		₺ 38.126,35
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₺ 26.370.723.048,57																									
Subtotal precio unitario		₺ 31.771,96																									
Imprevistos	5,00%	₺ 1.588,60																									
Administración	5,00%	₺ 1.588,60																									
Utilidad	10,00%	₺ 3.177,20																									
Precio unitario		₺ 38.126,35																									

**Tabla 80.** Actividad de pavimento de concreto hidráulico para superficie de ruedo (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

<b>PROYECTO:</b> AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA <b>PROPUESTA TÉCNICA:</b> PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO HIDRÁULICO (20 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo de 25 cm de espesor variable para espaldones, cuña de 25 a 17 cm y módulo de ruptura de 50 kg/cm2.	m2	170000,00																								
	Espesor de la losa	m	0,2300																								
	Volumen de concreto	m3	39100,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Máquina colocadora de concreto	1,00	-	m3/día	1400,00	₺ 160.000,00	₺ 224.000.000,00																					
Máquina para terminado	1,00	-	-	1400,00	₺ 4.363,92	₺ 6.109.488,00																					
Máquina para texturizado	1,00	-	-	1400,00	₺ 5.454,90	₺ 7.636.860,00																					
Máquina de corte de concreto	3,00	-	-	4200,00	₺ 3.408,40	₺ 14.315.280,00																					
					<b>Subtotal</b>	<b>₺ 252.061.628,00</b>																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	7,00	-	hr	9800,00	₺ 1.075,48	₺ 10.539.713,80																					
Capataz	1,00	-	hr	1400,00	₺ 1.268,50	₺ 1.775.902,80																					
Peón	7,00	-	hr	9800,00	₺ 971,14	₺ 9.517.132,80																					
					<b>Subtotal</b>	<b>₺ 21.832.749,40</b>																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Suministro de concreto	41055,00	m3	₺ 90.000,00	₺ 3.694.950.000,00																							
				<b>Subtotal</b>	<b>₺ 3.694.950.000,00</b>																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>₺ 3.968.844.377,40</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 23.346,14</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 1.167,31</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>₺ 1.167,31</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>₺ 2.334,61</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>₺ 28.015,37</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		₺ 3.968.844.377,40	Subtotal precio unitario		₺ 23.346,14	Imprevistos	5,00%	₺ 1.167,31	Administración	5,00%	₺ 1.167,31	Utilidad	10,00%	₺ 2.334,61	Precio unitario		₺ 28.015,37
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		₺ 3.968.844.377,40																									
Subtotal precio unitario		₺ 23.346,14																									
Imprevistos	5,00%	₺ 1.167,31																									
Administración	5,00%	₺ 1.167,31																									
Utilidad	10,00%	₺ 2.334,61																									
Precio unitario		₺ 28.015,37																									

**Tabla 81.** Actividad de pavimento de concreto hidráulico para espaldones (Pavimento Rígido). Fuente: Elaboración propia (2016).

## Apéndice 17.

Costos de actividades de mantenimiento de pavimentos rígidos y flexibles.

ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS (2014LN-000018-0CV00)			
PRECIOS UNITARIOS DE MANTENIMIENTO PAVIMENTOS AFSFÁLTICOS LINEA 4 LIBERIA 2015			
N°	Unidad	Descripción	Precio unitario
M 403(1)A	km	Diseño de rehabilitaciones y sobrecapas asfálticas	₡ 931.628,00
-	ton	Sobrecapa	₡ 54.057,95
M 41(A2)	ton	Bacheo con mezcla asfáltica en caliente	₡ 61.052,00
M 42(B)	m2	Perfilado de pavimentos	₡ 984,00
M 45(A)	ton	Pavimento bituminoso en caliente	₡ 47.245,00
M 45 E	ton	Pavimento bituminoso en caliente con polímeros	₡ 69.339,00
M 40(A)	unidad	Levantamiento de tapas de pozos	₡ 48.167,00
M 43 C	m	Ruteo y sellado de grietas	₡ 1.977,00
M 47(B)	m2	Tratamiento bituminoso en caliente con polímeros	₡ 3.426,00
CR 301.03	m3	Suministro, colocación y compactación de base granular	₡ 22.502,00
CR 301.06	m3	Suministro, colocación y compactación de sub-base granular, Graduación B	₡ 18.658,00
CR 703.09	m3	Material de secado	₡ 30.775,00
M 30(A)	m2	Reacondicionamiento de calzada	₡ 1.110,00
CR 302.03	ton	Cemento Portland	₡ 186.901,00
MCR 702.03	lt	Emulsión asfáltica para imprimación	₡ 355,00
PRECIOS UNITARIOS DE MANTENIMIENTO PAVIMENTOS DE CONCRETO LINEA 4 LIBERIA 2015			
MDV-01	m2	Perfilado de pavimento para borrado de demarcación horizontal	₡ 14.978,00
CR.502.01	m2	Bacheo del pavimento de concreto	₡ 20.793,00
CR.502.02	m	Sellado de juntas y grietas	₡ 3.714,00
CR.502.03	m3	Lechada	₡ 369.156,00
CR.502.04	und	Orificios para el sello	₡ 10.096,00
CR.502.05	m2	Fresado de la Superficie (diamante)	₡ 934,00
CR.502.06	m2	Quebrado y asiento del pavimento de concreto	₡ 3.996,00
CR.502.07	m2	Fracturación y asiento del Pavimento de Concreto	₡ 3.996,00
CR.502.08	m2	Encasotado y compactado del pavimento de concreto	₡ 14.015,00
CR.503.01	m2	Sobrecapa de concreto hidraulico	₡ 49.491,00
CR.501.01	m2	Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo	₡ 46.994,00
CR.501.02	m2	Material de secado	₡ 47.933,00

**Tabla 82.** Actividades de mantenimiento de pavimentos según CONAVI. Fuente: Consejo Nacional de Vialidad (2015).

Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a las carreteras de tránsito pesado del país.

## Apéndice 18.

Estimación de cantidades para las actividades de mantenimiento de pavimentos.

Para el cálculo de las cantidades de materiales a utilizar para las actividades de mantenimiento de pavimentos, se utilizó un porcentaje de las cantidades totales para la construcción de la

carretera en análisis. Dichos porcentajes para cada actividad considerada se muestran a continuación:

<b>Porcentajes Actividades de Mantenimiento</b>	
<b>Pavimento asfáltico</b>	
Actividad	Porcentaje del área por cubrir
Sobrecapa asfáltica (ton)	100,00%
Bacheo con mezcla asfáltica en caliente (ton)	35,00%
Perfilado de pavimentos (m <sup>2</sup> )	35,00%
Ruteo y sellado de grietas (m)	35,00%
<b>Pavimento de concreto</b>	
Actividad	Porcentaje del área por cubrir
Bacheo del pavimento de concreto (m <sup>2</sup> )	10,00%
Sellado de juntas y grietas (m)	25,00%
Fresado de la superficie (diamante) (m <sup>2</sup> )	100,00%
Pavimento de concreto hidráulico + refuerzo (m <sup>2</sup> )	10,00%

**Tabla 83.** Porcentajes para estimación de cantidades para el mantenimiento de pavimentos. Fuente: Camarena, A. & Barrantes, J. (2016).