


# **Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecanística-empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de conservación**



## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

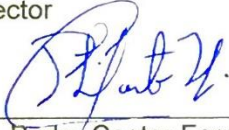
Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Pedro Castro Fernández, Ing. Alejandro Medina Angulo, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción,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



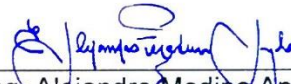
Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Director



Ing. Sergio Fernández Cerdas.  
Profesor Guía



Ing. Pedro Castro Fernández.  
Profesor Lector



Ing. Alejandro Medina Angulo.  
Profesor Observador

# Abstract

To determine the structure of the pavement to be used in "Calle 1" of San Isidro, Pérez Zeledón the design of three types of flexible, semi-rigid, rigid pavements is proposed. These are designed by the mechanistic-empirical approach applying the graphic interface of "CR-ME" design of LanammeUCR in the cases of flexible and semi-rigid, and by reviewing performance models in the case of rigid. Layer thicknesses are evaluated from an AASHTO 93 design as a basis, and check of they meet the acceptance criteria that the models and the guides determine as acceptable for each type of pavement

The materials and cost of the each design is quantified for their construction, and an analysis of each pavement is made, determining advantages and disadvantages through a SWOT matrix. In addition, an economic analysis using the RED model, where the initial investment cost and maintenance evaluated throughout the design period, allows to find the net real value and the internal rate of return. In addition, it is developed a maintenance plan that allows the Municipality of Pérez Zeledón the pavement and that the public sea the most benefit.

With the above results most effective pavement design is found making sure it satisfies the needs required in Street 1, using the empirical mechanical methodology and proposing the maintenance required for this structure.

**Keywords:** *Pavement, AASHTO 93, Mechanism-Empirical, Costs, Feasibility, CR-ME, RED*

# Resumen

Para dimensionar la estructura del pavimento a utilizar en la "Calle 1" de San Isidro, Pérez Zeledón se propone el diseño de tres tipos de pavimentos flexible, semi-rígido, rígido. Estos son diseñados por la metodología mecanística-empírica aplicando la interfaz gráfica de diseño "CR-ME" de LanammeUCR en caso de flexibles y semi-rígidos y con la revisión de modelos de desempeño en caso del rígido. Se evalúan los espesores de capa propuestos con un diseño previo AASHTO 93 como punto de partida y revisan si cumple con los criterios de aceptación que los modelos y las guías determinan aceptables para cada tipo de pavimento

Se cuantifican los materiales y costos de los diseños para su construcción, también se hace un análisis de cada pavimento determinando ventajas y desventajas mediante la creación de una matriz FODA. A esto se le agrega un análisis económico utilizando el modelo RED, donde se evaluarán los costos de inversión inicial y el mantenimiento a lo largo del periodo de diseño en el cual se utiliza el valor actual neto y la tasa interna de retorno como criterios. Además, se pretende elaborar un plan de conservación para que la Municipality de Pérez Zeledón una herramienta para la buena gestión del pavimento y que la ciudadanía sea la mayor beneficiada.

Con los resultados anteriores se determina qué dimensionamiento estructural del pavimento es el más efectivo para construir y que satisface las necesidades requeridas en la Calle 1, utilizando la metodología mecanística empírica y proponiendo el mantenimiento requerido para esta estructura.

**Palabras claves:** *Pavimento, AASHTO 93, Mecanístico-Empírico, costos, factibilidad, CR-ME, RED*

# **Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecánica empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de conservación**

JOSÉ RAFAEL MURILLO BARBOZA

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

Enero del 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

Prefacio .....	1
Dedicatoria y Agradecimiento .....	3
Resumen Ejecutivo .....	4
Marco Teórico .....	9
Metodología .....	20
Resultados .....	47
Análisis de Resultados.....	71
Conclusiones.....	79
Recomendaciones .....	80
Apéndices .....	81
Anexos .....	117
Referencias Bibliográficas .....	128

# Prefacio

El pavimento de la llamada Calle 1 en el cantón de Pérez Zeledón tiene una longitud de 781 m y se divide en tres tramos según su flujo de tránsito. Su estructura se basa en un pavimento en adoquines, por debajo de él se encuentra un sistema de alcantarillado pluvial y otro sanitario.

Se construyó hace más de 45 años, por lo que ya presenta un deterioro bastante considerable; en varios sectores se han aplicado algunos bacheos, pero es inminente que se necesita una reconstrucción total del pavimento en este sitio, debido a la gran importancia que tiene para el casco central de la ciudad, ya que es una de las calles más transitadas; así como, por el daño que presenta.

Por este motivo, se proyecta su intervención en un corto o mediano plazo y por eso es de suma importancia que el ente municipal tenga un criterio con suficiente información, con el fin de decidir qué pavimento es mejor para los requerimientos del tramo y tomando en cuenta la parte económica, ya que dependen de los presupuestos que se planifican con antelación.

Por ello se plantea diseñar tres tipos de pavimentos: rígido, semi-rígido y flexible; así como analizar la profundidad total de la estructura, ya que hay que tomar en cuenta los sistemas de aguas que pasan por debajo de esa calle. Además, determinar los costos de inversión inicial de cada tipo de pavimento y el plan de conservación para el tipo escogido. Este plan es importante para planificar en qué tramos de la vida útil del pavimento necesita algún tipo de intervención, con el fin de que cumpla la función para la que fue construido con la mayor calidad posible.

Con los resultados de los análisis anteriores, se cuenta con criterios para determinar cuál de los tipos de pavimentos se

adapta más a las necesidades requeridas y a la capacidad económica de la municipalidad de la zona.

Para los diseños de pavimentos, en el país, se ha aplicado la metodología AASHTO 93, la cual se creó desde 1956 a partir de condiciones particulares de Ottawa, Illinois, USA, por lo que los nomogramas y ecuaciones no necesariamente se adaptan a las necesidades de Costa Rica. Por este motivo, es necesario buscar una metodología que pueda venir a mejorar estos problemas y que tome en cuenta variables específicas de cada región donde se va a aplicar, como el clima, la magnitud de la carga, la velocidad de los vehículos y de las propiedades de cada material colocado, entre otras condiciones.

En este proyecto se aplica la metodología mecanística-empírica basada en el MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) y modelos mecanísticos desarrollados, ya que en el país no se han utilizado de manera y es necesario que los encargados de desarrollo en infraestructura vial del país estén actualizados en nuevas y mejores formas de diseñar los pavimentos.

Esta metodología de diseño es más confiable, ya que da mayor criterio técnico aplicando conocimientos de Ingeniería como módulos elásticos o dinámicos, esfuerzos, deformaciones y deflexiones. Otra ventaja es que se puede adaptar a cada país según las características del mismo, esto lo ha ido haciendo LanammeUCR con diferentes investigaciones, proyectos de graduación y el lanzamiento del *software* de diseño para pavimentos CR-ME, en su versión de prueba el 20 de abril del 2017.

A partir de lo anterior, se plantea un proyecto que llega a solucionar la problemática del pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, ya que le otorga el diseño completo del nuevo pavimento por construir y un plan de mantenimiento para utilizarlo al máximo en su vida útil. Como complemento, el proyecto brinda

la aplicación de una nueva metodología de diseño para que las autoridades encargadas, los ingenieros que ejercen y los que se están formando, tomen en cuenta una metodología que mejora y optimiza los futuros diseños de pavimentos del país. Con el desarrollo de este proyecto se pueden observar los resultados de un diseño real que se construirá aplicando la metodología mecanística-empírica.

Como objetivo general del proyecto, se planteó el dimensionar la estructura del pavimento por utilizar en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando una metodología mecanística-empírica para diseño de pavimentos y la formulación de un plan de conservación. Para el desarrollo adecuado del objetivo general, es necesario llevar a cabo cada uno de los objetivos específicos descritos a continuación:

- Diseñar tres tipos de pavimentos para la Calle 1 con la metodología mecanística - empírica
- Determinar los costos necesarios para cada tipo de pavimento diseñado.
- Elaborar un plan de conservación para que la función en la vida útil de los tres tipos de pavimentos diseñados se maximice.
- Analizar cuál tipo de pavimento se adapta de mejor manera según los requerimientos establecidos previamente, tomando en cuenta los resultados de diseño en cada tipo de pavimento y su costo.

# Dedicatoria y Agradecimiento

Dedico con todo mi cariño este proyecto y mi carrera universitaria primero que todo a Dios y a la Virgen, por darme las fuerzas y la sabiduría para salir adelante en cada situación que se presentó en este largo camino.

A mi hijo Thiago Murillo, por ser mi mayor motivación para salir adelante y esforzarme más para que el objetivo se cumpliera y tuviera un ejemplo en su padre de que los sueños y las metas se pueden cumplir con esfuerzo y sacrificio.

A mi novia Raquel Altamirano, por apoyarme en todo momento, a pesar de estar lejos la mayoría del tiempo durante mi carrera universitaria.

Igualmente, a mis padres Juan Murillo y Rosibel Barboza, quienes me apoyaron en toda esta etapa y no me dejaron decaer, a pesar de todas las situaciones que se presentaron a lo largo de este tiempo. Y a todos mis hermanos y familiares que también me apoyaron y me ayudaron en diferentes circunstancias.

Agradezco profundamente al Instituto Tecnológico de Costa Rica y específicamente a la Escuela de Ingeniería en Construcción, por ser mi casa durante cinco largos años, donde me pude formar como profesional con los conocimientos necesarios para poder desempeñarme de buena manera en el campo laboral. También por apoyarme económicamente para seguir con mis estudios; igualmente, al Fondo Nacional de Becas que me ayudó, en especial con la difícil etapa tan temprana de ser padre.

A mi profesor tutor, Ing. Sergio Fernández, quien me guio para que el proyecto se pudiera desarrollar de la mejor manera y me enseñó muchos de los conocimientos de diseño en pavimentos que manejo.

También, quiero agradecer el apoyo del Ing. Christopher Trejos, quien es el creador del CR-ME y al Ing. Felipe Vargas, quienes estuvieron anuentes al desarrollo del proyecto y me ayudaban con las consultas que se me presentaban.

Y, por último, al señor alcalde Jeffrey Montoya y a Emanuel Ceciliano, por la oportunidad de desarrollar mi proyecto en la Municipalidad de Pérez Zeledón. También al Ing. Ronny Rojas, coordinador de la U.T.G.V; Ing. Andrea Vargas, Ing. Geiner Navarro, Ing. Johan Aguirre y a todos los compañeros de la Unidad Técnica de Gestión Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón, quienes me recibieron de la mejor manera, me apoyaron y me ayudaron en cada etapa del proyecto para que fuera un aporte funcional en la municipalidad.



# Resumen Ejecutivo

La Calle 1 está compuesta por dos tramos según su flujo de tránsito y tiene una longitud aproximada de 785 m. La estructura que contiene es un pavimento con adoquines que lleva más de 45 años de construido, por lo que presenta grandes deterioros que perjudican gravemente a los usuarios que transitan por esta vía y comerciantes que se encuentran a lo largo de la misma. También es la calle que le da acceso al Hospital Escalante Pradilla y por ello es de suma importancia que esté en muy buen estado.

El proyecto *Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecánica empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de conservación*, como su título lo indica, busca dar una solución de diseño para la Calle 1 en la ciudad de San Isidro del General, determinando la estructura de un pavimento que cumpla con los requerimientos necesarios y sea revisado y diseñado por la metodología mecánica empírica para iniciar un cambio de mentalidad en la Ingeniería nacional e impulsar el uso de este método.

Los insumos principales necesarios para el desarrollo de los diseños como el TPD y las características de los materiales fueron obtenidos por medio de la Unidad Técnica de Conservación Vial y algunos proveedores que colaboraron.

Se plantean tres alternativas de pavimentos: flexible, rígido y semi-rígido, estos van a ser diseñados con ayuda del *software* desarrollado por el Ing. Christopher Trejos, llamado CR-ME. Este *software* revisa, por medio de los modelos, la fatiga y la deformación que puede presentar el pavimento. Para el pavimento rígido, se utilizó un modelo de fatiga desarrollado por el Ing. Sukti Monge, el cual está calibrado para Costa Rica y otros dos modelos que Yang Huang propone.

Con los resultados de diseño, se debe analizar la profundidad que alcanzan sus espesores, ya que se cuenta con sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario debajo de la calle.

Para estos tres pavimentos diseñados, también se deben determinar los costos necesarios para realizar la inversión inicial, ya que el costo siempre es un criterio de peso que se debe tener en cuenta y que los desarrolladores del proyecto, en este caso la Unidad Técnica de Gestión Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón, deben conocer.

La planificación de un mantenimiento para las alternativas descritas también es necesaria, ya que, al proponer cómo se comportará el pavimento y qué daños van a generarse, se pueden asumir medidas que subsanen esos daños y cuantificar el costo de los mismos, para, posteriormente, utilizarlos de insumo en el análisis económico de cada alternativa.

Para desarrollar el análisis económico, se propuso usar el modelo RED, creado por el Ing. Rodrigo Archondo-Callao, quien es especialista técnico del Banco Mundial. Dicho modelo se realizó con el financiamiento del Africa Road Management Initiative (RMI), un componente clave del Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP).

El mismo es utilizado por las municipalidades del país en la evaluación de los proyectos, con el programa MOPT-BID, por lo cual es aceptable para ser aplicado en la evaluación de las alterativas de pavimento planteadas.

Según Archondo (2004), "RED es un modelo que emplea el método del excedente del consumidor para ayudar a evaluar inversiones en caminos con volumen de tránsito bajo" (p.1). Donde realiza la evaluación económica de proyectos de mejora y mantenimiento de caminos, adoptando el excedente del consumidor, que mide los beneficios de los usuarios del camino y los consumidores de los costos reducidos del transporte.

Con la aplicación del modelo, la U.T.G.V de la Municipalidad de Pérez Zeledón tuvo mayores fuentes de información y análisis que

facilitaron la decisión de qué alternativa era la mejor para ser desarrollada en este proyecto.

Los diseños finales elaborados determinaron que, para el pavimento flexible, era necesaria una capa de mezcla asfáltica de 9 cm, para la base 20 cm y para la sub-base 20 cm. En el caso del pavimento semi-rígido, una capa de mezcla asfáltica de 8 cm, una base estabilizada con cemento de 25 cm y un sub-rasante de 15 cm y, por último, en el caso del pavimento rígido, una losa de concreto hidráulico de 25 cm y una base granular de 20 cm.

Los costos de inversión inicial que se obtuvieron para cada alternativa son los siguientes: pavimento flexible \$220,114,035, el pavimento semi-rígido \$258,431,565 y el pavimento rígido \$355,480,675, donde se notó que el pavimento flexible es un 15 % más económico que el semi-rígido y un 38 % más económico que el rígido.

En cuanto a los costos de mantenimiento para las alternativas planteadas, estos son: para el pavimento flexible \$48,770,710, el pavimento semi-rígido \$43,274,634 y el pavimento rígido \$18,905,225. Se concluye que el pavimento rígido es más económico en un 56 % que el semi-rígido y un 61 % que el pavimento flexible.

Utilizando el modelo RED, se determinó que el pavimento flexible tiene un VAN de 0.0024 en millones de dólares y un TIR de 13 %; para el pavimento semi-rígido un VAN de -0.007 y un TIR de 12 % y para el pavimento rígido el VAN daba -0.099 y el TIR 9 %.

Para determinar qué tipo de pavimento se iba a desarrollar se aplicó el concepto de panel de experto, que, por medio del criterio y experiencia de cada uno, permite llegar a una decisión en conjunto que dé una solución efectiva al problema.

Con ello, la decisión final fue la construcción del pavimento semi-rígido por la implicación de los costos de inversión más reducidos y que el desempeño de este pavimento para las cargas vehiculares que se presentan en la calle son altas y se prevé que crezcan en los próximos años con un porcentaje del 3% anual. Como otras conclusiones importantes que se pudieron determinar, se encuentra que:

- La metodología empírica no toma en cuenta específicamente las condiciones climatológicas de la zona donde se van a realizar los diseños para un pavimento, éste sólo toma como variables más

importantes los tránsitos y módulos de los materiales, pero sin afectarlos con el paso del tiempo ni haciendo un análisis de esfuerzos o deformaciones para determinar los desempeños de la estructura de pavimento.

- Se determinó que el pavimento semi-rígido no es tan efectivo desde el punto de vista de ahorro en la capa de mezcla asfáltica, ya que el espesor determinado por la metodología mecanística empírica es mucho menor al mínimo y por ello se debe usar este último.
- El pavimento rígido tiene mejor desempeño en el tiempo, pero el costo de inversión inicial es muy elevado, casi un 38%, pero en el mantenimiento este pavimento es el de menor costo.
- El pavimento más factible para construir y que generaría beneficios a la comunidad según el modelo RED de evaluación económica de caminos es el pavimento flexible ya que su VAN es positivo y la tasa interna de retorno es mayor al 12%, que es el valor establecido por el programa MOPT-BID.
- El modelo RED de evaluación económica de caminos está desarrollado para pavimentos de bajo volumen, por lo que utilizarlo en grandes proyectos no es muy adecuado y la decisión que se tome no se debe basar sólo en este criterio de evaluación.
- El pavimento semi-rígido actúa mejor en cuanto a deformaciones permanentes ya que evita que a lo largo de la vida útil se generen estas deformaciones en gran magnitud y así disminuir los daños que se presenten tomando en cuenta las cargas vehiculares que circulan por esta vía.
- Se determinó, por medio de la reunión desarrollada con todos los profesionales de la Unidad Técnica de Gestión Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón, que la mejor opción para construir en la Calle 1 y que efectivamente va a dar buenos resultados, es construir un pavimento semi-rígido.
- Las decisiones que se tomen en proyectos de este tipo no se pueden

basar sólo en los costos de inversión y mantenimientos se deben tomar en cuenta los impactos que haga en la sociedad y las ventajas de desarrollar uno u otro tipo de pavimento.

# Introducción

La "Calle 1" se ubica en la Ciudad de San Isidro del General dentro de las coordenadas 370000,495000 y 369000,496000 Lambert Sur, consta de dos carriles de 4 m de ancho aproximadamente, con flujo vehicular de dos o una dirección según el tramo y un tránsito promedio diario de 5233 vehículos.

Su estructura se basa en un pavimento con adoquines que ya cuenta con graves deterioros en su estructura, ya que tiene más de 45 años de haberse construido. Por lo cual es de suma importancia desarrollar un diseño que solvete este problema y mejore el tránsito de todos los usuarios por esta vía.



Figura 1. Ubicación Geográfica de la Calle 1  
Fuente: Google, 2017

Tomando en cuenta este problema, se propuso elaborar tres alternativas de diseños que pudieran solventar el mismo, las cuales fueron: un pavimento flexible, un pavimento semi-rígido y un pavimento rígido. Se buscaba evaluar técnica y económicamente cuál de las tres alternativas es la más factible para ser construida por el municipio.

El diseño de pavimentos en el país se ha basado típicamente en la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93, pero, por la naturaleza de cómo fue desarrollada, no cumple con las necesidades que el país requiere, ya que es un método empírico desarrollado en Estados Unidos para otras condiciones, por lo que se deben buscar métodos alternativos, como el mecanístico-empírico, que prometen diseños mejor adaptados a las condiciones del lugar.

Por ello, se aplicó la metodología mecanística empírica en los diseños de pavimentos, para generar una nueva experiencia en el país sobre el uso de este método en un diseño real para una vía cantonal, ya que esta no ha sido utilizada de gran manera en el país. Esto, porque, según Loría “la implementación de la nueva metodología mecanicista en los países centroamericanos implicaba una inversión económica importante” (Loría, 2013), aunque LanammeUCR ha hecho grandes esfuerzos para que se pueda aplicar en el país con el desarrollo de programas computacionales y tropicalización de algunas ecuaciones para el país.

Ya con los diseños de las alternativas listas, se calculan los costos de la inversión inicial, también tomando en cuenta el mantenimiento, ya que uno de los puntos más relevantes a la hora de que un pavimento se mantenga en un estado óptimo en toda su vida útil es la intervención continua del mismo conforme hayan signos de deterioro. Por lo que también se desarrolla una propuesta de mantenimiento para la vía, donde los administradores del pavimento, en este caso la Municipalidad de Pérez Zeledón, puedan presupuestar estos costos y no sea el factor económico el que influya en un mal mantenimiento.

Como estrategia, los análisis de las propuestas se dividen en dos: primero, los aspectos técnicos que se desarrollan con herramientas como una matriz FODA para determinar pros y contras de las alternativas, un análisis de los paquetes estructurales, ya que por

debajo de la calle pasan sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario.

Además, el aspecto económico, que se evalúa utilizando el modelo RED de evaluación económica de caminos, utilizado por el programa MOPT-BID en la evaluación de los proyectos solicitados por las municipalidades. El cual, según Archondo (2004), realiza la evaluación económica de proyectos de mejora y mantenimiento de caminos, adoptando el excedente del consumidor que mide los beneficios de los usuarios del camino, y los consumidores de los costos reducidos del transporte.

Desarrollando este procedimiento se llega a determinar qué alternativa es la mejor para el municipio y cuál va a presentar más beneficios para los usuarios, que al final son los que pagan sus impuestos para que las obras en el cantón se desarrollen de la mejor manera.

# Marco Teórico

## Pavimentos

Los pavimentos son estructuras que permiten la transferencia de los esfuerzos por las cargas de tránsito y el ambiente al terreno natural (subrasante), de manera que no se exceda su capacidad de soporte. Deben, adicionalmente, proveer una superficie de ruedo cómoda, económica y segura; y ser durable según la vida útil de su diseño (Castro, 2017).

Su estructura consta de capas, a las cuales las diferencia su rigidez, ésta determinada por el módulo de resiliencia.

### Tipos de Pavimentos

#### Pavimentos Flexibles

Se consideran flexibles cuando la capa de ruedo consiste en una mezcla asfáltica con una base granular y una sub-base (Universidad Mayor de San Simón, 2004).

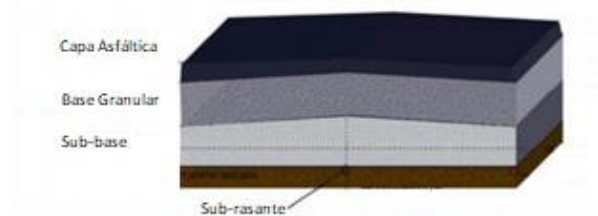


Figura 2. Ejemplo de pavimento flexible.  
Fuente: Google, 2017.

#### Pavimentos Semi-Rígidos

El pavimento semi-rígido utiliza la misma capa de mezcla asfáltica, pero con una base estabilizada

con cemento hidráulico y la sub-base (Universidad Mayor de San Simón, 2004).

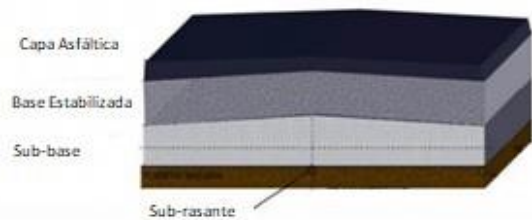


Figura 3. Ejemplo de pavimento flexible.  
Fuente: Google, 2017.

#### Pavimentos Rígidos

La característica más importante del pavimento rígido es que utiliza como capa de ruedo una losa de concreto hidráulico y si fuera necesario las capas inferiores de base o sub-base (Universidad Mayor de San Simón, 2004).

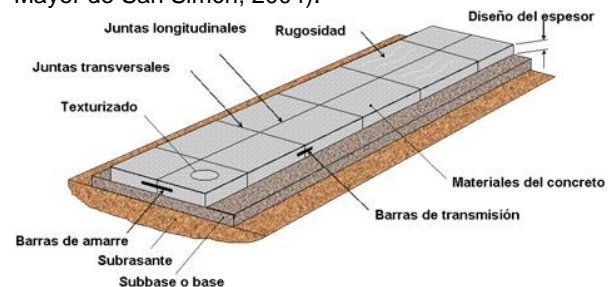
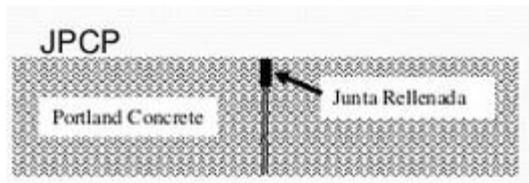


Figura 4. Ejemplo de pavimento rígido.  
Fuente: Google, 2017

#### Pavimento de Concreto con Juntas (JPCP)

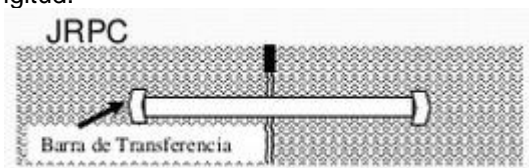
Es un pavimento de losas de concreto con juntas, las cuales son barras de amarre o mecanismos de agarre para transferir la carga de una losa a otra. Estas se espacian dependiendo de las necesidades requeridas, las cargas y el espesor de las losas diseñadas, el espaciamiento puede variar de 3 a 10 m.



**Figura 5.** Ejemplo de pavimento JPCP.  
Fuente: Sotil, (2014).

## Pavimento Reforzado con Juntas (JRCP)

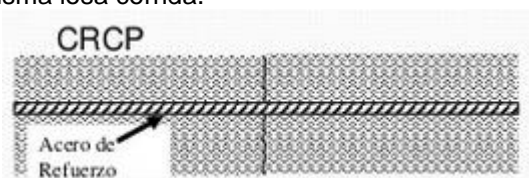
En este pavimento las losas son reforzadas con barras de acero, que, aunque no aumenten la capacidad soportante de la losa, aumentan el espaciamiento de las juntas de 10 a 30 m de longitud.



**Figura 6.** Ejemplo de pavimento JRCP.  
Fuente: Sotil, (2014).

## Pavimento Continuamente Reforzado (CPCP)

En este pavimento se eliminan las juntas de contracción, ya que las losas están completamente reforzadas con acero, el cual hace la función de transitar la carga entre la misma losa corrida.



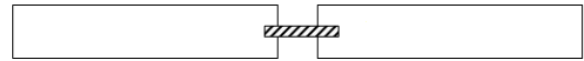
**Figura 7.** Ejemplo de pavimento CRCP.  
Fuente: Sotil, (2014).

## Dovelas

Las dovelas son mecanismos diseñados principalmente para transmitir la carga de una losa de concreto hacia su losa adyacente, con lo que disminuye los esfuerzos y las deformaciones sufridas en las losas.

También, a su vez, ayudan a evitar daños por escalonamiento de las losas, ya que, si son construidas adecuadamente, estas quedan restringidas en el sentido vertical, pero tienen

movimiento en sentido horizontal, por lo tanto, de controlarse el bombeo de finos, también se restringe el escalonamiento.



**Figura 8.** Dovela en un pavimento rígido.  
Fuente: Castro (2017).

## Tipos de Materiales

### Sub-Rasante

La sub-rasante es la primera capa de un pavimento, consiste en el suelo natural o una sustitución de material de préstamo si el suelo en el sitio no es de buena calidad. (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

Los pavimentos son desarrollados para que las cargas que lleguen a esta capa sean las menores posibles y el suelo no falle por sobrecargas. Su capacidad de soporte puede ser determinada por pruebas de CBR directamente o por pruebas indirectas de SPT o DCP.

### Sub-Base

Está constituida por un material de soporte superior a la sub-rasante y una de sus funciones es reducir el espesor de la base dando apoyo en el soporte total del pavimento. (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

Según el CR-2010, el CBR mínimo permitido es de 30 %.

### Base

Es un material de mayor soporte que la sub-base y tiene funciones importantes como reducir las tensiones verticales que las cargas de tránsito ejercen en la sub-base y la sub-rasante; reducir deformaciones de tracción que se ejercen en la capa de rodadura y; por último, permitir drenaje del agua que se infiltre en el pavimento a los drenajes laterales. (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

Para este material el CR-2010 permite un CBR mínimo de 80 %.

## Carpeta Asfáltica

En caso de que el pavimento sea flexible o semi-rígido, la mezcla asfáltica se coloca como la capa de rodadura y tiene como función: impermeabilizar el pavimento para mantener la capacidad de soporte de las capas inferiores.

Dar al usuario una superficie confortable para conducir y disminuir tensiones verticales que las cargas de tránsito ejercen sobre las capas inferiores (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

Las mezclas asfálticas son elaboradas con asfalto como aglutinante, el cual es un producto derivado del petróleo. En el país, la única institución que importa petróleo es la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), la cual distribuye a todos los productores el asfalto ya procesado. El tipo de asfalto que se utiliza en Costa Rica es el AC-30, con la salvedad de que se puede modificar para cambiar las características de rigidez.

## Concreto Hidráulico

En pavimentos rígidos la utilización del concreto se hace por medio de losas, estas tienen las mismas funciones que una capa de rodadura, solo que, al ser elaboradas con concreto hidráulico, tienen mayor rigidez y son diseñadas para flexotracción.

Una de las ventajas importantes que ofrece construir un pavimento con losas de concreto es que disminuye el grado de mantenimiento que se debe aplicar para que esté en buen estado y que da mayor durabilidad.

## Otros conceptos

### Módulo Resiliente (MR)

El Módulo Resiliente (MR) es una medición de la rigidez que el material puede tener y a su vez, puede medir la capacidad de soporte del mismo. Hay ensayos de laboratorio que los miden directamente, pero en el país no es común, ya que sólo LanammeUCR cuenta con estos equipos, por lo que para subrasante, bases y sub-bases granulares, se obtiene a través de ecuaciones correlacionadas con la capacidad soportante (CBR); y para la base estabilizada y

losas de concreto, con la resistencia a compresión, a los 7 y 28 días respectivamente.

## Índice Soporte de California (CBR)

La relación de soporte California (CBR; California Bearing Ratio) es un ensayo de suelo que determina la resistencia al cortante; representa la calidad de la base, sub-base o la sub-rasante. La norma que regula este ensayo es ASTM D1883-07.

## Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP)

El ensayo de DCP es una prueba *in situ*, que busca evaluar la resistencia de los suelos y estimar un valor de CBR con respecto a una correlación.

Según Viscarra (2006):

“A diferencia del CBR, el DCP presenta ventajas como su simplicidad y economía de uso. Implícitamente, el DCP estima la capacidad estructural de las diferentes capas que conforman a un pavimento, detecta simultáneamente el grado de heterogeneidad que puede encontrarse en una sección y la uniformidad de compactación del material, de una manera rápida, continua y bastante precisa.” La norma que regula este ensayo es ASTM D6951-03

# Diseño de pavimentos

## Metodología AASHTO 93

“La metodología de diseño de pavimentos AASHTO, con sus diferentes versiones, se basa en los resultados experimentales obtenidos en el AASHTO Road Test, en Ottawa, Illinois cuyo proyecto data de 1951 y que inició la construcción de tramos de prueba en 1956” (Duravia, 2012) (p.2).

El tramo de prueba AASHTO desarrolló correlaciones con respecto al deterioro y comportamiento de los pavimentos, después de que se le aplican las cargas vehiculares, por lo que se aplicó a pavimentos rígidos y flexibles.



Entre 1958 y 1960 se determinan los primeros resultados con los cuales se realiza la primera guía de diseño AASHTO en el año 1962, la cual siguió en evaluación y constante mejora entre 1972 y 1981. En 1993, se vuelve a revisar, pero sin cambios en lo que a diseño de pavimentos de concreto se refiere y en 1998, con el suplemento de diseño AASHTO 1998, se intenta incorporar conceptos mecanicistas a la guía. Es así que, a través de diversas versiones, AASHTO lanza su metodología de diseño basada en las relaciones empíricas registradas en el AASHTO Road Test.

Según Duravía (2012):

“El objetivo es calcular el mínimo espesor de un pavimento para que éste pueda soportar el paso de las cargas de tránsito manteniendo un cierto nivel de servicio para el periodo de diseño. AASHTO propone para ello valores de servicialidad del pavimento (basado en correlaciones con el IRI, agrietamiento, y fallas del pavimento) y que se ha comprobado guardan correlación con la calificación subjetiva de los usuarios de la vía.

## Ejes Equivalentes (W18)

El eje equivalente se denota como W18 en la ecuación de diseño del método AASHTO 93 y corresponde al número de aplicaciones de cargas equivalentes a ejes simples, duales de 8200 kg, acumuladas en el periodo de diseño (T).

Para obtener los EEQ, es necesario conocer el Tránsito Promedio Diario (TPD); entiéndase por TPD como cantidad de vehículos que circulan por una carretera diariamente. Es un valor que aumenta con el tiempo. Su incremento se ve relacionado con la tasa de crecimiento poblacional de la zona o país donde se realice el diseño.

Es necesario, para el método AASHTO 93, convertir el TPD a EEQ acumulados al periodo de diseño, mediante el uso de un factor camión. El factor camión es un número que indica la relación entre el tipo de vehículo que se analiza y un eje equivalente simple.

## Número Estructural (SN)

El número estructural (SN) refleja la capacidad de la estructura para soportar las cargas vehiculares.

Se establece un SN para la capa de ruedo o carpeta asfáltica y un SN acumulado para las capas siguientes. En palabras simples, la *capa de ruedo* posee la característica SN1, mientras que hasta la *base* se posee la característica SN2, sin embargo, SN1 está contenido en SN2.

Se puede relacionar SN directamente con el espesor de la capa. Como espesor de capa, se entiende a la profundidad o grosor con la que se construirán las diferentes capas del pavimento, se denota el espesor con la letra D y la dimensión que se utiliza en este método es pulgadas (in). Para relacionar ambas partes, se requiere de un factor llamado coeficiente estructural.

Sea para diseño de pavimento flexible o rígido se debe de aplicar un coeficiente de drenaje que se determina para el proyecto e influye directamente en el número estructural.

## Coficiente Estructural

El coeficiente estructural está en función de la resistencia y rigidez del material. Refleja la capacidad estructural de un material por cada pulgada de espesor. Se denota con la letra a. Para la capa de ruedo, la base y la sub-base, se denota como a1, a2 y a3, respectivamente.

## Nivel de Confianza

Representa el nivel de confianza, específicamente es la desviación de la curva de desviación normal de los ejes equivalentes, está en función de la confiabilidad (R).

## Desviación Estándar

La desviación estándar del sistema (So) toma en cuenta posibles variaciones en la medición de TPD, así como variaciones en el comportamiento del pavimento a lo largo del periodo de diseño.

## Índice de Servicialidad (PSI)

El Índice de servicialidad (PSI) es el valor empírico entre 0 y 5 que indica la calidad de un pavimento, siendo 0 un pavimento muy malo y 5 un pavimento muy bueno. Se establece un PSI inicial y un PSI final; dado que el pavimento se ve sometido a esfuerzo y condiciones ambientales, se reduce su índice de servicialidad. Se da

entonces un Cambio del PSI ( $\Delta$ PSI) o Pérdida de Servicialidad.

## Metodología Mecánica-Empírica

Según Corredor (2008), después de 1993, aunque se contaba con un procedimiento calificado como racional para diseñar el pavimento, todavía se fundamentaba el procedimiento en un alto grado en valores experimentales. Por lo que, a partir de esa fecha, la AASHTO empieza a desarrollar una metodología mecanicista, donde se diseñe tomando en cuenta los esfuerzos y las deformaciones de los materiales.

Loría (2013) en su informe determinó que: “la implementación de la nueva metodología mecanicista en los países centroamericanos implicaba una inversión económica importante y además se encontró con que la variación en el clima, en las propiedades de los materiales y algunos factores de calibración para las condiciones de clima, eran limitaciones importantes al diseñar”

Por tanto, en Costa Rica se emprende la idea de crear su propia metodología mecanicista aplicable al país, debido a que utilizar la metodología AASHTO 93 no estaba dando buenos resultados en la construcción de pavimentos. El principal ente en la implementación de esta nueva metodología ha sido el LanammeUCR; a partir de 2012, se planteó crear la *Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecánica para Costa Rica*. Actualmente, cuenta con el programa CR-ME en desarrollo, el cual es una herramienta de apoyo para el diseño mediante la metodología mecanicista-empírica de pavimentos flexibles y semirrígidos.

Este diseño se basa en la mecánica de las estructuras por construir, las características de los materiales, clima, tránsito y ecuaciones que determina las respuestas del pavimento y las correlaciona con daños como el agrietamiento por fatiga y deformaciones.

## Módulo Dinámico

Uno de los parámetros más importantes por considerar en el diseño mecanicista-empírica es el módulo dinámico. “El módulo dinámico de

una mezcla asfáltica se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima” (Higuera, 2011, p.42).

Además, el módulo dinámico es un parámetro que depende de la temperatura y de la velocidad aplicada.

El asfalto es un material con propiedades elastoplásticas, lo que significa que a temperaturas bajas adquiere un comportamiento elástico, conforme la temperatura aumenta, se hace más plástico. Un material con alta plasticidad, cuando sufre un esfuerzo, tiende a deformarse en mayor medida.

Según Higuera, Naranjo y Cetina (2011), el módulo dinámico se puede obtener de diversas formas, por ejemplo, con ensayos de laboratorio, nomogramas y mediante fórmulas matemáticas. Algunos ensayos de laboratorio recomendados por LanammeUCR son:

- Módulo resiliente de mezclas asfálticas a la tensión indirecta (AASHTO TP-31-96 ASTM D 4123 IT-ED-04).
- Módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente (AASHTO TP 62 ASTM D 3497/D 3496).
- Módulo resiliente de materiales granulares y suelos (AASHTO T 307).

Existen muchas fórmulas con las cuales se puede aproximar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica; se pueden mencionar fórmulas de Bonnaure, fórmulas del Instituto de Asfalto, fórmulas de Heukelom y Klomp; y la fórmula de Witczak. De los anteriores, el método de Witczak brinda un valor del módulo dinámico mayor respecto a los demás, además, es un método poco sensible a la variación de parámetros, tal como la frecuencia de aplicación de carga, tiempo de aplicación de carga, porcentaje de volumen de asfalto, porcentaje de volumen de vacíos (Loría, 2013).

El programa de LanammeUCR, CR-ME utiliza tres modelos para el cálculo del módulo dinámico: Witczak, Witczak-Lanamme, ANN-Lanamme. Witczak-Lanamme surgió cuando se realizó una investigación aplicada en noviembre de 2007, con el objetivo de calibrar las ecuaciones del método Witczak a las características de los materiales de Costa Rica.

Dentro de los parámetros que se toman en cuenta en las ecuaciones del método Witczak y Witczak-Lanamme, se encuentra la frecuencia

de carga, relacionada con la velocidad y cantidad de vehículos que circulan diariamente por la carretera; el porcentaje de vacíos de aire, considerado como el volumen de aire en la mezcla dividido entre el volumen de la mezcla total; el porcentaje de volumen efectivo de ligante, considerado como el volumen de ligante total menos el porcentaje de ligante absorbido por el agregado; y porcentajes de agregado retenido en los tamices  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", tamiz N°4 y tamiz N°200.

## Índice de Thornthwaite

El índice de Thornthwaite (TMI) es un número que se obtiene a través de un cálculo sencillo y ayuda a clasificar el clima. El TMI otorga gran importancia al balance de humedad como elemento para la caracterización del clima (Moreno, Canessa, Mattar, & Orrego, 2006).

Thornthwaite ideó el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) y generó una fórmula que permite estimarla a partir de la temperatura (Neida et al., 2011). Con base en los valores de precipitación y ETP es posible contabilizar, a través de un cálculo sencillo, un balance hídrico del suelo, que permite cuantificar los excedentes (E) o déficit (D) de humedad del mismo (Neida et al., 2011).

A partir de lo anterior, con datos de precipitación y temperatura, y con el procedimiento que se describe más adelante, se puede calcular de forma sencilla el Índice de Thornthwaite.

# Conservación de Pavimentos

La conservación de un pavimento es la labor que debe realizar un ente o la institución a cargo de un camino, calle o carretera, para que su funcionamiento sea óptimo la mayoría de su vida útil y no afecte a los usuarios.

Hay diferentes tipos de mantenimiento según el estado y el periodo en que se realicen las labores.

## Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento menor preventivo son las labores rutinarias que requiere el pavimento para

mantener y proteger su nivel de calidad, servicio y seguridad óptimo en su vida útil, también pueden aplicarse para corregir fallas pequeñas en su inicio.

## Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es aplicado para reparar fallas presentes en el pavimento que estén afectando directamente al usuario con un mal servicio. "Si la condición del pavimento alcanza un alto grado de deterioro, las acciones de mantenimiento menor se hacen costosas y poco efectivas, difícilmente pueden mejorar la condición integral de la vía, y solo se logra mantenerla en una condición deficiente a un altísimo costo" (Jugo, 2005, p.12).

Si los costos de estas reparaciones y la falla son un problema de magnitud más considerable, se requiere de un mantenimiento mayor.

## Rehabilitación

Debido al paso de los años y las cargas vehiculares del tránsito, el efecto del clima y los materiales utilizados, el pavimento comienza a dar evidencias de problemas que necesitan la intervención de las autoridades.

Para determinar el estado del pavimento, se pueden elaborar pruebas donde se conoce la capacidad estructural del mismo y sus deformaciones, con lo que se evalúa si es necesaria la rehabilitación con sobrecapa o recarpeteo. Tomando en cuenta que la sobrecapa es una capa adicional sobre el pavimento existente y el recarpeteo es la escarificación de la capa existente y la colocación de una nueva capa.

"Si la capacidad estructural del pavimento en ese momento se encuentra entre el 20 % y el 60 % de la capacidad inicial, se debería realizar algún tipo de trabajo sobre la superficie como es la colocación de una sobre capa o un recarpeteo" (Jiménez, 2013, p.17).

## Reconstrucción

El pavimento al cumplir el periodo de diseño o al no contar con un adecuado mantenimiento en etapas anteriores y la rehabilitación del mismo, es necesario intervenirlo con una reconstrucción parcial o total de la estructura.

Para la reconstrucción se puede recuperar parte de los materiales existentes o se pueden eliminar completamente desde la subrasante, según el daño que las capas del pavimento presenten.

También los costos de los usuarios al transitar por las vías, las capacidades estructurales bajas del pavimento se aumentan por los tiempos perdidos y daños a los vehículos. Y, por ende, es muy necesaria la reconstrucción total del pavimento.

## Fallas de un pavimento

Las fallas de un pavimento están clasificadas en estructurales y funcionales.

### Estructurales

Cuando las capacidades de soporte de las capas estructurales del pavimento sufren cargas mayores a las establecidas y presentan grandes daños que se evidencian con agrietamientos, deformaciones u otras patologías asociadas a estas fallas.

### Funcionales

Se presenta al insatisfacer las necesidades de comodidad y seguridad de los usuarios, con lo cual se presentan molestias, pérdidas económicas y atrasos en tiempos de llegadas para los conductores. Un deterioro asociado puede ser exudación de asfalto, con lo cual se hace más resbalosa la calzada y puede provocar accidentes.

## Tipos de deterioro de un pavimento

Para pavimentos flexibles y semi-rígidos.

### Piel de cocodrilo

“Fisuras interconectadas cuyo origen es la falla por fatiga de la capa de rodamiento asfáltica bajo la acción repetida de las cargas de tránsito” (Vázquez, 2015a, p.32).

### Exudación

“Película de material bituminoso sobre la superficie del pavimento, la cual forma una capa brillante, cristalina y reflectora de luz que puede llegar a ser pegajosa” (Vázquez, 2015a, p.39).

### Grietas longitudinales y transversales

“Son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de la construcción del mismo” (Vázquez, 2015a, p.82).

### Pulimiento de agregados.

“Porción del agregado que se extiende por encima del asfalto, es muy pequeño o no hay partículas de agregado ásperas que proporcionen resistencia al deslizamiento” (Vázquez, 2015a, p.95).

### Huecos

“Son depresiones pequeñas de la superficie del pavimento y forma de tazón” (Vázquez, 2015a, p.99).

### Ahuellamientos

“Es una depresión de la superficie en el trayecto de las ruedas de los vehículos” (Vázquez, 2015a, p.109).

### Meteorización

“Desgaste del ligante asfáltico y la matriz de agregado fino de la mezcla” (Vázquez, 2015a, p.133).

Algunos otros deterioros para pavimentos rígidos son los que se mencionan seguidamente.

### Rotura de pandeo

Suele ocurrir en clima cálido, a lo largo de una junta o grieta transversal que no tiene suficiente

espacio para permitir la expansión de la losa. (Vázquez, 2015b, p.22)

## Losas divididas

Las losas se dividen en cuatro o más pedazos. (Vázquez, 2015b, p.33)

## Escalonamiento

Diferencia de nivel entre losas a través de una junta. (Vázquez, 2015b, p.44)

## Daño del Sello de Junta

Cualquier condición que permita acumulación de fragmentos de suelo o roca, o la infiltración de agua dentro de las juntas. (Vázquez, 2015b, p.49)

## Bacheo

Área donde se retiró el pavimento original y se lo reemplazó con material nuevo. (Vázquez, 2015b, p.65)

## Astillamiento de esquina

Es la rotura de la losa dentro de una distancia aproximada de 500 mm desde la arista. (Vázquez, 2015b, p.103)

## Valoraciones de pavimentos

### Índice de Servicialidad (PSI)

“El PSI fue determinado a partir de un panel de individuos, quienes juzgaron el pavimento en una escala de 0.0 a 5.0” (Castro, 2017, p.3). Luego de investigaciones se determinaron correlaciones objetivas con aspectos medibles en el pavimento como:

- Rugosidad: Grado de desviación de la superficie de pavimento con respecto a una superficie plana perfecta. Puntos medidos cada 1.0 ft (12 in). Promedio y desviación estándar para datos de valor absoluto de pendientes. El parámetro usado para caracterizar la rugosidad de un pavimento en el tramo experimental de la AASHTO fue la varianza de pendientes (SV). (Castro, 2017)

$$SV = s^2$$

- Agrietamiento: Área cubierta por grietas, expresada en pies cuadrados (ft<sup>2</sup>) por cada 1000 ft<sup>2</sup>. (Castro, 2017)
- Baches: Área cubierta por baches, expresada en pies cuadrados (ft<sup>2</sup>) por cada 1000 ft<sup>2</sup> de área. Se cuantifica de forma similar a cómo se cuantifica el agrietamiento. (Castro, 2017)
- Roderas: Profundidad media de rodera (RD). Se selecciona la mayor de entre RD1 y RD2 por sección transversal y se promedian los diferentes valores cuantificados en el sentido longitudinal. (Castro, 2017)

Las ecuaciones determinadas para calcular el PSI son las siguientes:

Pavimentos flexibles:

$$PSI = 5.03 - 1.91 * \log(1 + SV) - 1.38 * (\overline{RD})^2 - 0.01 * (C + P)^{0.5}$$

Pavimentos rígidos:

$$PSI = 5.41 - 1.78 * \log(1 + SV) - 0.09 * (C + P)^{0.5}$$

SV: varianza de pendientes (x10<sup>-6</sup>).

RD: profundidad promedio de roderas (in).

C: área agrietada (ft<sup>2</sup>/1000 ft<sup>2</sup>).

P: área con baches (ft<sup>2</sup>/1000 ft<sup>2</sup>).

Y como PSI iniciales se recomienda para pavimento rígido 4.5, y para pavimento flexible 4.2.

Para la vida útil del pavimento se puede determinar una curva donde el 75 % de su vida útil sufre un 40 % de daño y el siguiente 12 % de vida pierde otro 40 %, lo cual deja el pavimento en condiciones de mala calidad.

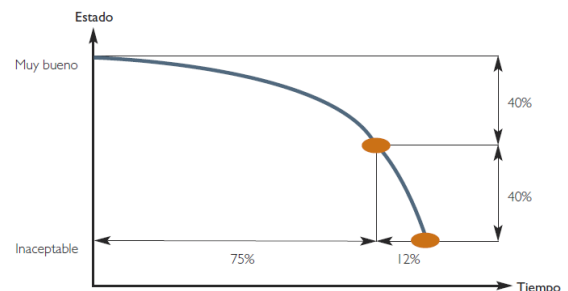


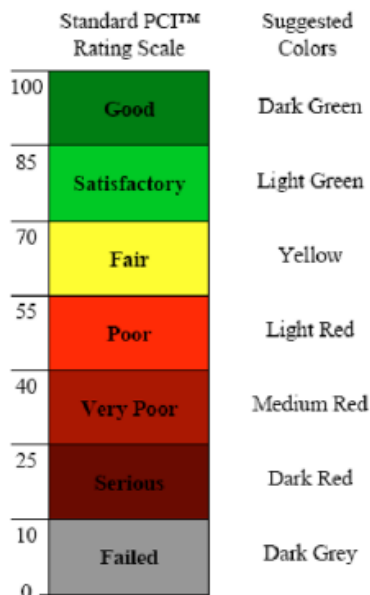
Figura 9. Comportamiento del pavimento según el PSI.

Fuente: Corporación Adina de Fomento, 2010

## Índice de Condición de Pavimentos (PCI)

Con la norma ASTM D6433-11, se tiene otra forma de determinar el estado de un pavimento, en el cual con hojas de revisión se determinan los daños aparentes que puede presentar el pavimento y estimar un índice de condición para el mismo.

Este índice numérico clasifica la condición superficial del pavimento. Se basa en el inventario visual de los daños superficiales del pavimento, la cual da una idea de la integridad estructural y la condición operacional del mismo. Pero aclarando que el PCI no mide directamente la capacidad estructural.



**Figura 10.** Clasificación del Pavimento según el PCI.  
Fuente: American Society for Testing and Materials, 2011

La medición continua del PCI determina la tasa de deterioro del pavimento, para así determinar de forma más temprana los daños y planificar sus mejoras.

En el apéndice se encuentra la hoja de inspección de campo y en los anexos se encuentran los gráficos para determinar el valor deducible.

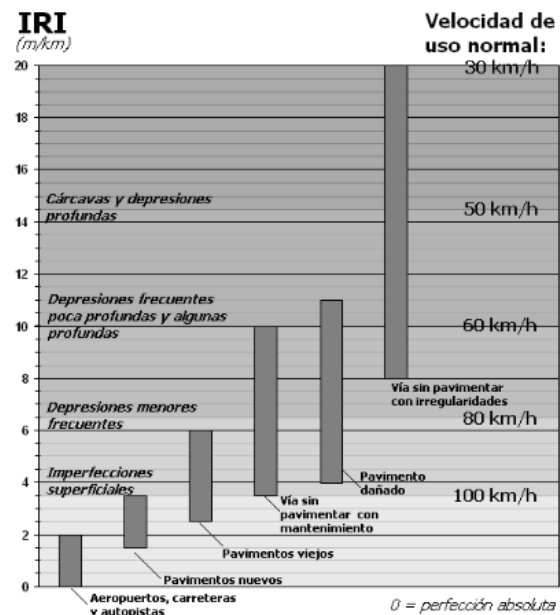
## (IRI) Índice de Regularidad Internacional

“El Índice Internacional de Rugosidad, fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como

parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino” (Arriaga, 1998, p.1)

El cálculo matemático del IRI se basa en acumulación de desplazamientos medidos en campo en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa de un modelo de vehículo, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km. o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando este viaja a una velocidad de 80 km/hr. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc. (Badilla, s.f.)

Así, el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino. Este sirve como estándar para calibrar los equipos de medición de la regularidad superficial de un camino.



**Figura11.** Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías.  
Fuente: Badilla, s.f.

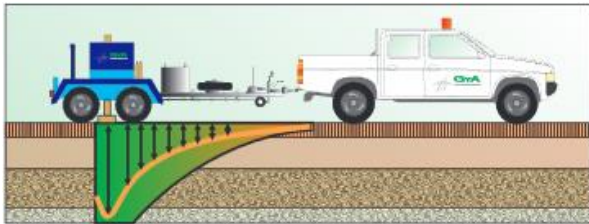
El IRI puede ser medido con equipos como Dipstick, Perfilógrafos, Equipos tipo respuesta y perfilómetro inercial.

Conocer la regularidad superficial del pavimento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento adecuado y así beneficiar al usuario de manera directa.

## (FWD) Deflectometría por impacto

El deflectómetro de impacto es un equipo utilizado para la evaluación del estado estructural de pavimentos flexibles, semirrígidos y rígidos.

La deflexión es el parámetro universalmente empleado para la caracterización de la capacidad estructural de un pavimento. El ensayo consiste en la aplicación de una carga y la medición de la deformación producida en su superficie por efecto de la misma. (Dynatest, s.f.)



**Figura 12.** Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías.  
Fuente: Dynatest, s.f.

La medida de las deflexiones se realiza mediante siete sensores (geófonos) que se sitúan uno debajo de la placa de carga y los otros seis a distancias variables de hasta 2,5 m del punto de impacto. Existe la posibilidad de colocar sensores a ambos lados de la placa de carga. El uso de geófonos en la medida de las deflexiones elimina la necesidad de un sistema de referencia, obteniéndose valores de hasta 10-3 mm con una precisión de 0,5 %.

Con los resultados de las pruebas anteriores se pueden generar matrices de deterioro, donde se intercalan y se le asigna una clasificación como lo hace LanammeUCR con la Red Vial Nacional Pavimentada, en sus revisiones bianuales.

## Matriz FODA

“La matriz FODA es una herramienta de análisis que puede ser aplicada a cualquier situación, individuo, producto, empresa, que esté actuando como objeto de estudio en un momento determinado del tiempo” (MatrizFODA, 2017).

Con los resultados de la matriz se puede desarrollar un análisis donde se determine los puntos que favorecen y desfavorecen cada uno de los escenarios planteados.

## Valor Actual Neto (VAN)

Según Fernández (2010), “es uno de los métodos financieros más utilizados en la evaluación financiera del proyecto de inversión dado” (p.130)

Este método toma en cuenta los flujos efectivos en función del tiempo y su objetivo principal es determinar la diferencia de los valores actualizados y el valor actualizado de las inversiones y otros gastos que se presenten. Por lo que el resultado dado por el método puede indicar si se puede aceptar un proyecto desde el punto de vista financiero.

La regla para clasificar un proyecto que Fernández (2010) presenta es la siguiente:

$VAN > 0$  Se elige el proyecto.

$VAN < 0$  No se toma en cuenta el proyecto.

$VAN = 0$  Financieramente no se elige, pero estratégicamente puede ser escogido.

Donde un VAN positivo implica que se puede recuperar la inversión, paga el costo financiero y puede generar un excedente que proporcione una mayor riqueza.

## Tasa Interna de Retorno (TIR)

Para Fernández (2010) “el TIR de un proyecto de inversión es la tasa de descuento que hace que el valor actual de los flujos de benéfico sea igual al valor actual de los flujos de inversión negativos”. (p.131)

La clasificación que Fernández presenta para proyectos independientes es:

Si el  $TIR > K$  y  $VAN > 0$  Se elige el proyecto.

Si el  $TIR < K$  y  $VAN < 0$  no se elige el proyecto.

Si el  $TIR = 0$  y  $VAN = 0$ , no se elige el proyecto.

En el caso de que el TIR sea mayor que el K, los evaluadores del proyecto pueden garantizar que cubren la inversión y el costo financiero, también se puede asumir que puede generar excedentes.

# Modelo RED

El modelo de Evaluación Económica de Caminos (RED siglas en inglés) fue elaborado por el Ing. Rodrigo Archondo-Callao, el cual es especialista técnico del Banco Mundial, y con el financiamiento del Africa Road Management Initiative (RMI), un componente clave del Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), logró desarrollar un modelo que brinde un criterio para elegir la mejor alternativa en proyectos viales.

Este modelo es utilizado por las municipalidades del país en la evaluación de los proyectos con el programa MOPT-BID, por lo cual es aceptable para la aplicación en la evaluación de las alternativas de pavimento planteadas.

Según Archondo (2004) "RED es modelo que emplea el método del excedente del consumidor para ayudar a evaluar inversiones en caminos con volumen de tránsito bajo" (p.1). Donde realiza la evaluación económica de proyectos de mejora y mantenimiento de caminos, adoptando el excedente del consumidor, que mide los beneficios de los usuarios del camino, y los consumidores de los costos reducidos del transporte.

El modelo RED se desarrolló con la ayuda del *software* Excel, ya que, en una serie de libros, los cuales colectan los datos a ingresar por el usuario, presentan los resultados, estiman el costo operativo de vehículos, realizan una comparación económica entre las alternativas de inversión y mantenimiento y llevan a cabo análisis de sensibilidad, de valores intercambiados y de riesgo.

Con toda esta información el desarrollador del proyecto puede tener bases importantes para dar un criterio de cuál alternativa propuesta puede ser la más efectiva por realizar y la que genere mayores beneficios, en este caso a la municipalidad y a la comunidad.

Con el aporte de cada uno y las decisiones tomadas se puede elaborar un informe o minuta con los puntos más importantes y las decisiones dadas y dejar constancia de cómo se desarrolló el tema y a que conclusiones se llegaron.

# Panel de Expertos

Consiste en una técnica en donde diferentes personas o profesionales generan criterios avalados por su conocimiento y experiencia para evaluar y emitir un juicio colectivo sobre la situación en discusión.



# Metodología

## Gestión de Proyectos

La Unidad Técnica de Gestión Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón cuenta con un modelo de gestión elaborado por Adán Barahona.

Determinar la necesidad, oportunidad o problema es el primer paso donde se propone un proyecto, el cual va a buscar la forma de solucionar esa situación planteada. Este tiene dos opciones de proceder, se le asigna un director de Proyectos o se envía al Banco de Proyectos.

Cuando se define el director del Proyecto, éste tiene la obligación de dirigir y gestionar todos los aspectos relevantes del proyecto y asume la responsabilidad del mismo. Tiene la potestad de crear un equipo de proyecto con los profesionales o entes que crea importantes éste.

El equipo de proyecto en conjunto define los alcances del proyecto y con esta información se procede a iniciar la fase de estudios de reinversión.

Se ejecutan los estudios técnicos, económicos o sociales necesarios que respalden el proyecto. Cuando estos se aprueben, se pueden iniciar los diseños finales, los cuales estarán a cargo de los profesionales en el área.

Al contar con los diseños finales aprobados, se envían al Banco de Proyectos, el cual funciona como una incubadora. Cuando se tiene la directriz de aprobación del proyecto se elaboran los términos de referencia *Cartel de Licitación*.

Con la orden de ejecución se asigna un director Facultativo, el cual tiene la responsabilidad de la obra y debe hacer informes del avance del proyecto, puede proponer cambios si fueran necesarios y son evaluados en un control integrado de cambios.

Al final de la ejecución se cierra el proyecto y se elabora un informe final del mismo; a esta etapa se le agrega el monitoreo de la obra en operación para evaluar si se cumplen los objetivos propuestos.

El proyecto que se presenta fue sometido al proceso antes descrito hasta la etapa de Banco de Proyectos, ya que depende del presupuesto municipal y la aprobación de la Junta Vial Cantonal.

## Investigación Bibliográfica

La revisión bibliográfica siempre es vital en cualquier proyecto o investigación, ya que otorga los fundamentos, teorías, ecuaciones necesarias para desarrollar los objetivos planteados.

Específicamente, es necesario investigar sobre el diseño de pavimentos mediante la metodología AASHTO 93, la metodología mecanística-empírica y los tipos de pavimentos que se pueden construir.

También se investigó sobre conservación de pavimentos, fallas, deterioros en el mismo, métodos para desarrollar planes de gestión y análisis económico de los tres pavimentos por diseñar.

# Diseño de Pavimentos

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron dos metodologías de diseño: la AASHTO 93, la cual es la que se utiliza comúnmente y fue necesaria para un diseño preliminar que indicara espesores; y la metodología mecánica-empírica aplicando el *software* CR-ME para pavimentos flexibles y semi-rígidos. El cual es un *software* libre desarrollado por el Ing. Christopher Trejos en LanammeUCR, con el fin de facilitar y promover el uso de esta metodología en el país.

En el caso del pavimento rígido, se utilizan modelos propuestos por Monge, S. para agrietamiento longitudinal y Huang, Y. para bombeo y escalonamiento, con estos se revisa que el pavimento cumpla con los mismos y no sólo sea un cálculo empírico que defina el espesor.

## Recolección de Datos de Entrada para Diseño

La U.T.G.V. de la Municipalidad de Pérez Zeledón se basa en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010, para la aceptación de los materiales a utilizar en sus proyectos.

## Sub-Rasante

Para determinar la capacidad de soporte de la sub-rasante se efectuaron ensayos de CBR *in situ* empleando el método del DCP (Penetrómetro Dinámico de Cono con mazo de 8 kg). Este es un método que evalúa de manera aproximada la rigidez del suelo, para estimar el valor del CBR *in situ*, con base en un cuadro apropiado de correlación ya establecido

Los valores alcanzados han sido tabulados y manipulados de tal forma que se ha podido estimar valores de CBR. Para el caso de la Calle 1 se realizaron siete ensayos en diferentes puntos, pero sólo en uno se pudo llegar a la sub-rasante real, por lo que los resultados de esta prueba se pueden observar en

la figura A-7, anexos. Y se determinó que el CBR era de 8.6 %.

Con las otras penetraciones se pudo comprobar que, en el momento de la construcción del pavimento, se hizo alguna sustitución de material y con el paso de los años se ha ido conformando el material en el sitio, por lo cual los resultados de CBR son mayores a lo esperado para una sub-rasante.

Cabe mencionar que los ensayos fueron realizados tiempo antes del desarrollo de este proyecto.

Con los ensayos que se llevaron a cabo del material del suelo en una zona cercana anteriormente por la municipalidad, se determinó la siguiente información.

Cuadro 1. Características de la Sub-Rasante		
Característica	Unidad	Cantidad
Índice de Plasticidad	%	16.4
Gravedad Específica (Gs)	-	2.681
Densidad Seca Máxima	kg/m3	1431

Fuente: Datos proporcionados por la U.T.G.V.

La razón de Poisson recomendada para la sub-rasante según la literatura es de 0.45. (Castro, 2017)

## Sub-Base

Las características de la sub-base se determinaron con información de proveedores de la zona, por lo que son datos muy significativos y adaptados a la zona del cantón.

Por cuestiones legales y de confidencialidad del proveedor y la municipalidad, no se puede revelar información de los mismos.

Cuadro 2. Características de la Sub-base		
Característica	Unidad	Valor
%Pasando N°200	%	15.6
Índice de Plasticidad	%	N.P.
Gravedad Específica (Gs)	-	2.655
Densidad Seca Máxima	kg/m3	1602
Humedad Óptima	%	16.2
CBR	%	30

Fuente: Datos proporcionados por proveedores de la zona confidencialmente.

La razón de Poisson recomendada para la sub-base según la literatura es de 0.40. (Castro, 2017)

## Base

Igual que la sub-base, las características de la base se determinaron con información de proveedores de la zona, por lo que son datos muy significativos y adaptados a la zona del cantón. Este material es quebrado y de río. Por cuestiones legales y de confidencialidad del proveedor y la municipalidad, no se puede revelar información de los mismos.

Cuadro 3. Características de Base		
Característica	Unidad	Valor
%Pasando N°200	%	5.5
Índice de Plasticidad	-	N.P.
Gravedad Específica (Gs)	-	2.651
Densidad Seca Máxima	kg/m <sup>3</sup>	2232
Humedad Óptima	%	8
CBR	%	87

Fuente: Datos proporcionados por proveedores de la zona confidencialmente.

La razón de Poisson recomendada para la base granular según la literatura es de 0.40. (Castro, 2017)

## Base Estabilizada con Cemento Hidráulico

Se determinó que se utilizaría una base estabilizada con cemento hidráulico BE-25 con resistencia de compresión a los siete días de 30 kg/cm<sup>2</sup>. Ya que cumple con criterios de resistencia que la U.T.G.V. establece.

El módulo resiliente final se determina con el 50 % del valor inicial, según criterio de los profesores del área de pavimentos en el Tecnológico de Costa Rica. El módulo de ruptura se calcula con la siguiente ecuación:

$$S'c = 0.51 * (f'c)^{0.88}, \text{ en psi}$$

Fuente: ACI 230.1 R

El módulo resiliente de la base se correlaciona con la resistencia a compresión utilizando el nomograma de AASHTO 93. (ver figura A-3, Anexos)

Cuadro 4. Características de Base Estabilizada con Cemento BE-25

Característica	Unidad	Valor
MR inicial (Módulo Resiliente)	MPa	4205.8
MR final (Módulo Resiliente)	MPa	2102.9
Módulo de Ruptura	MPa	0.73

Fuente: Datos calculados.

La razón de Poisson recomendada para la base estabilizada según la literatura es de 0.25. (Castro, 2017)

## Mezcla Asfáltica

Las características de la mezcla asfáltica se determinaron con información de proveedores de la zona, por lo que son datos muy significativos y adaptados a la zona del cantón. El módulo resiliente utilizado es 450 000 psi, ya que es muy común en las mezclas asfálticas que se desarrollan en la zona.

Cuadro 5. Características de Mezcla Asfáltica		
Característica	Unidad	Valor
%Acumulado retenido en tamiz 3/4	%	0
%Acumulado retenido en tamiz 3/8	%	19.5
%Acumulado retenido en tamiz N°4	%	51.3
% Pasando la N°200	%	6.1
%Contenido de Vacíos de Aire	%	4
%Contenido efectivo de Asfalto	%	5.56
Tipo de Asfalto		AC-30

Fuente: Datos proporcionados por proveedores de la zona confidencialmente.

La razón de Poisson recomendada para la mezcla asfáltica según la literatura es de 0.35. (Castro, 2017)

## Concreto Hidráulico

El concreto necesario para las losas del pavimento rígido debe cumplir con una resistencia de 320 kg/cm<sup>2</sup> ya que la U.T.C.V. la requiere así para el tipo de carretera que se interviene.

El módulo de elasticidad es calculado con la correlación  $5700 * (f'c)^{0.5}$ , con base en la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días. (Castro, 2017)

El módulo de ruptura es calculado con la correlación  $(43.5 * \frac{Mr}{10^6}) + 488.5$ , el cual se basa

en el módulo resiliente del concreto. (Castro, 2017)

Cuadro 6. Características del Concreto		
Característica	Unidad	Valor
Resistencia a los 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	320
Modulo Resiliente	MPa	26,514
Modulo de Ruptura	MPa	3.39

Fuente: Datos calculados.

## Metodología AASHTO 93 para Pavimentos Flexibles y Semi-Rígidos

Para aplicar la metodología empírica de diseño AASHTO 93, se siguió el siguiente procedimiento, aplicado a una hoja electrónica confeccionada por José Murillo Barboza, realizado con el programa computacional de Microsoft denominado Excel, esto con el fin de facilitar los cálculos.

El procedimiento para diseñar es el siguiente:

- Se definieron los módulos de resiliencia de los materiales por utilizar para carpeta asfáltica (ver figura A-4, Anexos), base (ver figura A-2, Anexos), base estabilizada con cemento (ver figura A-3, Anexos), sub-base (ver figura A-2, Anexos), y sub-rasante por medio de la correlación ( $MR = 1500 \cdot CBR$ ). CRB de 8.6%. Utilizando los nomogramas que facilita la guía de diseño AASHTO 93.

Cuadro 7. Módulos resilientes determinados para los materiales en la capa de pavimento a diseñar.		
Material	Módulo Resiliente	
	(psi)	(MPa)
Sub-rasante	12900.00	88.94
Sub-base	14780.00	101.90
Base Granular	29110.00	200.71
Base estabilizada con cemento	610000.00	4205.80
Mezcla Asfáltica	450000.00	3102.64

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.

- Cálculo de ejes equivalentes de diseño (EEQ de diseño):
- Calcular el TPD de cada tipo de vehículo: Livianos, Buses, Carga liviana, C2, C3, C4 y T2-S3.

El cual se obtuvo por medio de un contador neumático facilitado por LanammeUCR y el cuál clasifica los tipos de vehículos. (figura A-8, anexos)

La medición fue realizada desde el 22 de agosto del 2016 a las 2:56 pm hasta el lunes 29 de agosto del 2016 a las 3:08 pm. El TPD fue de 5233.

- Obtener el factor camión de cada tipo de vehículo.

Cuadro 8. Factores camión utilizados según normativa nacional.	
Tipo de Vehículo	Factor Camión
Livianos	0.001
Carga Liviana	0.020
C2	0.630
C3	1.280
Buses	1.710
C4	1.000
T3-S2	2.380

Fuente: Oficio DVOP-5170-07 y Publicación especial LM-PI-GM-INF-22-14.

- Al multiplicar el TPD por el factor camión, se obtuvieron como resultado los ejes equivalentes diarios (EEQ diarios) por tipo de vehículo.
- Multiplicando los EEQ diarios por el número de días del año (365 días), se obtuvieron los ejes equivalentes anuales (EEQ anuales).
- Con la tasa de crecimiento anual, se puede estimar cuál es el factor de crecimiento total de la población al último año del periodo de diseño. La tasa de crecimiento utilizada por la Municipalidad de Pérez Zeledón es del 3 % y el factor de crecimiento se calcula según la siguiente ecuación dada en la guía de AASHTO 93, la cual es:

$$FC = \frac{(1 + g)^n - 1}{g}$$

FC= Factor de crecimiento  
g= porcentaje de crecimiento  
n= periodo de diseño

- Es necesario multiplicar EEQ anual por el factor de crecimiento en el periodo de diseño, con lo que se obtuvieron los ejes

equivalentes al último año del periodo de diseño.

- En los tramos que la carretera sea bidireccional se debe considerar un factor de dirección: 50% y para los tramos de una sola dirección 100%  
Utilizando los criterios de la guía AASHTO 93.
- En los tramos que la calle cuenta con carril en un sentido, se consideró un factor carril de 100% y para los tramos con dos carriles en una dirección 90% Para dos carriles en una dirección se consideró 90% y para un carril por sentido 100%.  
Utilizando los criterios de la guía AASTHO 93.
- Al multiplicar EEQ al periodo de diseño por los factores carril y dirección, se obtuvo los ejes equivalentes de diseño.
- Finalmente, se suma el total de EEQ de diseño de los tipos de vehículos.

- Establecer nivel de confianza (R).

Se utiliza de guía el *Oficio DVOP-5170-07*, en este caso se tomaron las zonas como rutas primarias con un TPD mayor a 2000, dando un nivel de confianza de 90 % (ver tabla A-1, Anexo), ya que la Calle 1 es una arteria muy importante en el centro de la ciudad.

- Definir la desviación estándar (So).

Se va a utilizar la sección 4.3 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASHTO 93* denominada *Criterios para la selección de la desviación estándar*, dando como recomendación para pavimentos flexibles y semi-rígido un valor intermedio entre 0,4 y 0,5, por lo que se utilizará el promedio, o sea una  $So=0,45$ .

- Definir índices de servicialidad inicial (PSIi) y final (PSIf).

Según la sección 2.2.1 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASHTO 93* denominada *Servicialidad*, para las investigaciones realizadas se usó un  $P_i$  de 4,2 para pavimentos flexibles, por lo que se va a utilizar ese valor y para el semi-rígido 4.3.

Para establecer el índice de servicio final se utilizó el *Oficio DVOP-5170-07* de Pedro Castro,

específicamente la tabla 2 denominada *Niveles de confianza e índices terminales de servicio*.

En esta se tomaron las zonas como rutas primarias con un TPD mayor a 2000, dando un nivel de confianza de 90 % y, por lo tanto, un índice de servicio final de 2,5. (ver tabla A-1, Anexos)

- Establecer un periodo de diseño (T).

En todos los diseños se utilizó un periodo de diseño de 20 años, esto tomando en cuenta la sección 4.1.1 de la *Publicación Especial LM-PI-GM-INF-22-14* de LANAMME, en donde se recomienda un periodo entre los 15 y 20 años para una ruta urbana de alto volumen (ver tabla A-2, Anexos). También tomando en cuenta que la ruta es muy importante y no se quiere estar interviniéndola en un plazo muy temprano, por lo que se decide este periodo en específico.

- Obtener el estadístico ( $Z_r$ ) en función del nivel de confianza (R).

Se utilizó un  $Z_r = -1,282$ , debido a que la confiabilidad será del 90 %, esto tomado de la tabla 4.1 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASHTO 93* (ver tabla A-3, Anexos).

- Obtener los coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  respectivamente.

Para carpeta asfáltica (ver figura A-4, Anexos), base (ver figura A-2, Anexos), base estabilizada con cemento hidráulico (ver figura A-3, Anexos) y sub-base (ver figura A-2, Anexos). Utilizando los nomogramas que facilita la guía de diseño AASHTO 93.

Cuadro 9. Coeficientes estructurales determinados según AASHTO 93.	
Material	Coficiente Estructural
Sub-base	0.108
Base Granular	0.132
Base estabilizada con cemento hidráulico	0.158
Mezcla Asfáltica	0.442

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.

- Obtener el coeficiente de drenaje para la base y la sub-base:  $m_2$ ,  $m_3$  respectivamente.

Para la obtención del coeficiente del drenaje de la base granular ( $m_2$ ) y el coeficiente de drenaje ( $m_3$ ), se utilizó la tabla 2.4 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASHTO 93* denominada *Coficiente de drenaje recomendado para ajustar los coeficientes de capas estructurales de materiales de base y sub-base en pavimentos flexibles* (ver tabla A-4, Anexos).

Se tomó un coeficiente  $m_2$  y  $m_3$  iguales a 1, debido a que generalmente en Costa Rica más del 25 % del tiempo la estructura de pavimento se mantiene expuesta a condiciones de humedad y, además, una condición de drenaje buena, debido a que se trata de pavimentos nuevos en donde se espera que cuenten con cunetas y buenos sistemas de drenaje; pero siempre considerando que existe una afectación de la lluvia al ser material granular en contacto con humedad.

- Se determinó el número estructural (SN) mediante el método numérico de bisección y utilizando la ecuación dada en la guía AASHTO 93.

$$\log(W18) = Z_R * S_o + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 4.5}\right)}{\frac{1094}{0.4 + (SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log(M_R) - 8.07$$

$W_{18}$ : Número de repeticiones del eje simple de 18 kips.  
 $Z_R$ : Desviación normal estándar correspondiente a la confiabilidad.  
 $S_o$ : Desviación estándar total.  
 $SN$ : Número estructural de la capa calculada.  
 $\Delta PSI$ : Degradación del PSI considerada para el diseño.  
 $p_i$ : Servicialidad final del pavimento.  
 $M_R$ : Módulo de resiliencia de la capa calculada (psi).

- Calcula el valor de Log (W18) con base en los EEQ al periodo de diseño.
- Es necesario establecer un intervalo inicial para el valor de SN esperado (SNlow; SNmax).
- Calcula el valor promedio SN del intervalo establecido (SNprom).

- Con el nuevo SN promedio establecido, se calcula el valor de Log(W18).
- Calcula la sustracción de Log(W18) del valor promedio de SN, menos Log(W18) inicial.
- Si la diferencia anterior es menor que 0,0001, se concluyen las iteraciones.
- Si el resultado de calcular la sustracción de Log(W18) del valor promedio de SN menos Log(W18) inicial es positivo, el nuevo intervalo se comprende por (SNlow; SNprom).
- Si el resultado de calcular la sustracción de Log(W18) del valor promedio de SN menos Log(W18) inicial es negativo, el nuevo intervalo se comprende por (SNprom; SNmax)
- Se calcula el espesor de la carpeta asfáltica dividiendo número estructural de la carpeta asfáltica (SN1), entre el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica ( $a_1$ ). Redondear el espesor hacia un número mayor entero.
- Se calcula el nuevo SN1\*, multiplicando el espesor redondeado de la carpeta asfáltica por el coeficiente estructural.

$$Espesor = \frac{SN1}{a_1}$$

- Se calcula el espesor de la base, dividiendo la diferencia del SN2 menos el nuevo SN1\*, entre el coeficiente estructural de la base ( $a_2$ ) multiplicado por el coeficiente de drenaje de la base ( $m_2$ ). Se redondea hacia un número mayor y entero.

$$Espesor = \frac{(SN2 - SN1^*)}{(a_2 * m_2)}$$

- Se calcula el nuevo SN2\*, multiplicando el espesor redondeado de la base por el coeficiente estructural  $a_2$ .
- Se calcula el espesor de la sub-base, dividiendo la diferencia del SN3 menos el nuevo SN2\*, entre el coeficiente estructural de la sub-base ( $a_3$ ) multiplicado por el coeficiente de drenaje de la sub-base ( $m_3$ ). Se redondea hacia un número mayor y entero.

$$Espesor = \frac{(SN3 - SN2^*)}{(a_3 * m_3)}$$

- El número estructural SN total de las capas determinadas debe ser mayor al SN

requerido para que se pueda considerar un diseño satisfactorio.

## Metodología AASHTO 93 para Pavimentos Rígidos

Para aplicar la metodología empírica de diseño AASHTO 93 en pavimentos rígidos, se siguió el siguiente procedimiento, aplicado a una hoja electrónica confeccionada por José Murillo, realizado con el programa computacional de Microsoft denominado Excel, esto con el fin de facilitar los cálculos.

El procedimiento para diseñar es el siguiente:

- Se definieron los módulos de resiliencia y elasticidad de los materiales por utilizar para concreto hidráulico (ver cuadro 6), base (ver figura A-2, Anexos), y subrasante por medio de la correlación ( $MR = 1500 \cdot CBR$ ). CBR DE 8.6%. Utilizando los nomogramas que facilita la guía de diseño AASHTO 93.

Cuadro 10. Módulos resilientes determinados para los materiales en la capa de pavimento a diseñar para pavimento rígido.		
Material	Módulo Resiliente	
	(psi)	(MPa)
Sub-rasante	12900.00	88.94
Base Granular	29110.00	200.71
Concreto	3,845,477.02	26513,63

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures y correlaciones.

- Cálculo de ejes equivalentes de diseño (EEQ de diseño):
- Calcular el TPD de cada tipo de vehículo: Livianos, Buses, Carga liviana, C2, C3, C4 y T2-S3.  
El cual se obtuvo por medio de un contador neumático facilitado por LanammeUCR y el cuál clasifica los tipos de vehículos. (figura A-8, anexos)  
La medición fue realizada desde el 22 de agosto del 2016 a las 2:56 pm hasta el lunes 29 de agosto del 2016 a las 3:08 pm.  
El TPD fue de 5233.
- El factor camión de cada tipo de vehículo para pavimento rígido se obtuvo de los utilizados para el diseño de la carretera Cañas-Liberia por CONAVI

Cuadro 11. Factores camión utilizados para pavimento rígido.	
Tipo de Vehículo	Factor Camión
Livianos	0.001
Carga Liviana	0.010
C2	0.630
C3	1.710
Buses	3.050
C4	1.000
T3-S2	3.170

Fuente: CONAVI, Cañas-Liberia.

- Al multiplicar el TPD por el factor camión, se obtuvo como resultado los ejes equivalentes diarios (EEQ diarios) por tipo de vehículo.
- Multiplicando los EEQ diarios por el número de días del año (365 días), se obtuvo los ejes equivalentes anuales (EEQ anuales).
- Con la tasa de crecimiento anual, se estimó cuál es el factor de crecimiento total de la población al último año del periodo de diseño. El porcentaje de crecimiento utilizada por la Municipalidad de Pérez Zeledón es del 3% y el factor de crecimiento se calcula según la siguiente ecuación dada en la guía de AASHTO 93, la cual es:

$$FC = \frac{(1 + g)^n - 1}{g}$$

FC= Factor de crecimiento  
g= porcentaje de crecimiento  
n= periodo de diseño

- Multiplicando EEQ anual por el factor de crecimiento en el periodo de diseño, se obtuvo los ejes equivalentes al último año del periodo de diseño.
- En los tramos que la carretera sea bidireccional se debe considerar un factor de dirección: 50% y para los tramos de una sola dirección 100%  
Utilizando los criterios de la guía AASHTO 93.
- En los tramos que la calle cuenta con carril en un sentido, se consideró un factor carril de 100% y para los tramos con dos carriles en una dirección 90% Para dos carriles en una dirección se consideró 90% y para un carril por sentido 100%.

Utilizando los criterios de la guía AASTHO 93.

- Al multiplicar EEQ al periodo de diseño por los factores carril y dirección, se obtuvieron los ejes equivalentes de diseño.
- Finalmente, se suma el total de EEQ de diseño de los tipos de vehículos.

- Establecer nivel de confianza (R).

Se utiliza de guía el *Oficio DVOP-5170-07*, en este caso se tomaron las zonas como rutas primarias con un TPD mayor a 2000, dando un nivel de confianza de 90 % (ver tabla A-1, Anexo), ya que la Calle 1 es una arteria muy importante en el centro de la ciudad.

- Definir la desviación estándar (So).

Se va a utilizar la sección 4.3 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASTHO 93* denominada *Criterios para la selección de la desviación estándar*, para el pavimento rígido un valor entre 0.3-0.4, por lo que se utilizará 0.35.

- Definir índices de servicialidad inicial (PSIi) y final (PSIf).

Según la sección 2.2.1 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASTHO 93* denominada *Servicialidad*, para pavimento rígido se recomienda 4.5.

Para establecer el índice de servicio final se utilizó el *Oficio DVOP-5170-07* de Pedro Castro, específicamente la tabla 2 denominada *Niveles de confianza e índices terminales de servicio*.

En esta se tomaron las zonas como rutas primarias con un TPD mayor a 2000, dando un nivel de confianza de 90 % y, por lo tanto, un índice de servicio final de 2,5. (ver tabla A-1, Anexos)

- Establecer un periodo de diseño (T).

En todos los diseños se utilizó un periodo de diseño de 20 años, esto tomando en cuenta la sección 4.1.1 de la *Publicación Especial LM-PI-GM-INF-22-14* de LANAMME, en donde se recomienda un periodo entre los 15 y 20 años para una ruta urbana de alto volumen (ver tabla A-2, Anexos). También tomando en cuenta que la ruta es muy importante y no se quiere estar interviniéndola en un plazo muy temprano, por lo que se decide este periodo en específico.

- Obtener el estadístico (Zr) en función del nivel de confianza (R).

Se utilizó un  $Z_r = -1,282$ , debido a que la confiabilidad será del 90 %, esto tomado de la tabla 4.1 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASTHO 93* (ver tabla A-3, Anexos).

- Obtener el coeficiente de drenaje para el pavimento (Cd)

Para la obtención del coeficiente del drenaje de la base granular (Cd), se utilizó la tabla 2.4 de la *Guía para Diseño de Pavimentos de la AASTHO 93* denominada *Coeficiente de drenaje (Cd) recomendado para pavimentos rígidos* (ver tabla A-5, Anexos).

Se tomó un coeficiente Cd igual a 1, debido a que en Costa Rica generalmente más del 25 % del tiempo la estructura de pavimento se mantiene expuesta a condiciones de humedad y, además, una condición de drenaje buena, debido a que se trata de pavimentos nuevos en donde se espera que cuenten con cunetas y buenos sistemas de drenaje; pero siempre considerando que existe una afectación de la lluvia al ser material granular en contacto con humedad.

- Determinar el coeficiente de transmisión de carga (J), para el proyecto.

Con la ayuda de la tabla 2.6 de la guía AASTHO 93 (ver tabla A-6, Anexos), se determina que el coeficiente de transmisión de carga es 3.2, ya que el pavimento rígido es de tipo JPCP y no cuenta con espaldones a los costados, pero sí con dovelas entre las losas.

- Las características del concreto como lo son el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura se calcularon con las siguientes ecuaciones recomendadas por Pedro Castro en su material de clase.

$$S'c = C * (f'c)^{0.5}$$

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

$f'c$  = resistencia del concreto a compresión en 28 días.

$S'c$  = Módulo de rotura.

$E_c$  = Módulo de elasticidad.

El pavimento utilizaría una resistencia de 320 kg/cm<sup>2</sup>.



- Obtener el módulo de reacción de la subrasante de correlaciones dadas por FHWA.

- Se determinó con la siguiente ecuación el módulo de reacción de la subrasante.

$$\ln(k_{\infty}) = -2.807 + 0.1253 * (\ln(D_{SB}))^2 + 1.062 * \ln(M_r) + 1.1282 * \ln(D_{SB}) * \ln(E_{SB}) - 0.4114 * \ln(D_{SB}) - 0.0581 * \ln(E_{SB}) - 0.1317 * \ln(D_{SB}) * \ln(M_r)$$

- Es necesario corregir el módulo de reacción de la subrasante, si el estrato estuviera a no más de 10 ft, con la siguiente ecuación.

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

k<sub>rf</sub> = Módulo compuesto de reacción de la sub-rasante considerando capa rígida si fuera necesario. (psi/plg).

k<sub>∞</sub>=Módulo compuesto de reacción de la sub-rasante considerando fundación semi-infinita (psi/plg).

D<sub>sb</sub> = Espesor propuesto de sub-base/base (plg).

D<sub>sg</sub> = Profundidad desde la superficie a la capa rígida (plg).

M<sub>r</sub> = Módulo elástico (resiliente) de la sub-rasante (psi).

- Se determino el factor de daño con la ecuación.

$$u_{ri} = \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k_i}\right)^{0.25}} \right]^{(4.22-0.32*p_t)}$$

u<sub>ri</sub> = Factor de daño relativo.

k<sub>i</sub> = Módulo de reacción de la subrasante.

D = Espesor de losa (plg).

E<sub>c</sub> = Módulo elástico del concreto (psi).

p<sub>t</sub> = Índice de servicio final del pavimento.

$$k_{eff} = \frac{E_c}{\left[ \frac{18.42}{D^{0.75} - \left(\frac{1}{\overline{u_r}}\right)^{(4.22-0.32*p_t)}} \right]^4}$$

k<sub>rf</sub> = Módulo compuesto de reacción de la subrasante considerando capa rígida si fuera necesario. (psi/plg).

k<sub>∞</sub>=Módulo compuesto de reacción de la subrasante considerando fundación semi-infinita (psi/plg).

D<sub>sg</sub> = Profundidad desde la superficie a la capa rígida (plg).

M<sub>r</sub> = Módulo elástico (resiliente) de la subrasante (psi).

- También se corrigió por pérdida potencial de soporte de la sub-rasante, esto con la figura 3.6 de la guía AASTHO 93. (Ver figura A-5, Anexos)
- Se cálculo del espesor de la losa por medio de método número de bisección utilizando la ecuación dada por la guía:

$$\log(W_{18}) = Z_r * S_o + 7.35 * \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 * p_t)$$

$$* \log \left[ \frac{S'_c * C_d * (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 * J * \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right]$$

W18: Número de repeticiones del eje simple de 18 kips.

Zr: Desviación normal estándar correspondiente a la confiabilidad.

So: Desviación estándar total.

D: Espesor de la losa del concreto hidráulico (plg).

ΔPSI: Degradación del PSI considerada para el diseño.

pt: Servicialidad final del pavimento.

S'c: Módulo de rotura del concreto (psi).

- Calcula el valor de Log (W18) con base en los EEQ al periodo de diseño.
- Establecer un intervalo inicial para el valor de D esperado (D bajo; D alto).
- Calcula el valor promedio D del intervalo establecido (D promedio).
- Con el nuevo D promedio establecido, calcula el valor de Log(W18).
- Calcula la sustracción de Log(W18) del valor promedio de D, menos Log(W18) inicial.
- Si la diferencia anterior es menor que 0,0002, se concluyen las iteraciones.
- Si el resultado de calcular la sustracción de Log(W18) del valor promedio de SN menos Log(W18) inicial es positivo, el nuevo intervalo se comprende por (D bajo; D promedio).
- Si el resultado de calcular la sustracción de Log(W18) del valor promedio de SN menos Log(W18) inicial es negativo, el nuevo intervalo se comprende por (D promedio; D alto).

## Diseño de Acero de Refuerzo

Por ser una calle importante para el cantón y con un tránsito alto, se decide que es necesaria la utilización de dovelas para que las cargas se transmitan de mejor manera en las losas adyacentes y no genere fallas tempranas en las mismas.

La Asociación de Concreto Portland (PCA siglas en inglés) desarrolló la metodología para determinar las dovelas y barras de amarre requeridas en los pavimentos rígidos. A continuación, se describen los pasos a seguir para la revisión.

Contribución relativa de una dovella según Castro (2017) "se entiende como la fracción de carga total aplicada que es tomada por cada dovella en función de su ubicación especial respecto al punto de carga". (p.17)

Esta contribución disminuye conforme las dovelas se alejen de la carga aplicada para el diseño.

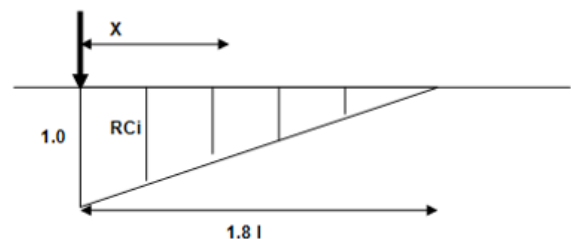


Figura 13. Ejemplo gráfico de la reducción de contribución relativa en las dovelas.

Fuente: Castro, P. 2017

Es necesario calcular la rigidez relativa para la losa de concreto que se esté analizando se realizó con la siguiente ecuación:

$$l = \sqrt[4]{\frac{MR_1 * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}}$$

MR<sub>i</sub>: Módulo resiliente del concreto (psi).  
 h: Espesor de la losa (in).  
 μ: Razón de Poisson para la losa de concreto.  
 k: Módulo efectivo final de la sub-rasante (pci).

Y la ecuación para determinar la contribución relativa es:

$$\frac{RC_i}{1.8l - x} = \frac{1}{1.8l}$$

RC<sub>i</sub>: Contribución relativa de la dovela en estudio.  
 l: Rigidez relativa de la losa.  
 x: Distancia de la carga a la dovela en estudio.

Al determinar las contribuciones calculadas para cada dovela, se calculó la fracción de carga que estas reciben y poder evaluar la más crítica.

$$Pd_i = \frac{P}{ND} * RC_i$$

Pd<sub>i</sub>: Fracción de carga en la dovela estudiada.  
 ND: Número de dovelas activas, es la suma de las contribuciones relativas de las dovelas.

El esfuerzo aplicado en la dovela por la carga es necesario para compararlo con la resistencia propia que tiene la dovela, por lo cual esta variable se calculó de la siguiente manera:

$$\sigma_b = \frac{K_d * Pd_i}{4 * \beta^3 * EI} * [2 + \beta * Z]$$

σ<sub>b</sub>: Esfuerzo aplicado en la dovela por las cargas vehiculares.  
 K<sub>d</sub>: módulo de iteración dovela-concreto (pci). Valor típico 700000 pci.  
 E: Módulo de rigidez del acero (psi). Valor teórico 29x10<sup>6</sup>.  
 i: Momento de inercia de la dovela (in<sup>4</sup>).

$$I = \pi * \frac{b^4}{64}$$

z: Ancho de junta (in). Valor común 0.2.  
 b: Diámetro de la dovela. (in)

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

Resistencia de la dovela (Iteración Dovela-Concreto)

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

f<sub>b</sub>: Resistencia a la falla por compresión (psi).  
 f'<sub>b</sub>: Resistencia a la falla por compresión simple del concreto a los 28 días (psi).

Y el criterio para concluir si la dovela cumple o no los requerimientos es:

$$\sigma_b \leq f_b$$

Es importante recordar que en el inicio de este cálculo se debe asumir un diámetro y separación de la dovela y este se revisa con todos los criterios expuestos anteriormente.

Para el proyecto se determinó asumir una barra de acero número seis con espaciamiento cada 25 cm, por lo que el diámetro de la varilla es 0.75.

## Barras de Amarre

Para mejorar y asegurar la resistencia a esfuerzos de fricción de las losas y aportar transferencia de carga entre losas, se utilizan las barras de amarre en las juntas longitudinales con otra losa o con espaldones de concreto.

Es importante considerar que la expresión para área de acero en sección longitudinal está dada cada 1 ft (30 cm) lineal entre juntas:(Castro, P, 2017)

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

A<sub>s</sub>: Área de acero en sección transversal por 1 ft.  
 γ<sub>c</sub>: Peso unitario del concreto hidráulico (pci) (2500 kg/m<sup>2</sup> = 150 pcf = 0.0868 pci)  
 h: espesor de la losa  
 L': Distancia mínima de la junta al borde libre.  
 f<sub>a</sub>: factor de fricción losa /capa de soporte. Valor típico 1.5  
 f<sub>s</sub>: Resistencia de trabajo del acero (27000 psi para grado 40)

## Metodología Mecánica-Empírica para Pavimentos Flexibles y Semi-Rígidos

Para la aplicación de esta metodología, se utilizó la interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME de LanammeUCR, creado por el Ing. Christopher Tejos, que se basa en la guía MEPDG, con tropicalización de algunas variables para que sea factible aplicarlo al país.

## Datos Generales

**Figura 14.** Recorte de Pantalla, Datos Generales "CR-ME".  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

En el cuadro *Proyecto*, se ingresó información propia que identifica el proyecto para el cual se realiza el diseño. En el cuadro *Características del proyecto*, se definen parámetros de diseño propios del diseño y que se requieren para el mismo.

- La velocidad operacional de los vehículos en el pavimento por diseñar fue de 30 km/h determinado por la U.T.G.V. de la municipalidad como velocidad operacional en la calle.
- El ancho de carril, 4 m, medidos en la calzada.
- Establecer el periodo de diseño del pavimento en años.

Se determinó 20 años de periodo de diseño considerando que la calle es muy transitada y es necesario tener un pavimento duradero.

- Evaluar si se toma en cuenta el zigzaguo lateral de los vehículos en carril.

No se toma en cuenta el zigzaguo lateral para hacer más conservador el diseño.

## Módulo de Tránsito

**Figura 15.** Recorte de Pantalla, Módulo de Tránsito CR-ME  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Cálculo de ejes equivalentes de diseño (EEQ de diseño). Se debe seguir los mismos pasos que en el cálculo de ejes equivalentes para AASHTO 93.

Si se desea, se puede ingresar información y el programa calculará los ejes equivalentes.

Se ingresa un factor incremental de la cantidad de ejes equivalentes, este factor está en función de la credibilidad de los datos y es propuesto a criterio del diseñador.

Finalmente, se hace clic en el botón *Calcular ESAL* y luego en el botón *Guardar*.

## Módulo de Clima

Mes	Índice de Thornthwaite (TMI)	Temperatura promedio mensual (oC)
Enero	-51.3	25.6
Febrero	-46.9	26.1
Marzo	-48.9	26.7
Abril	-14.6	26.7
Mayo	136.4	26.1
Junio	128.7	25.8
Julio	108.3	25.6
Agosto	165.5	25.7
Setiembre	209.2	25.5
Octubre	268.3	25.3
Noviembre	155.3	25.4

Guardar

**Figura 16.** Recorte de Pantalla. Módulo de Clima CR-ME.  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- En este módulo se debe determinar las temperaturas promedio de cada región.
- Calcular el índice de Thornthwaite
- Determinar la precipitación mensual. (figura A-9, anexos)
- Determinar la temperatura media ( $tm_j$ ) por mes. (figura A-10, anexos)

Con datos de referencia del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, se pudo determinar los datos de precipitación del centro de San Isidro y se utilizó de referencia el historial de las temperaturas de Pindeco, Buenos Aires que era el más próximo al que se tenía acceso. El cual tiene características y temperaturas similares a las presentadas en el sitio donde se piensa construir el pavimento. (Ver registro de temperatura y precipitación en anexos)

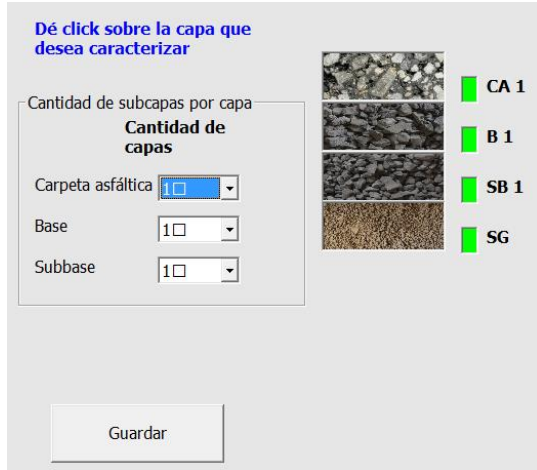
- Calcular el índice de calor ( $I_j$ ) por mes
- Calcular el parámetro  $a$
- Calcular la evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)
- Corregir la evaporación mensual tomando como base un mes de 30 días.
- Estimar la cantidad de almacenamiento, hasta un máximo de 100 mm.

- Se toma el almacenamiento del mes anterior ( $A_i$ )
- Se suma la precipitación del mes actual ( $P_j$ ).
- Se resta la evapotranspiración del mes actual ( $e_j$ ).
- Si el resultado es mayor que 100, se escribe 100 si es menor que 0, se escribe 0.
- Estimar la cantidad exceso o déficit en mm.
- Se toma el almacenamiento actual ( $A_i$ ).
- Se suma la precipitación actual ( $P_i$ ).
- Se resta la evapotranspiración ( $e_i$ ).
- Si el resultado anterior es mayor que 100, entonces existe un excedente (E), si es menor que 0, existe un déficit (D).
  - Calcular el índice de Thornthwaite (TMI)

Mes	Temperatura (°C)			Lluvia (mm)	Días con lluvia (mm)	TMI
	Max.	Min.	Med.			
ENE	31.9	19.3	25.6	17.8	3	-51.3
FEB	33.1	19.1	26.1	25.9	3	-46.9
MAR	33.5	19.9	26.7	26.4	4	-48.9
ABR	32.4	21	26.7	104.4	9	-14.6
MAY	31	21.3	26.1	311.3	18	136.4
JUN	30.4	21.2	25.8	279.9	17	128.7
JUL	30.2	20.9	25.6	256.3	18	108.3
AGO	30.5	20.9	25.7	331.2	19	165.5
SET	30.4	20.7	25.5	363.2	19	209.2
OCT	29.8	20.8	25.3	434.9	21	268.3
NOV	29.8	20.9	25.4	295.8	18	155.3
DIC	30.7	20.3	25.5	89.2	8	0.0

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional y Cálculos Propios.

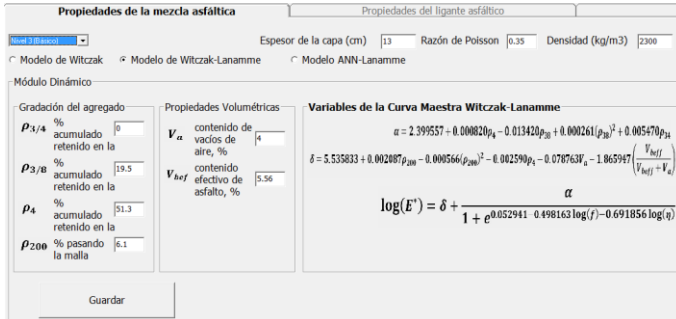
## Módulo de Materiales



**Figura 17.** Recorte de Pantalla, Módulo de Materiales CR-ME.  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

En las cajas de opciones se selecciona la cantidad de capas que se desea diseñar para cada tipo de capa.

## Carpeta asfáltica



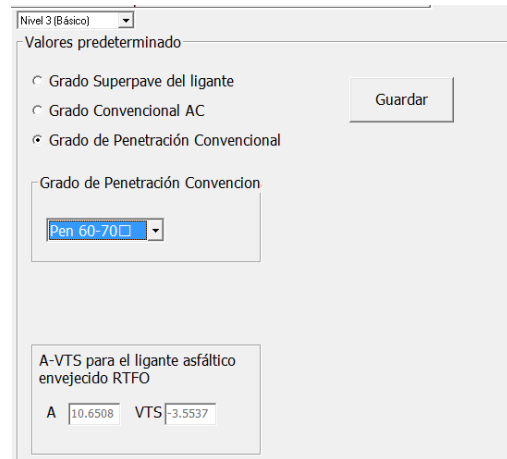
**Figura 18.** Recorte de Pantalla, Información de la Carpeta Asfáltica Parte 1 CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Ingresar el valor de espesor de la carpeta asfáltica en centímetros.
- Ingresar el valor de la razón de Poisson de la carpeta asfáltica.
- Ingresar el valor de la densidad de la carpeta asfáltica, el programa tiene predeterminado un valor de 2300 kg/m<sup>3</sup>
- Seleccionar el método mediante el cual se calcula el Módulo Dinámico. Se

recomienda el modelo Witczak-Lanamme, ya que la ecuación se encuentra calibrada para Costa Rica.

- Ingresar datos de la granulometría del agregado de la mezcla para la carpeta asfáltica. Se solicita el ingreso de los porcentajes retenidos en los tamices “3/4”, “3/8”, “#4” y el porcentaje pasando el tamiz “#200”.
- Ingresar datos acerca del porcentaje de vacíos de aire y porcentaje de volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla para la carpeta asfáltica.



**Figura 19.** Recorte de Pantalla, Información de la Carpeta Asfáltica Parte 2 CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Seleccionar el método de clasificación del ligante asfáltico.
- Para el caso de *Grado de Penetración Convencional* se requiere ingresar el grado de penetración del ligante, ya que al utilizar otro tipo de grado el software tiene problemas para calcular el módulo.
- Los datos A-VTS son automáticos, una vez seleccionado el ligante dar clic en *Guardar*.

$$\log E^* = 5.535833 + 0.002087\rho_{200} - 0.000566(\rho_{200})^2 - 0.002590\rho_4 - 0.078763V_a - 1.865947\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + \frac{2.399557 + 0.000820\rho_4 - 0.013420\rho_4 + 0.000261(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(0.052941+0.498163 \log(f)-0.691856 \log(n))}}$$

Ecuación calibrada del modelo de predicción de módulo de mezcla asfáltica. (Badilla, E, 2007)

$E^*$  = módulo dinámico, psi.

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

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left( \frac{1}{\text{sen}\delta} \right)^{4.8628}$$

f = frecuencia de carga, Hz.

$V_a$  = Contenido de vacíos de aire. %

$V_{beff}$  = Contenido de asfalto efectivo, % por volumen

$\rho_{34}$  = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg)

$\rho_{38}$  = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9.53 mm (3/8 pulg)

$\rho_4$  = Porcentaje retenido acumulado en la malla N° 4

$\rho_{200}$  = Porcentaje retenido acumulado en la malla N° 200

- Se ingresa la razón de Poisson de la capa "base".
- Para el nivel 3 y para una base granular se ingresa el porcentaje pasando el tamiz # 200.
- Se ingresa el valor del índice de plasticidad.
- Se ingresa información de la gravedad específica del material de la base granular.
- Se ingresa la densidad seca máxima del material por utilizar en la base.
- Se ingresan datos de la humedad óptima del material por utilizar en la base.
- Se ingresa el valor del CBR óptimo característico del material por utilizar en la base, con el cual se calcula automáticamente el módulo resiliente.

## Base granular

**Figura 20.** Recorte de Pantalla, Información de la Base Granular CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Se ingresa el espesor de la capa "base" en centímetros.

## Base Estabilizada con Cemento Hidráulico

**Figura 21.** Recorte de Pantalla, Información de la Base Estabilizada con Cemento CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Para el nivel 3 seleccionado y para una base estabilizada con cemento, se ingresa el módulo resiliente inicial. El cual se determina según la correlación de resistencia a la compresión y el nomograma dado por AASHTO 93 (ver figura A-3, Anexos)
- Se ingresa el módulo resiliente final. En este caso no existe un criterio establecido, por lo que se consulta a expertos en el área de pavimentos y se sugiere utilizar el 50 % del módulo inicial.
- Se ingresa el módulo de ruptura.

El cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$S'c = 0.51 * (f'c)^{0.88}, \text{ en psi}$$

Fuente: ACI 230.1 R

## Sub-Base

**Figura 22.** Recorte de Pantalla, Información de Sub-Base CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Ingresar el espesor de la capa sub-base.
- Ingresar el valor de la razón de Poisson de la sub-base.
- Para el nivel 3 seleccionado, ingresar el porcentaje pasando el tamiz #200 del material de sub-base.
- Ingresar el valor del índice de plasticidad.
- Ingresar el valor de la gravedad específica del material de sub-base.
- Ingresar el valor para la densidad seca máxima del material de sub-base.

- Ingresar el valor del porcentaje de humedad óptimo del material de sub-base.
- Ingresar el CBR óptimo del material seleccionado en la sub-base, automáticamente se calcula el módulo resiliente de la sub-base.

## Sub-Rasante

**Figura 23.** Recorte de Pantalla, Información de Sub-Rasante CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Ingresar la profundidad a la que se encuentra la roca firme en el proyecto donde se requiere el diseño. (Al no tener un ensayo de penetración estándar u otro que llegue a estratos profundos, se sugiere el uso de 10 m.).
- Ingresar el valor de la razón de Poisson de la subrasante.
- Ingresar el porcentaje que pasa por el tamiz #200 del material de la sub-rasante.
- Ingresar el índice de plasticidad del material de la subrasante.
- Ingresar la gravedad específica del material de la sub-rasante.
- Ingresar el valor de la densidad seca máxima correspondiente al material de la subrasante.
- Ingresar el valor de la humedad óptima para el material de la sub-rasante.
- Ingresar el valor del CBR óptimo para la sub-rasante, automáticamente se calcula el módulo resiliente correspondiente a la subrasante.



## Módulo de Desempeño

Criterios de aceptación		
	Valor límite	Confiabilidad (%)
Agrietamiento longitudinal (pies/milla)	2000	90
Área agrietada (%)	25	90
Ahuellamiento Carpeta asfáltica (mm)	12.5	90
Ahuellamiento total (mm)	17.5	90

**Figura 24.** Recorte de Pantalla, Criterios de aceptación CR-ME

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

- Para el agrietamiento longitudinal, ingresar el valor límite de grietas en (pies/milla) y su nivel de confiabilidad. Se sugiere que el límite máximo sea de 2000 pies/milla
- Para el área agrietada, ingresar el valor límite en porcentaje del área agrietada y su nivel de confiabilidad. Para pavimentos con menos de 3,000,000 de ejes equivalentes el valor es de 75 % según *Publicación especial LM-PI-GM-INF-22-14*.
- Para el ahuellamiento de la carpeta asfáltica, ingresar el valor límite en milímetros de la deformación por ahuellamiento para la carpeta asfáltica.
- Para el ahuellamiento total, ingresar el valor límite en milímetros del ahuellamiento total y el porcentaje de confiabilidad. El valor establecido según *Publicación especial LM-PI-GM-INF-22-14*, para este caso es de 25 mm.

Para corroborar los datos ver Tabla A-8 y A-9 de la *Publicación especial LM-PI-GM-INF-22-14*

## Modelos de deterioro

### CARPETA ASFÁLTICA

- Agrietamiento de abajo hacia arriba y agrietamiento de arriba hacia abajo

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

$$C = 10^{4.84 \left[ \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right]}$$

Para abajo hacia arriba

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

Para arriba hacia abajo

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

Nf: Repeticiones al agrietamiento por fatiga.

εt: Deformación unitaria tangencial a la posición crítica (in/in).

Eca: Módulo dinámico (psi).

hac: Espesor de la carpeta asfáltica (in).

Va: Vacíos de aire (%).

Vb: Contenido de asfalto (% por volumen).

Las constantes dadas en la guía MEPDG son las siguientes:

kf1: 0.007566

kf2: -3.9492

kf3: -1.281

βf1: 1

βf2: 1

βf3: 1

- Ahuellamiento

$$\Delta p_{CA} = \beta_{1r} k_z \epsilon_r(CA) * 10^{k_{1r}} * n^{k_{2r}\beta_{2r}} * T^{k_{3r}\beta_{2r}} * h_{CA}$$

$$k_2 = (C_1 + C_2(D)) * 0.328196^D$$

$$C1: -0.1039 * hac^2 + 2.4868 * hac - 17.342$$

$$C2: 0.0172 * hac^2 - 1.7331 * hac + 27.428$$

εp: Deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga (in/in).

εr: Deformación vertical resiliente (in/in).

T: Temperatura de la mezcla (°F).

n: Número de repeticiones de carga.

kz: Parámetro de profundidad, calculado como:

Las constantes dadas en la guía MEPDG son las siguientes:

kr1: -3.35412  
kr2: 0.4791  
kr3: 1.5606  
βr1: 1  
βr2: 1  
βr3: 1

- Funciones de transferencia

De abajo hacia arriba

$$FC = \left( \frac{C_3}{1 + e^{(-c1*2c2+c2*c2*\log(D))}} \right) * \frac{1}{60}$$

D: Daño por fatiga de abajo hacia arriba (%)

Las constantes dadas en la guía MEPDG son las siguientes:

c1: 1  
c2: 1  
c3: 6000

De arriba hacia abajo

$$FC = \left( \frac{C_3}{1 + e^{(c1-c2*\log(D))}} \right) * 10.56$$

D: Daño por fatiga de arriba hacia abajo (%)

Las constantes dadas en la guía MEPDG son las siguientes:

c1: 7  
c2: 3.5  
c3: 1000

#### BASE Y SUB-BASE GRANULAR

- Ahuellamiento

$$\Delta p = \frac{\beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right)}{e^{\left( \frac{\rho}{n} \right)^\beta}$$

Δp: Deformación permanente para la capa/subcapa (in).

n: Número de repeticiones de carga.

εv: Deformación vertical elástica en la capa (in/in)

h: espesor (in).

ε0, β y ρ: Propiedades de los materiales.

εr: Deformación unitaria Resiliente obtenida en laboratorio para obtener las propiedades de los materiales listados arriba. (in/in).

εv: Deformación unitaria resiliente vertical (in /in).

h: Espesor de la capa (in).

β1: factor de calibración.

Las constantes dadas en la guía MEPDG son las siguientes:

Granular  
ks1: 1.673 βs1: 1  
Granular fino  
kr1: 1.35 βs1: 1

#### BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRAÚLICO

- Ahuellamiento (con software CR-ME)

Se calcula de la misma forma que el ahuellamiento para base y sub base granular, con la ecuación presentada anteriormente.

- Fatiga (cálculo externo)

$$N_f = \left( \frac{\beta_c^4}{\frac{\sigma_t}{M_{rup}}} \right)^{\beta_{c^3*20}}$$

MR: Módulo de ruptura a los 28 días.

σt: Esfuerzo de tensión (psi).

Las constantes dadas por PCA son las siguientes:

Granular  
βc<sup>3</sup>=1.0259 y βc<sup>4</sup>= 1.1368

Granular fino

βc<sup>3</sup>=0.6052 y βc<sup>4</sup>= 2.1154

#### SUB-RASANTE

- Ahuellamiento

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

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

Δ: Deformación permanente para la sub-rasante (in).

εp,z=0: Deformación permanente unitaria a la profundidad z (in/in).

hroca: profundidad hasta la roca firme (in).

k: Constante obtenida de la regresión.

## Resultados

Los resultados dados por el *software* ayudan a determinar cómo se comporta el pavimento en el periodo de diseño y evaluar si está cumpliendo los criterios de aceptación. Es donde el criterio ingenieril de cada uno de los diseñadores actúa para mejorar el diseño revisado.

El programa genera gráficos de módulos resilientes de los materiales, módulo dinámico de la carpeta asfáltica, porcentaje de daño, porcentaje de agrietamiento, agrietamiento longitudinal y ahuellamiento del pavimento.

## Metodología Empírica para Mecánica-Pavimentos Rígidos.

Para la aplicación de esta metodología, se utilizó una hoja de cálculo desarrollada por José Murillo Barboza, metodología mecánica-empírica que evalúa modelos propuesto por el Ing. Sukti Monge Morales y otros modelos que se encuentran en el capítulo 12 del libro Diseño y Análisis de Pavimentos (Huang, Y), apoyando el cálculo del esfuerzo en la losa con la herramienta AP-Rigid de LanammeUCR desarrollada por Ing. Ricardo Quirós Orozco.

Lo modelos evaluados son el agrietamiento transversal en la losa, el cual está calibrado para Costa Rica.

## AP-RIGID

The screenshot shows the 'Software de análisis de pavimentos rígidos' interface. It features a header with logos for Universidad de Costa Rica, LanammeUCR, PITRA, and UI. The main area is titled 'Análisis individual' and contains two sections: 'Unidades de parámetros de entrada' and 'Metodo de análisis'. The 'Unidades de parámetros de entrada' section has radio buttons for 'Sistema Internacional de Unidades' and 'Sistema Ingles de unidades', with the latter selected. Below this are input fields for: Separacion entre juntas [ft][m] (9.843), Modulo elástico concreto [ksi][GPa] (3,845.477), Espesor losa [in][cm] (65), Diferencial térmico [F][C] (-14.1), Coeficiente subrasante [pci][MPa/m] (94), Modulo elástico base [ksi][GPa] (29.11), Diámetro dovelas [in][cm] (0.75), and LTE [%] (71). A 'Calcular' button is located at the bottom of the input fields.

Figura 25. Recorte de Pantalla, Interfaz del AP-Rigid.  
Fuente: AP-RIGIG, Software de Análisis de Pavimentos Rígidos.

Herramienta de análisis de pavimentos rígidos donde calcula los esfuerzos y deformaciones a los que se somete la losa con variables determinadas.

Las variables requeridas por el *software* son:

- Separación entre juntas: determinado previamente en el diseño AASHTO 93, con criterio de los profesionales en la U.T.C.V. y cumpliendo con las recomendaciones de 18 veces el espesor. Valor de 3 m o 9.84 ft.
- Módulo elástico del concreto: 3845.5 ksi obtenidos por correlaciones previamente explicadas según la resistencia del concreto, en este caso 320 kg/cm<sup>2</sup>.
- Espesor de losa: se asume el espesor calculado por medio de la metodología

AASHTO 93, para poder revisarlo y determinar si requiere ser aumentado o, al contrario, puede ser optimizado.

- Diferencial térmico: 6.8 °F es la constante típica utilizada o -14.1 °C, Vargas, F.
- Coeficiente de la sub-rasante: calculado por medio del diseño AASHTO 93.
- Módulo de resiliencia de base o sub-base por utilizar: determinado anteriormente en la sección de materiales. 29.1 ksi
- Diámetro de dovela: 0.75 in, ya que se asume inicialmente el uso de varilla # 6.
- LTE: porcentaje de transferencia de carga de las dovelas, 80 (%) para pavimentos nuevos.

El programa tiene la opción de utilizar dos métodos de análisis: regresión lineal múltiple y

red neutral artificial; se determinó que era mejor utilizar el modelo análisis de regresión lineal múltiple, ya que los resultados son más confiables según los estudios elaborados por Quirós, R (2015).

## Revisión por Medio de los Modelos

Al obtener los esfuerzos y deformaciones, se puede procedió a revisar los modelos con la información ya recopilada y dar un criterio de si están cumpliendo lo requerido. Los modelos presentados a continuación son lo más importantes en cuanto a la revisión para un pavimento rígido.

### Modelo de Fatiga, Agrietamiento Transversal (Monge, S.)

El porcentaje de losas con agrietamiento transversal se obtiene por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\log(N) = \log(5.451) - 24.6 * \log\left(\frac{\sigma}{MR}\right)$$

MR: Módulo de ruptura (psi)

$\sigma$ : esfuerzo aplicado en las condiciones dadas. (psi)

N: número de aplicaciones de carga permisibles en las condiciones dadas.

Y el Módulo de Ruptura que se encuentra en cuadro 6 es de 492 psi.

$$FD = \sum \frac{n}{N}$$

n: número de aplicaciones de carga en las condiciones dadas.

N: número de aplicaciones de carga permisibles en las condiciones dadas.

En el número de aplicaciones de carga en las condiciones dadas, se utilizan los ejes equivalentes resultantes calculados para el pavimento.

$$CRK = \frac{1}{1 + [FD]^{(-1.68)}}$$

CRK: cantidad predicha de grietas de abajo hacia arriba en porcentaje.

FD: daño por fatiga calculado.

$$CRK_p = CRK + STD_p * Z_p$$

CRK<sub>p</sub>: agrietamiento predicho a nivel de confiabilidad elegido P en porcentaje.

CRK: agrietamiento predicho basados en promedios al 50% de confiabilidad en porcentajes.

Z<sub>p</sub>: desviación normal estándar.

STD<sub>p</sub>: desviación estándar del agrietamiento al nivel predicho de agrietamiento promedio.

$$STD_p = -0.00198 * CRK^2 + 0.56857 * CRK + 2.76825$$

El porcentaje de confiabilidad predicho para el pavimento en estudio es de 90 %, ya explicado anteriormente.

### Modelo de Bombeo (Huang, Y.)

Con el modelo de bombeo se pretende predecir cuál sería la severidad del bombeo en el pavimento diseñado, por lo que, si este da valores altos o no aceptables, se puede corregir desde un inicio y no tener fallas por bombeo que perjudiquen a los usuarios.

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

PI: Índice de bombeo.

N<sub>18</sub>: Ejes equivalentes W18, en millones.

S: Tipo de suelo basado en AASHTO, 0 para suelos gruesos (A-1 a A-3) y 1 para suelos finos de (A-4 a A-7).

P: Precipitación anual (cm).

H: Espesor de la losa (in).

FI: Índice de congelamiento en días bajo cero.

- Los ejes equivalentes que se utilizaron son los que se calculan para la metodología AASHTO 93.
- En el caso del tipo de suelo, se correlaciona el CBR obtenido con la figura A-7 de Anexos, donde se determina la clasificación del mismo según AASHTO. Por lo que el suelo con un CBR de 8.6% puede encontrarse en las categorías de A-4, A-6 o A-7, por este motivo la constante asignada es de 1.
- La precipitación anual sería la sumatoria de todos los meses que se encuentra en el cuadro 11. El cual es de 254 cm.
- El espesor de la losa es el que se calculó con la metodología AASHTO 93.

- Índice de congelamiento, ya que esta zona del país no cuenta con días bajo cero registrados, se asume cero días.

### Modelo de Escalonamiento (Huang, Y.)

El escalonamiento en los pavimentos puede ser un problema muy perjudicial para el tránsito de los vehículos en pavimentos rígidos y también llevar al fallo de la junta, por lo que se asocian otros daños en el mismo sitio.

Por eso, al revisar el escalonamiento que podría presentar el pavimento, se reduce la incertidumbre de si el diseño propuesto no tiene problemas en esta área.

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

F: Escalonamiento del pavimento (in).

$N_{18}$ : Ejes equivalentes W18, en millones.

S: Esfuerzo máximo (psi).

JS: Espaciamiento entre juntas (ft).

K: Módulo Efectivo de Reacción de la Sub-Rasante (pci).

- Los ejes equivalentes que se utilizan son los que se calculan para la metodología AASHTO 93.
- El esfuerzo máximo es calculado con el AP-Rigid.
- El espaciamiento entre juntas es determinado en el diseño de AASHTO 93 por criterio ingenieril y cumpliendo recomendaciones establecidas.
- El módulo efectivo de reacción de la sub-rasante también es determinado en el diseño por AASHTO 93.

### Criterios de aceptación

Según la guía de AASHTO 2008 para el agrietamiento transversal, el criterio mínimo que debe cumplir un pavimento es de 20 %.

El índice de bombeo, como se cuenta con una escala en donde 0 determina que no hay bombeo, 1 es un bombeo leve, 2 un bombeo medio y 3 un bombeo grave, el criterio de aceptación que se utilizará es 1.

El escalonamiento máximo para las losas de concreto debe ser 0.12 in la guía AASHTO 2008

## Planificación Constructiva y Presupuesto de Proyecto

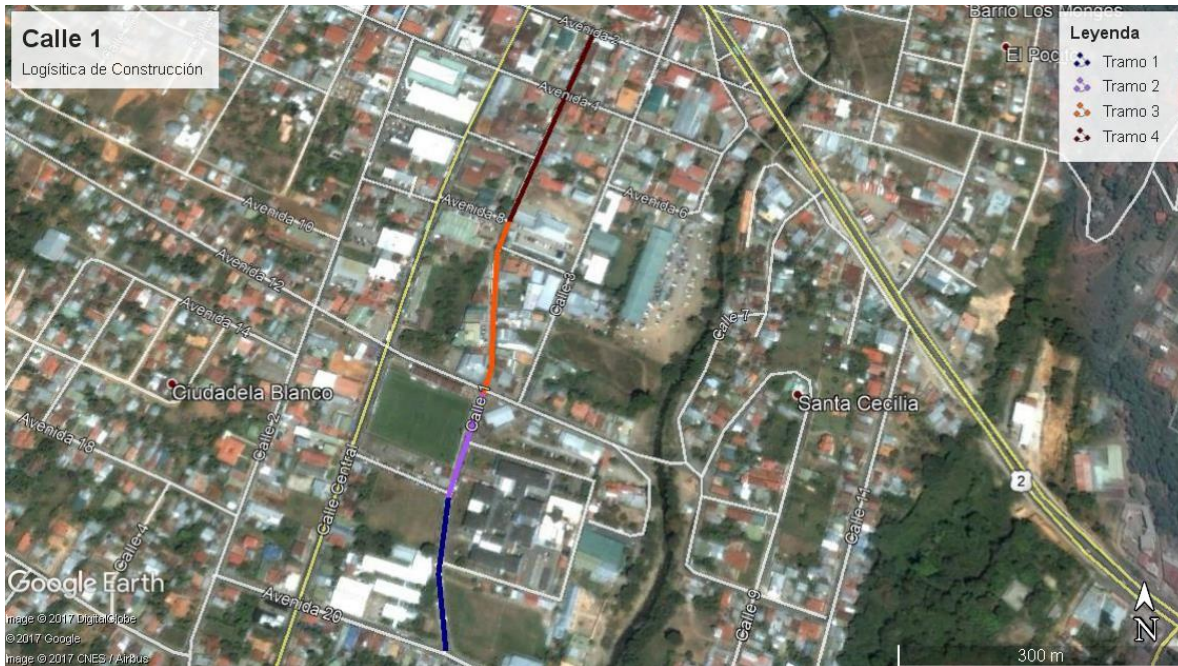
Para una mejor planificación de la construcción y de los costos del proyecto, se determinó que se debía dividir en cuatro tramos, para dejar habilitados puntos importantes y que el flujo vehicular pueda circular de una manera continua. También tomando en cuenta que por esta calle se encuentra el Hospital Escalante Pradilla y no se puede dejar sin acceso, debido a la importancia de la edificación.

Tramo 1: 166 m, desde la estación 0+000 hasta el entronque con Av. 14.

Tramo 2: 125 m, desde la Av. 14 hasta la Av. 12

Tramo 3: 218 m, desde Av. 12 hasta Av. 8

Tramo 4: 276 m, desde Av. 8 hasta Av. 2



**Figura 26.** Representación gráfica de los tramos de construcción establecidos.  
Fuente: Google Earth, 2017

En el caso de esta calle, se determinó que se debe excavar todo el espesor del pavimento diseñado para remover el material viejo y en malas condiciones.

Para determinar las cantidades de materiales requeridos, se utilizaron datos típicos que utiliza la U.T.C.V de la Municipalidad de Pérez Zeledón

<b>Cuadro 13. Datos Requeridos para el cálculo de materiales.</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Compactación de la mezcla asfáltica	23	%
Densidad del concreto asfáltico	2.30	ton/m3
Gasto de la emulsión	1.70	l/m2
Compactación del agregado	20	%
Cemento sobre el agregado para BE-25	6	%
Densidad de BE-25	2.30	ton/m3
Desperdicio	5	%
Longitud de varilla para dovela	6.00	m
Longitud de varilla para barra de amarre	9.00	m
Ancho de juntas	0.87	cm
Profundidad de sello para juntas	1.73	cm

**Fuente:** Unidad Técnica de Conservación Vial, Municipalidad de Pérez Zeledón.

Los rubros de materiales calculados para cada tipo de pavimento se pueden ver en los siguientes cuadros. Y determinados con las relaciones del cuadro 12.

<b>Cuadro 14. Rubros de Materiales Requeridos en el Pavimento Flexible</b>	
<b>Rubro</b>	<b>Unidad</b>
Concreto asfáltico	m3
Concreto asfáltico	ton
Riego de imprimación	l
Base granular	m3
Sub-base granular	m3
Volumen a excavar	m3

Fuente: Propia

<b>Cuadro 15. Rubros de Materiales Requeridos en el Pavimento Semi-Rígido</b>	
<b>Rubro</b>	<b>Unidad</b>
Concreto asfáltico	ton
Riego de imprimación	l
Base estabilizada BE-25	m3
Base estabilizada BE-25	ton
Cemento hidráulico	ton
Sacos de cemento 50 kg	Ud
Material de base	m3
Sub-base granular	m3
Volumen a excavar	m3

Fuente: Propia

<b>Cuadro 16. Rubros de Materiales Requeridos en el Pavimento Rígido</b>	
<b>Rubro</b>	<b>Unidad</b>
Concreto hidráulico (m3)	m3
Base granular (m3)	m3
Volumen a excavar (m3)	m3
Longitud total de dovelas (m)	m
Cantidad de varillas No. 6	Ud
Longitud total de barras (m)	m
Cantidad de varillas No. 4	Ud
Malla electrosoldada 4.11mm 2.35 x	Ud
Elastomérico para juntas (lt)	l
Bad-road para juntas (m)	m

Fuente: Propia

En el caso de los precios de materiales, se obtuvieron consultando a proveedores de la zona y algunos que se encuentran en la base de datos de la U.T.C.V.

<b>Cuadro 17. Costo de Materiales</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidad</b>
Agregado para sub-base	₡ 10,080.00	m3
Emulsión asfáltica	₡ 510.00	lt
Agregados para base	₡ 10,080.00	m3
Cemento	₡ 6,115.00	sacos
Mezcla asfáltica	₡ 55,000.00	ton
Suministro de concreto	₡119,000.00	m3
Acero Varilla No.6 (6 m)	₡ 8,883.00	ud
Acero Varilla No.4 (9 m)	₡ 4,092.00	ud
Bad-Road para juntas	₡ 51.44	m
Elastomérico Isoflex 880	₡ 6,650.00	lt
Malla electrosoldada 4.11mm 2.35 x 6m x	₡ 19,500.00	ud

Fuente: Proveedores y U.T.C.V.

Para determinar el costo de mano de obra, se basó en los salarios mínimos del 2017 que el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

<b>Cuadro 18. Salarios Mínimos Establecidos para el 2017</b>			
<b>Puesto</b>	<b>Jornada</b>	<b>Por Jornada</b>	<b>Por Hora</b>
Albañil	10	₡10,877.41	₡ 1,087.74
Ayudante	10	₡10,680.80	₡ 1,068.08
Chofer	10	₡12,829.63	₡ 1,282.96
Capataz	10	₡12,829.63	₡ 1,282.96
Operador maquinaria pesada	10	₡10,877.41	₡ 1,087.74
Operario	10	₡10,877.41	₡ 1,087.74
Peón	10	₡ 9,822.07	₡ 982.21
Inspector	10	₡14,333.00	₡ 1,433.30
Ingeniero	10	₡22,667.00	₡ 2,266.70

Fuente: Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

Los costos de maquinaria promedio establecidos en la zona por la U.T.C.V son los siguientes y cabe destacar que tienen el operador incluido.

Cuadro 19. Costos de Maquinaria	
Tipo	Por Hora
Excavadora	₡35,000.00
Vagoneta convencional	₡25,000.00
Motoniveladora	₡35,000.00
Compactadora Vibratoria	₡35,000.00
Tanque de agua	₡20,000.00
Recuperadora	₡60,000.00
Bomba Estacionaria	₡16,000.00
Pavimentadora	₡35,000.00
Máquina para texturizado	₡ 5,454.90

Fuente: Proveedores y U.T.C.V.

Para el desarrollo del cálculo de los costos iniciales de las propuestas, se siguieron los renglones de pago determinados por el CR-2010, en donde describe por actividades cómo es la forma en que se debe pagar esa actividad y sus criterios para aceptar los trabajos concluidos.

Los renglones de pago básicos requeridos en el proyecto de la Calle 1 son los siguientes:

Cuadro 20. Renglones de Pago Requeridos para el Pavimento Flexible		
Descripción	Rubro	Unidad
Excavación de la vía	CR 204.03	m3
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular	CR 301.06	m3
Suministro, colocación y compactación de base granular	CR 301.03	m3
Riego de imprimación	CR 413.01	lt
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente	CR 401.01	m2

Fuente: CR-2010

Cuadro 21. Renglones de Pago Requeridos para el Pavimento Semi-Rígido		
Descripción	Rubro	Unidad
Excavación de la vía	CR 204.03	m3
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular	CR 301.06	m3
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada BE-25	CR 302.01	m3
Riego de imprimación	CR 413.01	lt
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente	CR 401.01	m2

Fuente: CR-2010

Cuadro 22. Renglones de Pago Requeridos para el Pavimento Rígido		
Descripción	Rubro	Unidad
Excavación de la vía	CR 204.03	m3
Suministro, colocación y compactación de base granular	CR 301.03	m3
Losa de concreto hidráulico f'c = 320 kg/cm2	CR 501.01	m2

Fuente: CR-2010

## Plan de Conservación

Para cumplir este objetivo, se debe trabajar mucho en la investigación bibliográfica descrita anteriormente, ya que se necesita de experiencias previas para poder formar un plan de mantenimiento acorde para las características del pavimento por construir.

Se desarrollan dos guías generales de conservación, una para pavimentos flexibles y semi-rígidos y otra para rígidos, ya que las



características no son iguales por la naturaleza de la capa de rodadura.

En estas guías se describe la forma de cómo determinar el estado del pavimento, los daños que pueden sufrir y las acciones de mantenimiento que se pueden aplicar acordes al daño. Estos daños e intervenciones para cada tipo de pavimento se pueden ver en el apéndice de la tabla AP-1 a la AP-4

A cada tipo de pavimento se le propone una intervención por realizar en los años de vida, esto con la experiencia de los ingenieros e inspectores que a lo largo del tiempo han identificado patrones de daño en los pavimentos, acorde a esto se calcula el valor de mantenimiento, ya que no se cuenta con estimación cuantificada de algún pavimento en el cantón que ayude a determinar cómo se deteriora el pavimento y qué se debe hacer para corregirlo.

Con ello los encargados de gestionar el pavimento pueden presupuestar el costo de estas intervenciones en sus planes de trabajo y mejorar el desempeño del pavimento al máximo.

Como complemento de apoyo a la U.T.G.V en sus labores de inspección, se anexó una hoja de inspección de pavimentos en campo que los inspectores municipales pueden aplicar para inventariar los pavimentos. Esta se basa en la norma ASTM D6433-11.

## Matriz FODA

Para el desarrollo de la matriz FODA, se desarrolló una tabla para cada tipo de pavimento donde se clasifican cuatro compartimentos: fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas. En estas se investigó qué fortalezas y debilidades tiene cada tipo de pavimento según sus características propias e igualmente las oportunidades y amenazas que estos pavimentos puedan presentar para su mejora o aspectos que lo afecten.

Con la información recolectada en la tabla se puede analizar y tener una propuesta previa con respecto a lo que más le beneficia al municipio y a la comunidad.

# Análisis Económico

## Modelo RED

Basándose en el escrito de Arguedas (2011), se desarrolla la metodología para el modelo RED.

El modelo está estructurado en libros Excel contenidos en un único directorio de trabajo:

- Módulo Principal de Evaluación Económica.
- Módulo de Costos de Operación de Vehículos HDM-III.
- Módulo de Costos de Operación de Vehículos HDM-4.
- Módulo de Análisis de Riesgo.
- Módulo de Evaluación de Programa.

El modelo RED provee únicamente el VAN y la TIR.

La evaluación de un solo camino se realiza con el Módulo Principal de Evaluación Económica y la evaluación de un conjunto de ellos con el Módulo de Evaluación de Programa.

Para cualquiera de los dos casos, evaluación de un solo camino con el Módulo Principal o evaluación de varios caminos con el Módulo de Programa, lo primero que debe efectuarse es la ejecución del Módulo de Costos de Operación Vehículos HDM-III o HDM-4, según se desee o se ajuste a la flota vehicular local.

Calcular los costos de operación y velocidades de los vehículos, según la versión correspondiente del HDM y ajustarlos a expresiones polinómicas de tercer grado en función de la regularidad superficial. Estas expresiones son incorporadas al modelo red en el Módulo Principal desde el módulo HDM correspondiente. Cuando se utiliza el Módulo de Programa, debe indicarse en este el nombre del Módulo Principal que contiene tales costos de operación y velocidades.

## Pasos para utilizar el Modelo de RED

- Se abrió el “*Módulo HDM-4 VOC*” y es necesario habilitar siempre los macros, luego abrir la hoja *Datos Básicos de Entrada* e ingrese los datos solicitados en las celdas de color amarillo. Esta información es teórica y proporcionada

por la U.T.C.V. y los datos que utiliza el programa MOPT-BID. Ver Tabla A-11 de anexos.

- Con esto se está definió la flota vehicular local y prescindiendo de aquellos vehículos que no forman parte de ella.
- En la hoja *Calcular Resultados*. Se dio clic en el botón *Calcular Resultados*. Después de unos segundos los resultados pueden verse en la hoja *Coefficientes, la Hoja Velocidades y VOC*.
- Las siguientes hojas del libro amplían la información calculada referente a los componentes de costos de operación vehicular por tipo de terreno, por tipo de superficie y por valor de rugosidad; comparación de resultados de HDM-4 y de las ecuaciones polinómicas de tercer grado junto con ilustraciones gráficas; y velocidades y costos de operación de vehículos típicos para diferentes clases de caminos. Estas se muestran a continuación en las hojas *Componentes de VOC, Comp. de HDM-4 y Ecuaciones, y VOC y Velocidades Típicas*.
- La ecuación correspondiente del COV en función del IRI es:

$$VOC = 0.170716 + 0.0004 * IRI + 0.00048 * IRI^2 - 0.000009 * IRI^3$$

Con el VOC en (\$/veh-Km)

- Sustituyendo el valor de IRI que se obtiene similarmente, puede comprobarse para el resto de vehículos de la flota vehicular; y asimismo para los valores de velocidades.
- En esta última hoja dese un clic al botón, *Actualizar Resultados* y guarde el archivo.
- Seguidamente, se debe abrir la hoja *Módulo RED – Principal (Versión 3.2)*. Para importar a este nuevo módulo la información calculada en HDM-4, ábrase nuevamente el Módulo HDM-4 VOC\_se debió abrir la hoja *Calcular Resultados* y en la celda F23, se ingresó el nombre del módulo principal renombrado. Seguidamente, dese un clic al botón *Copiar y Pegar Resultados en el Módulo*

*Principal* para grabar la información en el módulo principal renombrado.

- Nuevamente se abrió el Módulo *Principal* y la hoja *Control y Seteo* ingresando la información requerida en las celdas amarillas. Esta información es teórica y proporcionada por la U.T.C.V. y los datos que utiliza el programa MOPT-BID.
- En la hoja *Tiempo y Accidentes* se eliminó las celdas amarillas correspondientes a costos del tiempo de viaje de la carga. Esto para no considerar los ahorros en tiempo de la carga y los ahorros en reducción de accidentes.
- En la hoja *Tránsito* es necesario ingresar la información requerida en las celdas amarillas. En este caso la información necesaria se encuentra en la A-8 de anexos e igualmente se puede observar en la figura A-14 de anexos
- Abriendo *Alter.Proyecto-Ppales.Caract.* es necesario ingresar la información. Los datos necesarios son la longitud del proyecto, la velocidad a la cual los autos podrían transitar y los costos de inversión inicial en miles de dólares por kilómetro, así como los costos de mantenimiento en miles de dólares por kilómetro por año.
- Finalmente, se abrió la hoja *Alter.Proyecto-Solución* para ver los resultados.

En la sección de anexos de las figuras A-12 al A-16, se mostrarán los datos utilizados y el desarrollo del análisis.

## Elección de Alternativa

Para la elección de la alternativa se realizó un panel de expertos con los integrantes de la Unidad Técnica de Conservación Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón, en donde cada uno de los integrantes dio sus comentarios y puntos de vista acerca de cada una de las propuestas y así en conjunto tomar una decisión que sea beneficiosa en su mayoría y que logre el

objetivo de en un corto plazo diseñar esa alternativa beneficiando a los usuarios y habitantes del cantón.

Para desarrollar el panel de expertos es necesario haya diferentes profesionales por lo cual en este caso Ingenieros en Construcción y Civil, un Ingeniero Topógrafo y un Gerente de Proyectos estarán involucrados en esta decisión, así cada uno aporta su criterio desde su área de especialidad y con mayor argumento tomar la decisión más factible.

# Resultados

## Diseños de pavimentos

### Cálculo de Ejes Equivalentes

#### Escenario 1

Cuadro 23. Cálculo de Ejes Equivalentes para el Escenario 1.										
Tipo de vehículo	% del TPD	Tránsito Promedio Diario	Factor Camión	EEQ diarios	EEQ anuales	Factor de Crecimiento	EEQ en el periodo de diseño	Factor dirección	Factor carril	Ejes equivalentes de diseño
Motos	9.3%	485	0.000	0.00	0.0	26.87	0.0	100%	90%	0.0
Livianos	85.6%	4,479.0	0.001	4.48	1,634.8	26.87	43,928.6	100%	90%	39,535.8
Carga liviana	1.4%	72.0	0.020	1.44	525.6	26.87	14,123.1	100%	90%	12,710.8
C2	3.1%	161.0	0.630	101.43	37,022.0	26.87	994,793.7	100%	90%	895,314.3
C3/Buses	0.2%	12.0	1.710	20.52	7,489.8	26.87	201,253.7	100%	90%	181,128.4
C4	0.3%	16.0	1.000	16.00	5,840.0	26.87	156,923.0	100%	90%	141,230.7
T3-S2	0.2%	8.0	2.380	19.04	6,949.6	26.87	186,738.4	100%	90%	168,064.5
$\Sigma$										1,437,984.4

Fuente: Propia

En el cuadro 23 se observa el resultado del cálculo para el tramo de la Calle 1 en donde la dirección del fluido es a un solo sentido y cuenta con dos carriles.

#### Escenario 2

Cuadro 24. Cálculo de Ejes Equivalentes para el Escenario 2.										
Tipo de vehículo	% del TPD	Tránsito Promedio Diario	Factor Camión	EEQ diarios	EEQ anuales	Factor de Crecimiento	EEQ en el periodo de diseño	Factor dirección	Factor carril	Ejes equivalentes de diseño
Motos	9.3%	485.0	0.000	0.00	0.0	26.87	0.0	50%	100%	0.0
Livianos	85.6%	4,479.0	0.001	4.48	1,634.8	26.87	43,928.6	50%	100%	21,964.3
Carga liviana	1.4%	72.0	0.020	1.44	525.6	26.87	14,123.1	50%	100%	7,061.5
C2	3.1%	161.0	0.630	101.43	37,022.0	26.87	994,793.7	50%	100%	497,396.8
C3/Buses	0.2%	12.0	1.710	20.52	7,489.8	26.87	201,253.7	50%	100%	100,626.9
C4	0.3%	16.0	1.000	16.00	5,840.0	26.87	156,923.0	50%	100%	78,461.5
T3-S2	0.2%	8.0	2.380	19.04	6,949.6	26.87	186,738.4	50%	100%	93,369.2
$\Sigma$										798,880.2

Fuente: Propia

En el cuadro 24 se observa el resultado del cálculo para el tramo de la Calle 1 hay fluido vehicular en dos sentidos y un solo carril para cada uno.

En el cuadro 25 se observa el resultado del cálculo para el tramo de la Calle 1 en donde la dirección del fluido es a un solo sentido y cuenta con dos carriles, pero aplicando los factores camión para el pavimento rígido.

## Escenario Critico para Pavimentos Rígidos

Tipo de vehículo	% del TPD	Tránsito Promedio Diario	Factor Camión	EEQ diarios	EEQ anuales	Crecimiento	EEQ en el periodo de diseño	Factor dirección	Factor carril	Ejes equivalentes de diseño
Motos	9.3%	485.0	0.0005	0.00	0.0	26.87	0.0	100%	90%	0.0
Livianos	85.6%	4,479.0	0.001	2.24	817.4	26.87	21,964.3	100%	90%	19,767.9
Carga liviana	1.4%	72.0	0.010	0.72	262.8	26.87	7,061.5	100%	90%	6,355.4
C2	3.1%	161.0	0.630	101.43	37022.0	26.87	994,793.7	100%	90%	895,314.3
C3/Buses	0.2%	12.0	1.710	20.52	7489.8	26.87	201,253.7	100%	90%	181,128.4
C4	0.3%	16.0	4.050	64.80	23652.0	26.87	635,538.1	100%	90%	571,984.3
T3-S2	0.2%	8.0	3.170	25.36	9256.4	26.87	248,722.9	100%	90%	223,850.6
Σ										1,898,400.8

Fuente: Propia

## Opción Pavimento Flexible

### Diseño Metodología AASHTO 93

Con lo planteado en el capítulo de metodología, los resultados obtenidos para el pavimento flexible aplicando el método AASHTO 93, son los siguientes:

Capa de pavimento	SN
Carpeta asfáltica (SN 1)	2.188
Base granular (SN 2)	2.844
Sub-base (SN 3)	2.997

Fuente: Propia.

Capas del Pavimento	Teórico (cm)	Propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	12.58	13
Base granular	11.2	15*
Sub-base	N. N	15*
Total		43

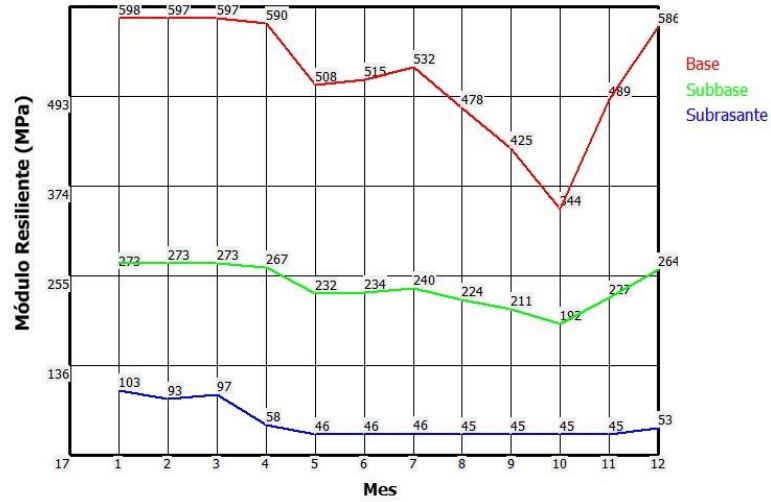
Fuente: Propia.

Nota: N. N= no presenta según cálculos de la metodología, \*= Se utiliza valores mínimos recomendados ya que los esperes calculados son menores, (Tabla A-6, anexos)

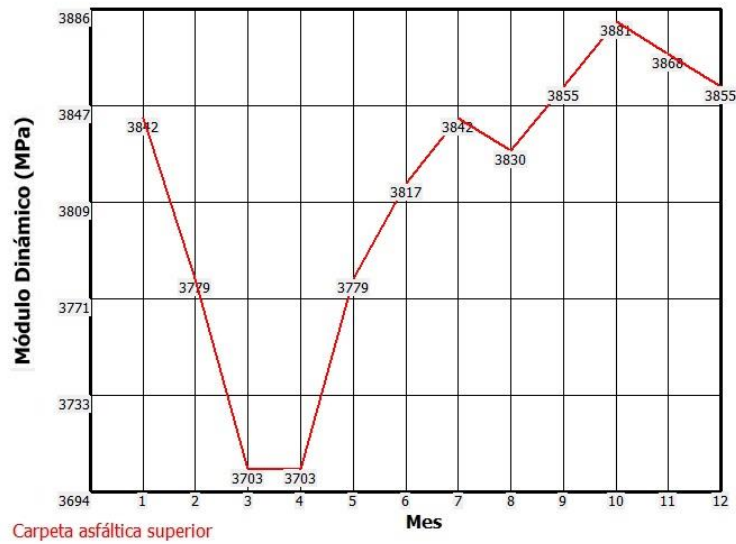
En la figura AP-1 y AP-2 del apéndice se puede observar el diseño completo. Donde se muestra el cumplimiento del criterio SN total > SN requerido

## Diseño Metodología Mecánica-Empírica

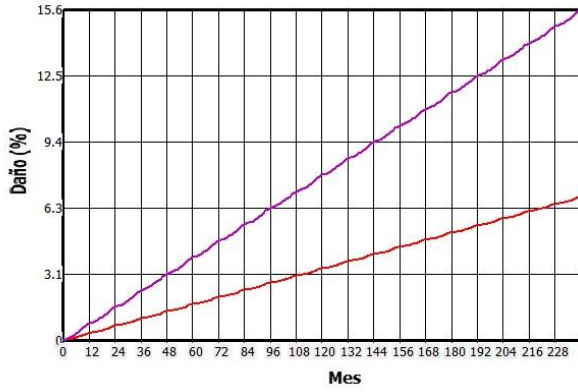
### Revisión de Espesores AASHTO 93



**Figura 27.** Comportamiento de los módulos resilientes de las capas del pavimento.  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Figura 28.** Comportamiento del módulo dinámico de la carpeta asfáltica.  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



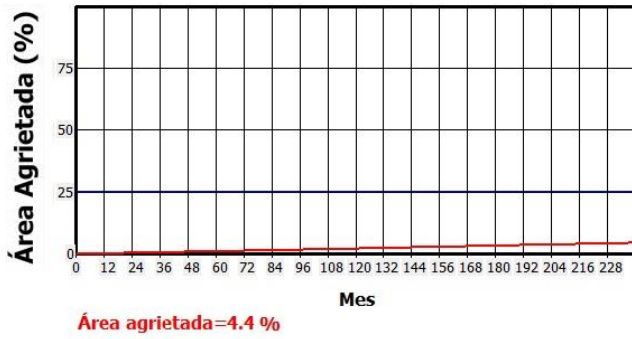
Daño por fatiga de abajo hacia arriba MEPDG=15.64 %  
 Daño por fatiga de arriba hacia abajo MEPDG=6.79 %

**Figura 29.** Porcentaje de daño en la vida útil del pavimento.  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



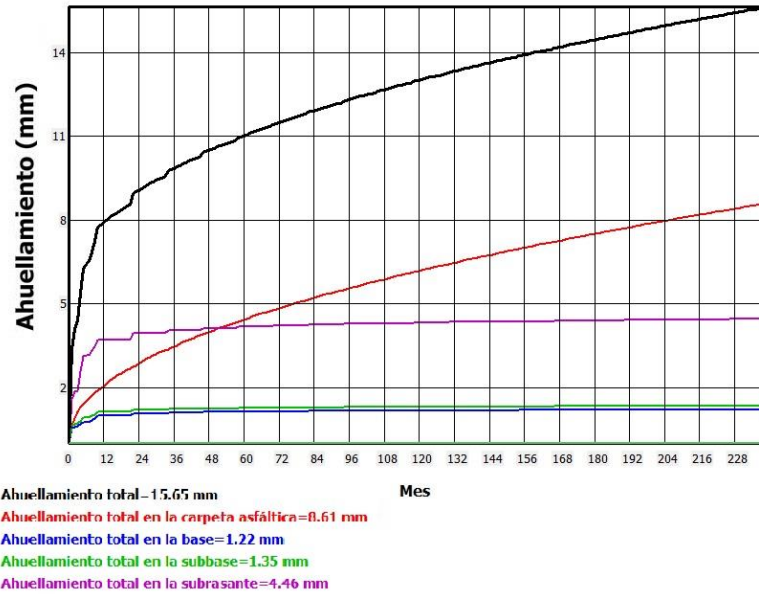
Agrietamiento Longitudinal=593.7 pies/milla

**Figura 31.** Agrietamiento longitudinal en la vida útil del pavimento  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



Área agrietada=4.4 %

**Figura 30.** Porcentaje de área agrietada en la vida útil del pavimento.  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Figura 32.** Ahuellamiento en la vida útil del pavimento.  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

Cuadro 28. Evaluación de criterios de aceptación				
Modelo de Desempeño			Valor en el Diseño	Cumple
Agrietamiento longitudinal	pies/milla	2000	593.7	SI
Área agrietada	%	75	4.4	SI
Ahuellamiento carpeta asfáltica	mm	12.5	8.61	SI
Ahuellamiento total	mm	25	15.65	SI

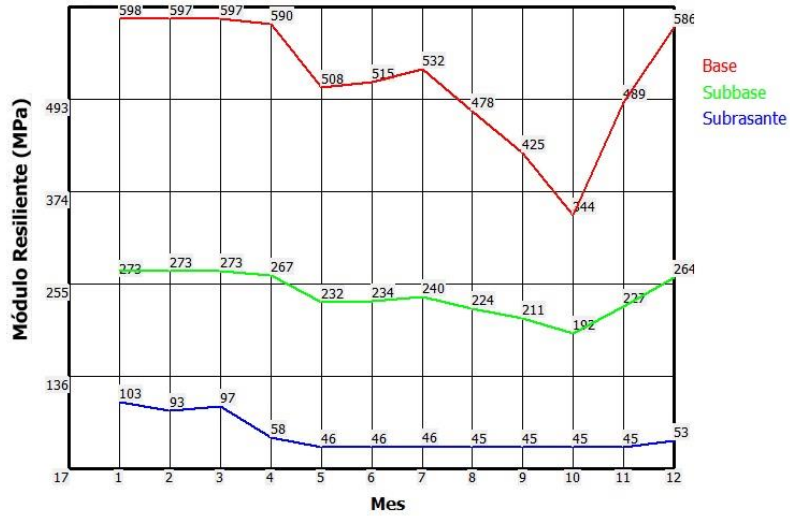
Fuente: LM-PI-GM-INF-22-14 y criterio de expertos.

## Diseño Optimizado Utilizando CR-ME

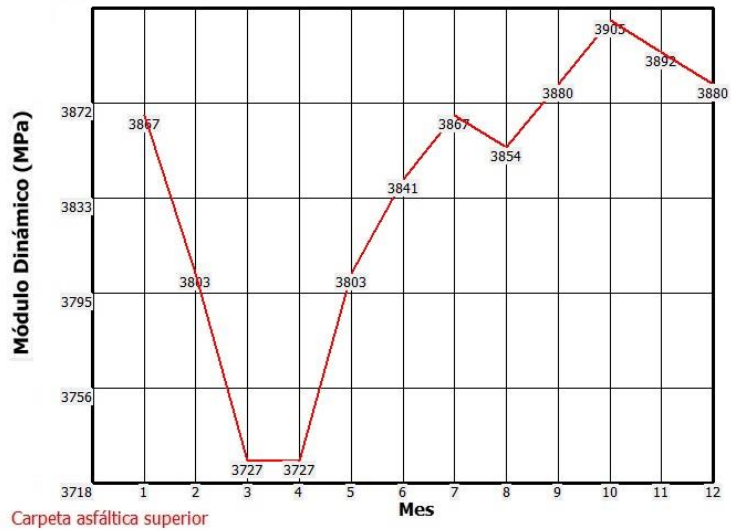
Con los resultados de la revisión de espesores ASSHTO 93 se observó que se podría disminuir el espesor de la carpeta asfáltica para así obtener un ahorro económico sin reducir la calidad del diseño. Por lo que se propuso 9 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base granular y 20 cm de subbase estos dos últimos se aumentaron para ayudar con la estabilidad del diseño y no sufriera deformaciones tempranas.

En los siguientes cuadros y figuras se puede confirmar que el diseño cumple con los criterios de aceptación mínimos y se puede desarrollar como un diseño formal.

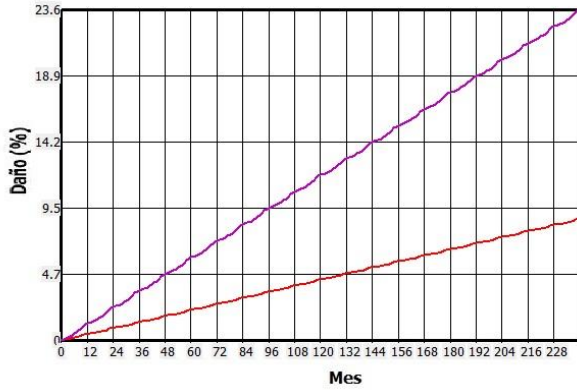




**Figura 33.** Comportamiento de los módulos resilientes de las capas del pavimento.  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

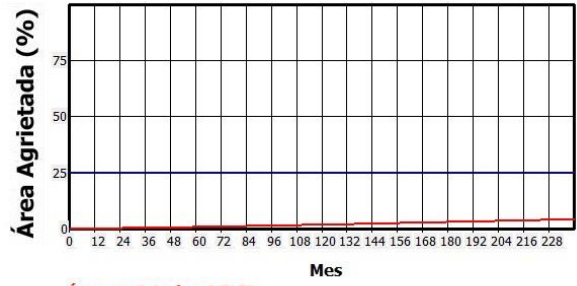


**Figura 34.** Comportamiento del módulo dinámico de la carpeta asfáltica.  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Daño por fatiga de abajo hacia arriba MEPDG=8.68 %**  
**Daño por fatiga de arriba hacia abajo MEPDG=23.64 %**

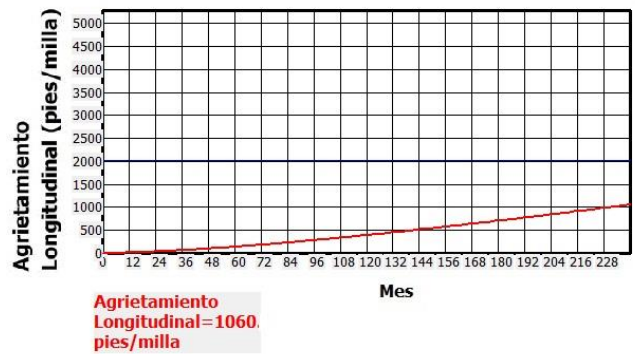
**Figura 35.** Porcentaje de daño en la vida útil del pavimento.  
 Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Área agrietada=4.2 %**

**Figura 36.** Porcentaje de área agrietada en la vida útil del pavimento.

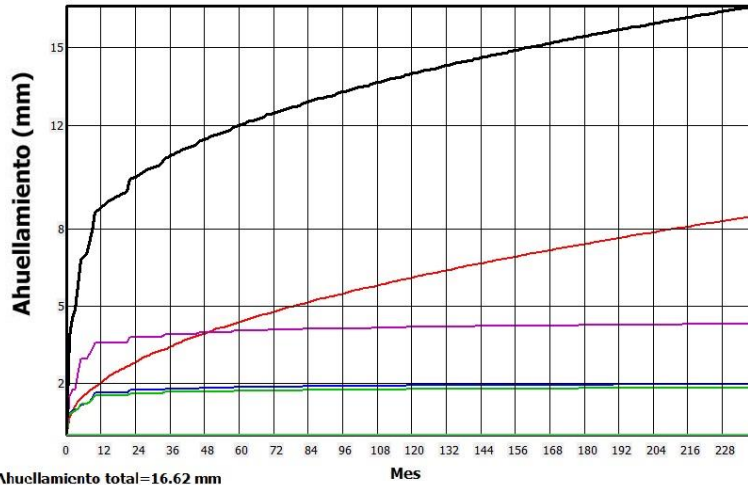
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Agrietamiento Longitudinal=1060 pies/milla**

**Figura 37.** Agrietamiento longitudinal en la vida útil del pavimento.

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Ahuellamiento total=16.62 mm**  
**Ahuellamiento total en la carpeta asfáltica=8.49 mm**  
**Ahuellamiento total en la base=1.98 mm**  
**Ahuellamiento total en la subbase=1.84 mm**  
**Ahuellamiento total en la subrasante=4.31 mm**

**Figura 38.** Ahuellamiento en la vida útil del pavimento.

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

Cuadro 29. Evaluación de criterios de aceptación				
Modelo de Desempeño			Valor en el Diseño	Cumple
Agrietamiento longitudinal	pies/milla	2000	1060	SI
Área agrietada	%	75	4.2	SI
Ahuellamiento carpeta asfáltica	mm	12.5	8.49	SI
Ahuellamiento total	mm	25	16.62	SI

Fuente: LM-PI-GM-INF-22-14 y criterio de expertos.

## Opción Semi-Rígido

### Diseño Metodología AASHTO 93

Cuadro 30. Números estructurales determinada por la metodología AASHTO 93, para pavimento semi-rígidos.	
Capa de pavimento	SN
Carpeta asfáltica (SN 1)	0.476
Base estabilizada con cemento (SN 2)	2.825
Sub-base (SN 3)	2.974

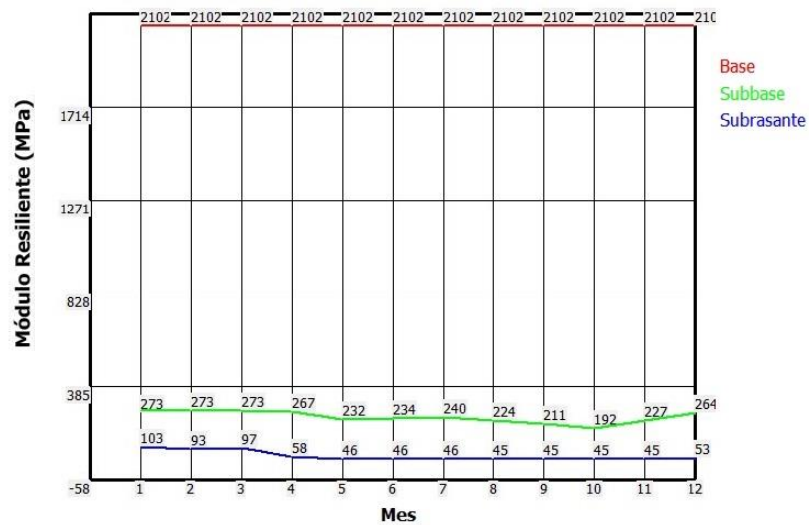
Fuente: Propia

Cuadro 31. Estructura de pavimentos determinada por la metodología AASHTO 93, para pavimento semi-rígido.		
Capas del Pavimento	Teórico (cm)	Propuesto (cm)
Carpeta asfáltica	2.74	8*
Base estabilizada con cemento	23.04	25
Sub-base	0.64	15*
	Total	48

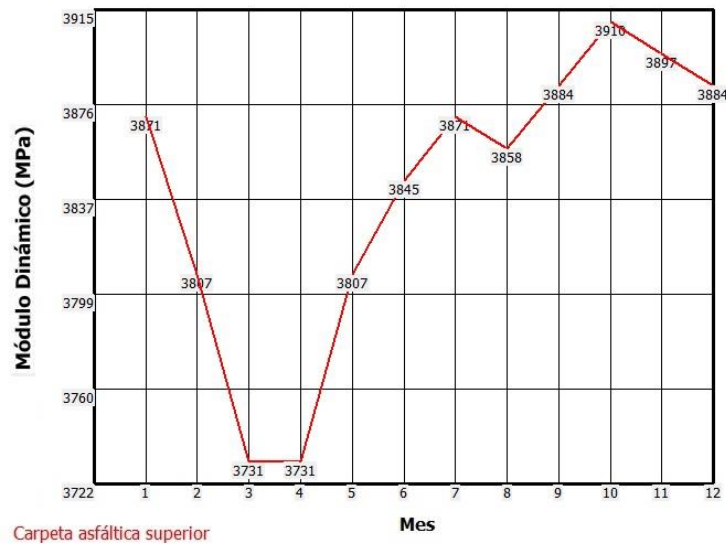
Fuente: Propia.

Nota: \*= Se utilizan valores mínimos recomendados, ya que los esperes calculados son menores, (Tabla0 A-6, de anexos).

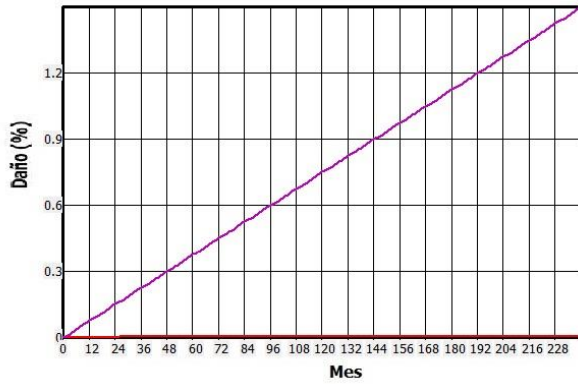
En la figura AP-3 y AP-4 del apéndice se puede observar el diseño completo. Donde se muestra el cumplimiento del criterio SN total > SN requerido



**Figura 39.** Comportamiento de los módulos resilientes de las capas del pavimento.  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



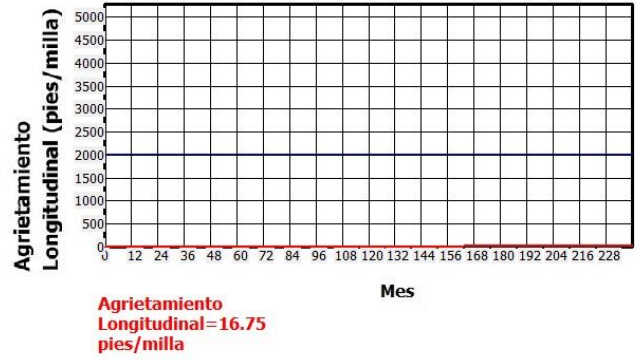
**Figura 40.** Comportamiento del módulo dinámico de la carpeta asfáltica.  
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



Daño por fatiga de abajo hacia arriba MEPDG=0 %  
 Daño por fatiga de arriba hacia abajo MEPDG=1.44 %

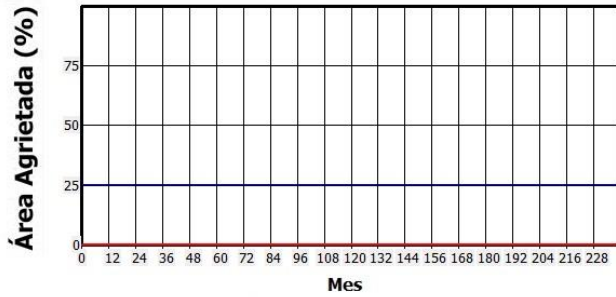
**Figura 41.** Porcentaje de daño en la vida útil de la carpeta asfáltica en el pavimento.

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Figura 43.** Agrietamiento longitudinal de la carpeta asfáltica en el pavimento.

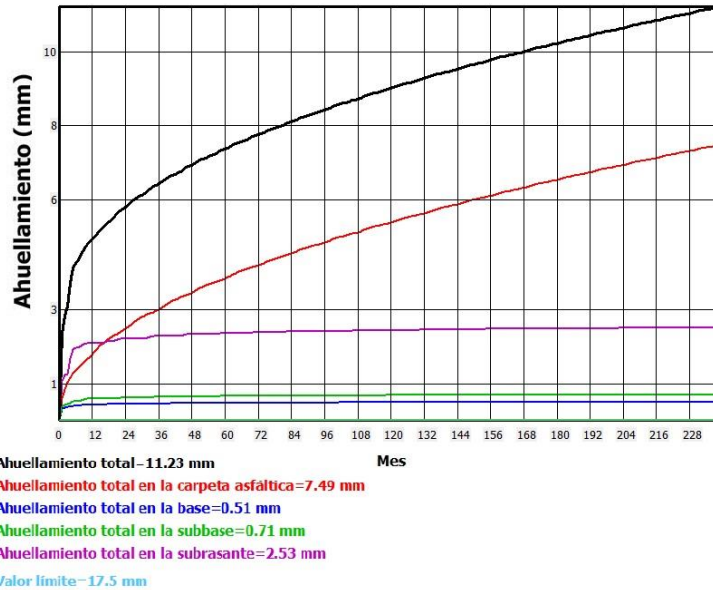
Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



Área agrietada=0 %

**Figura 42.** Porcentaje de área agrietada de la carpeta asfáltica en el pavimento

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME



**Figura 44.** Ahuellamiento en la vida útil del pavimento.

Fuente: Interfaz gráfica para el diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica CR-ME

<b>Cuadro 32. Evaluación de criterios de aceptación</b>				
<b>Modelo de Desempeño</b>			<b>Valor en el Diseño</b>	<b>Cumple</b>
Agrietamiento longitudinal	pies/milla	2000	16.75	SI
Área agrietada	%	25	0	SI
Ahuellamiento carpeta asfáltica	mm	12.5	7.49	SI
Ahuellamiento total	mm	17.5	11.23	SI

Fuente: LM-PI-GM-INF-22-14 y criterio de expertos.

Con ayuda del programa WESLEA de la Universidad de Auburn, se determinó el esfuerzo de tensión máximo que es inducido al pavimento el cual fue de 57.71 psi.

Por lo que aplicando la ecuación del modelo de fatiga para bases estabilizadas con cemento hidráulico vista en la metodología se obtiene un valor de 1.755.762 ejes equivalentes con lo cual se concluye que cumple ya se son mayores a los ejes equivalentes calculados para el pavimento.

## Opción Pavimento Rígido

### Diseño Metodología AASHTO 93

Cuadro 33. Cálculo Módulo Efectivo de Reacción de la Sub-Rasante		
Descripcion	Valor	Unidades
Modulo Compuesto Sub-Rasante	pci	653.28
Módulo compuesto corregido por estrato rígido	pci	653.28
Factor de Daño		28.16
Módulo Efectivo de reacción de la Sub-Rasante	pci	653.28
Corrección por pérdida potencial de soporte de la subbase. LS		1.5
Módulo Efectivo Final de reacción de la Sub-Rasante K	pci	94

Fuente: Propia.

Cuadro 34. Cálculo Espesor de Losa mediante AASHTO 93		
Espesor	Unidad	Valor
Calculado	plg	9.14
Redondeado	cm	23.5

Fuente: Propia.

En la figura AP-5 y AP-6 del apéndice se puede observar el diseño completo. Donde se muestra cada paso desarrollado para determinar el espesor.

### Diseño de Dovelas y Barras de Amarre

Las dovelas propuestas son sometidas a la revisión mediante la metodología antes descrita, para determinar si cumplen con las necesidades requeridas por el tránsito en el pavimento en estudio.

La propuesta inicial son dovelas #6 con espaciamiento a cada 25 cm. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Cuadro 35. Cálculo de Fracción de Carga en las Dovelas desde el borde.			
Dovela	Distancia (in)	Rci	Pdi (lb)
1	0.00	1.00	2180.37
2	9.84	0.87	1897.45
3	19.69	0.73	1602.42
4	29.53	0.59	1307.39
5	39.37	0.45	1012.37
	Σ	3.62	

Fuente: Propia.

Cuadro 36. Resultados de la ecuaciones necesarias en el cálculo de dovelas.	
Descripcion	Valor
Carga Critica (lb)	2180.37
Rigidez relativa de la losa de concreto "I"	0.02
Constante "β"	0.73
Esfuerzo aplicado en la dovela "σ"b (psi)	4585.75
Resistencia de la Dovela "fb" (psi)	4930.75

Fuente: Propia.

En el caso de las barras de amarre los resultados que se obtuvieron calculando la cantidad de acero son los siguientes:

Cuadro 37. Determinación del acero requerido para las barras de amarre.		
Descripción	Valor	Unidades
Acero en la sección transversal "As"	0.083	in <sup>2</sup> /ft
# Varilla Estimada	4	
Separación de las barras	60	cm
Acero estimado para la sección transversal	0.981	in <sup>2</sup> /ft

Fuente: Propia.

Al estimar el área de una varilla #4 con la separación a 60 cm, se logra obtener mayor área

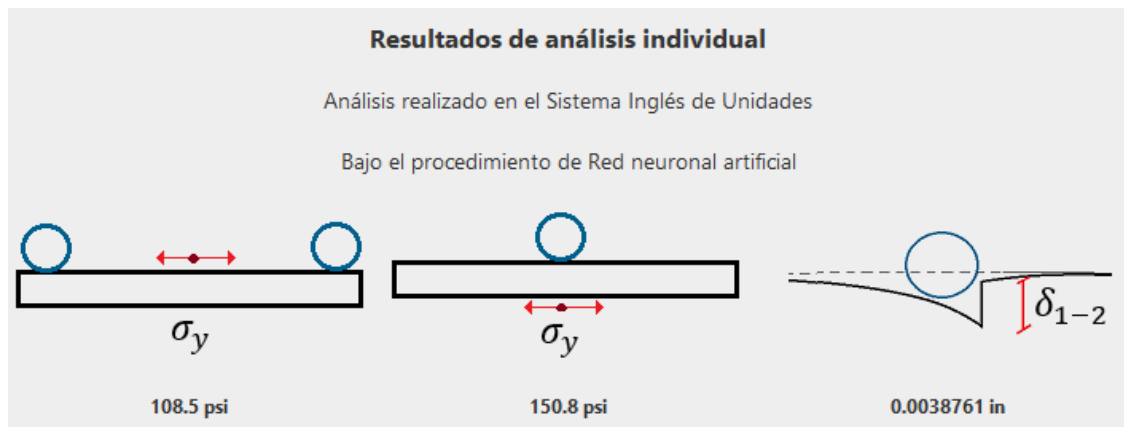
Se acepta la propuesta de dovelas #6 a cada 25 cm, ya que la resistencia es mayor al esfuerzo aplicado.

## Diseño Metodología Mecánica-Empírica

de acero que la requerida, por lo que se acepta esta propuesta.

## Revisión de Espesores AASHTO 93

Los esfuerzos y deformaciones determinadas por el AP-Rigid se pueden observar en la siguiente imagen de su interfaz.



**Figura 45.** Resultados de cálculo de esfuerzos revisión de espesores por AASHTO 93.  
Fuente: AP-RIGID, Software de Análisis de Pavimentos Rígidos

Con ello se procedió a la revisión de los modelos en donde:

### Modelo de Agrietamiento Transversal (Monge, S.)

Cuadro 39. Resultados Ecuacion de Agrietamiento Transversal por Fatiga	
Descripción	Valor
Aplicaciones admisibles	3,482,237
FD	0.545
CRK al 50% de Confiabilidad	26.5%
STDp	0.029
CRKp	30.0%

Fuente: Propia

### Modelo de Bombeo (Huang, Y.)

$$PI = (1.90)^{0.443} [-1.479 + 0.255(1 - 1) + 0.0605(254)^{0.5} + 52.65(9.25)^{-1.747} + 0.0002269(0)^{1.205}] = 0.075$$

### Modelo de Escalonamiento (Huang, Y.)

$$F = (1.90)^{0.5377} [2.2073 + 0.002171(127.5)^{0.4918} + 0.0003292(9.84)^{1.0793} - 2.1397(94)^{0.01305}] = 0.05 \text{ in}$$

En el próximo cuadro se puede observar que al utilizar el espesor determinado por AASHTO 93 no se cumple el valor límite de agrietamiento longitudinal por lo cual se podría inducir a mayores agrietamientos en el pavimento.

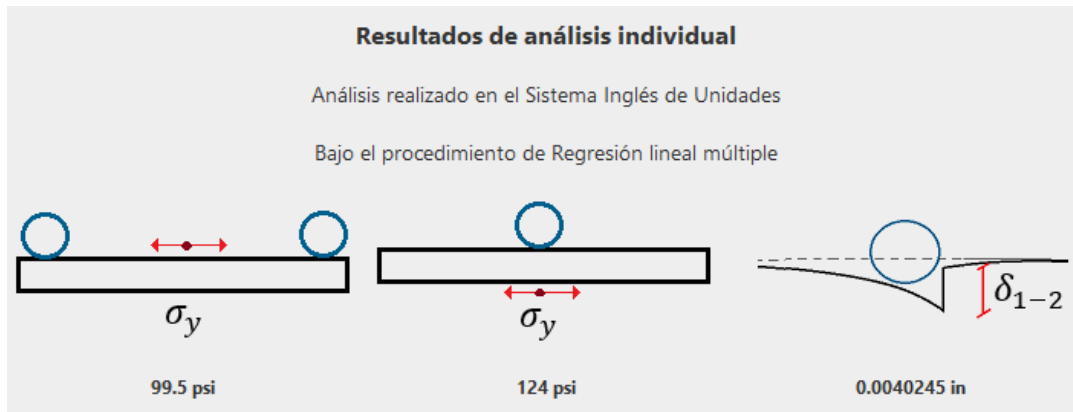
Cuadro 40. Criterios de Aceptación para el Pavimento Rígido			
Criterio	Valor Limite	Valor	
		Determinado	Cumple
Agrietamiento Longitudinal	20%	30%	NO
Bombeo	1	0.75	SI
Escalonamiento	0.12 in	0.05 in	SI

Fuente: Propia



## Diseño Mejorado

Se asume un espesor de 25 cm para revisar si cumple con los criterios de aceptación.



**Figura 46.** Resultados de cálculo de esfuerzos para la revisión de losa a 25 cm.  
Fuente: AP-RIGID, Software de Análisis de Pavimentos Rígidos

Cuadro 41. Resultados Ecuacion de Agrietamiento Transversal por Fatiga	
Descripción	Valor
Aplicaciones admisibles	5,181,703
FD	0.366
CRK al 50% de Confiabilidad	15.6%
STDp	0.029
CRKp	19.0%

Fuente: Propia

Modelo de Bombeo (Huang, Y.)

$$PI = (1.90)^{0.443} [-1.479 + 0.255(1 - 1) + 0.0605(254)^{0.5} + 52.65(9.84)^{-1.747} + 0.0002269(0)^{1.205}] = 0.60$$

Modelo de Escalonamiento (Huang, Y.)

$$F = (1.190)^{0.5377} [2.2073 + 0.002171(127.5)^{0.4918} + 0.0003292(9.84)^{1.0793} - 2.1397(94)^{0.01305}] = 0.05 \text{ in}$$

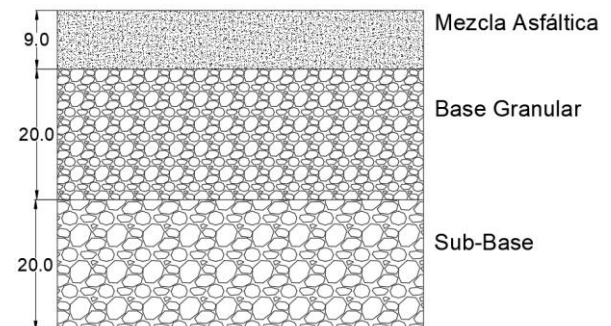
Cuadro 42. Criterios de Aceptación para el Pavimento Rígido			
Criterio	Valor Limite	Valor Determinado	Cumple
Agrietamiento Longitudinal	20%	19%	SI
Bombeo	1	0.6	SI
Escalonamiento	0.12 in	0.05 in	SI

Fuente: Propia

En el cuadro 42 se observa que al utilizar una losa de 25 cm que equivale a 9.84 in el valor del agrietamiento longitudinal disminuye a 19% cumpliendo con el 20% de valor máximo.

## Resumen de Diseños

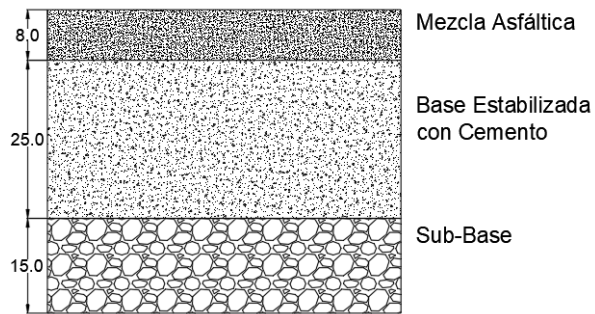
### Pavimento Flexible



**Figura 47.** Resultados de paquete estructura pavimento flexible.

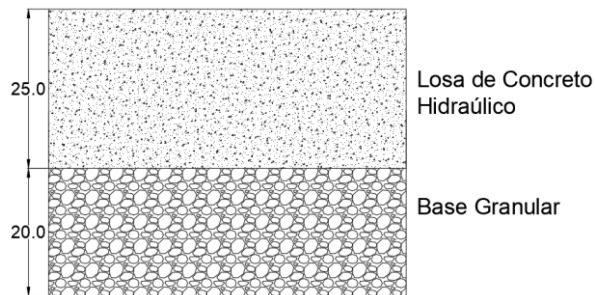
Fuente: Propia.

## Pavimento Semi-Rígido



**Figura 48.** Resultados de paquete estructura pavimento semi-rígido.  
Fuente: Propia.

## Pavimento Rígido



**Figura 49.** Resultados de paquete estructura pavimento rígido.  
Fuente: Propia.

# Inversión Inicial del Proyecto

## Opción Flexible

Cuadro 43. Resumen de Inversion Inicial en el Pavimento Flexible					
Rubro	Actividad	Unidad	Costo Unitario	Cantidad	Monto
CR 204.03	Excavacion de la vía	m3	₡7,794	3,078	₡23,989,695
CR 301.06	Suministro, colocación y compactación de sub-base granular	m3	₡16,275	1,508	₡24,542,463
CR 301.03	Suministro, colocación y compactación de base granular	m3	₡16,275	1,508	₡24,542,463
CR 413.01	Riego de imprimación	lt	₡727	10,680	₡7,766,402
CR 401.01	Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente	m2	₡18,170	6,280	₡114,107,198
-	Obras Preliminares	Glob		1	₡1,500,000
-	Control de Calidad	Glob		1	₡2,000,000
-	Limpieza Final	Glob		1	₡750,000
-	Tramites CFIA	Glob		1	₡20,915,813
<b>TOTAL</b>					<b>₡220,114,035</b>

Fuente: Propia

## Opción Semi-Rígido

Cuadro 44. Resumen de Inversion Inicial en el Pavimento Semi-Rígido					
Rubro	Actividad	Unidad	Costo Unitario	Cantidad	Monto
CR 204.03	Excavacion de la vía	m3	₡7,953	3,016	₡23,986,730
CR 301.06	Suministro, colocación y compactación de sub-base granular	m3	₡17,445	1,178	₡20,550,783
CR 302.01	Suministro, colocación y compactación de base estabilizada BE-25	m3	₡38,648	1,963	₡75,866,716
CR 413.01	Riego de imprimación	lt	₡653	10,680	₡6,970,887
CR 401.01	Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente	m2	₡16,216	6,280	₡101,834,809
-	Obras Preliminares	Glob		1	₡1,500,000
-	Control de Calidad	Glob		1	₡2,000,000
-	Limpieza Final	Glob		1	₡750,000
-	Tramites CFIA	Glob		1	₡24,067,042
<b>TOTAL</b>					<b>₡257,526,968</b>

Fuente: Propia

## Opción Rígido

Cuadro 45. Resumen de Inversión Inicial en el Pavimento Rígido					
RUBRO	ACTIVIDAD	UNIDAD	COSTO	CANTIDAD	MONTO
CR 204.03	Excavacion de la vía	m3	₡9,102	2,671	₡24,312,777
CR 301.03	Suministro, colocación y compactación de base granular	m3	₡16,273	1,508	₡24,539,498
CR 501.01	Losa de concreto hidráulico f'c = 320 kg/cm2	m2	₡42,771	6,280	₡268,599,693
-	Obras Preliminares	Glob		1	₡1,500,000
-	Control de Calidad	Glob		1	₡2,000,000
-	Limpieza Final	Glob		1	₡750,000
-	Tramites CFIA	Glob		1	₡33,778,707
				<b>TOTAL</b>	<b>₡355,480,675</b>

Fuente: Propia

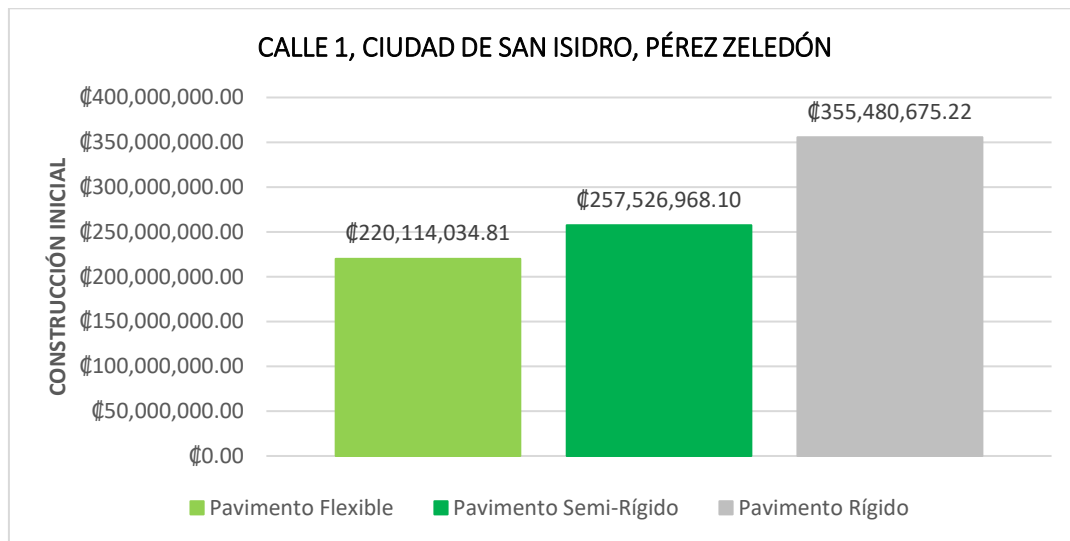


Figura 50. Comparación de inversión inicial según tipo de pavimento.

Fuente: Propia.

Cuadro 46. Diferencias obtenidas en la inversión		
Flexible y Semi-Rígido	Semi-Rígido y Rígido	Flexible y Rígido
₡37,412,933	₡97,953,707	₡135,366,640
15%	28%	38%

Fuente: Propia

# Plan de Conservación

Como principal producto en la planificación de la conservación de los pavimentos en estudio, se debía identificar en qué momento de su periodo de vida requerían una intervención y determinar el costo de estas inversiones de mantenimiento, para analizar qué puede ser más efectivo de

construir, según el punto de vista de costo en mantenimiento.

En las siguientes tablas, se pueden observar las intervenciones y los costos asociados a ellas en el periodo de diseño de los pavimentos estudiados.

Cuadro 47. Propuesta de intervenciones en el pavimento flexible						
Año	Daño	Intervención Propuesta	Unidad	Cantidad	Costo/U	Costo Total
1		-	-	-	-	-
2		-	-	-	-	-
3	Fisuras pequeñas 2 mm o menos	Ruteo y sellado de grietas	m	15.7	₡1,977	₡31,039
4		-	-	-	-	-
5	Deformaciones pequeñas, trabajos en la vía por parte de otras instituciones o errores constructivos.	Bacheo de MAC	ton	123.165	₡57,269	₡7,053,536
6	Fisuras pequeñas 2-4 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	31.4	₡1,977	₡62,078
7		-	-	-	-	-
8		-	-	-	-	-
9	Fisuras 5 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	47.1	₡1,977	₡93,117
10		-	-	-	-	-
11	Deformaciones, huecos menores, trabajos en la vía por parte de otras instituciones	Bacheo de MAC	ton	123.165	₡57,269	₡7,053,536
12	Fisuras 5 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	62.8	₡1,977	₡124,156
13		-	-	-	-	-
14		-	-	-	-	-
15	Deformaciones en la carpeta, para	Perfilado del Pavimento	m2	6280	₡800	₡5,024,000
15		Sobrecarpeta de MAC	ton	577.76	₡50,710	₡29,298,210
16		-	-	-	-	-
17		-	-	-	-	-
18	Fisuras pequeñas 2 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	15.7	₡1,977	₡31,039
19		-	-	-	₡0	-
20		-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>						<b>₡48,770,710</b>

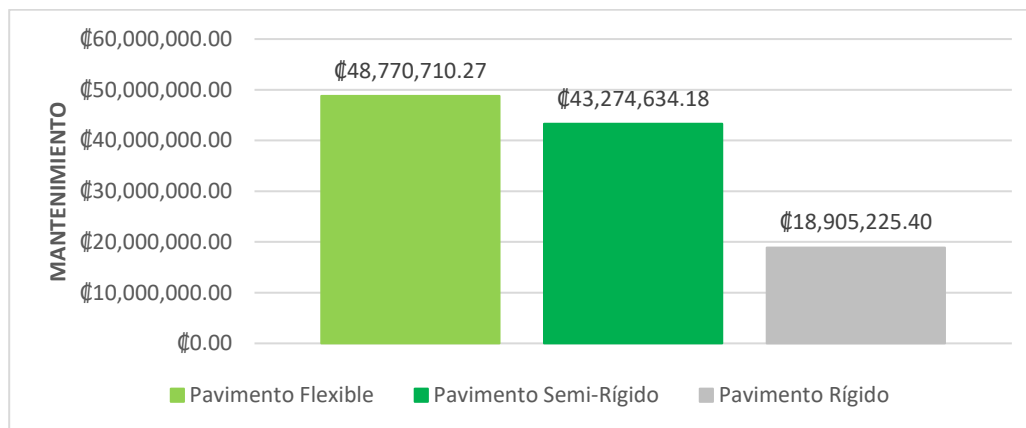
Fuente: Propia

<b>Cuadro 48. Propuesta de intervenciones en el pavimento semi-rígido</b>						
<b>Año</b>	<b>Daño</b>	<b>Intervención Propuesta</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo/U</b>	<b>Costo Total</b>
1		-	-	-	-	-
2		-	-	-	-	-
3	Fisuras pequeñas 2 mm o menos	Ruteo y sellado de grietas	m	15.7	₡1,977	₡31,039
4		-	-	-	-	-
5	Deformaciones pequeñas, trabajos en la vía por parte de otras instituciones o errores constructivos.	Bacheo de MAC	ton	109.48	₡57,269	₡6,269,810
6	Fisuras pequeñas 2-4 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	31.4	₡1,977	₡62,078
7		-	-	-	-	-
8		-	-	-	-	-
9	Fisuras 5 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	47.1	₡1,977	₡93,117
10		-	-	-	-	-
11	Deformaciones, huecos menores, trabajos en la vía por parte de otras instituciones	Bacheo de MAC	ton	109.48	₡57,269	₡6,269,810
12	Fisuras 5 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	62.8	₡1,977	₡124,156
13		-	-	-	-	-
14		-	-	-	-	-
15	Deformaciones en la carpeta, para	Perfilado del Pavimento	m2	6280	₡800	₡5,024,000
15		Sobrecarpeta de MAC	ton	433.32	₡58,547	₡25,369,586
16		-	-	-	-	-
17		-	-	-	-	-
18	Fisuras pequeñas 2 mm	Ruteo y sellado de grietas	m	15.7	₡1,977	₡31,039
19		-	-	-	-	-
20		-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>						<b>₡43,274,634</b>

Fuente: Propia

Cuadro 49. Propuesta de intervenciones en el pavimento rígido						
Año	Daño	Intervención Propuesta	Unidad	Cantidad	Costo/U	Costo Total
1		-	-	-	-	-
2		-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-
4	Fisuras pequeñas 2 mm o menos	Sello de juntas y grietas	m	62.8	₡3,714	₡233,239
5		-	-	-	-	-
6		-	-	-	-	-
7	Grietas en puntas de las losas que puedan generar problemas de deformación o escalonamiento	Sustitución de losas	m2	120	₡58,547	₡7,025,640
8		-	-	-	-	-
9	Fisuras 5 mm	Sello de juntas y grietas	m	78.5	₡3,714	₡291,549
10		-	-	-	-	-
11		-	-	-	-	-
12		-	-	-	-	-
13		-	-	-	-	-
14		-	-	-	-	-
15	Escalonamiento de algunas losas, grietas grandes en losas	Sustitución de losas	m2	180	₡58,547	₡10,538,460
15	Fisuras 5-7 mm	Sello de juntas y grietas	m	102.05	₡3,714	₡379,014
16		-	-	-	-	-
17		-	-	-	-	-
18	Fisuras 5-7 mm	Sello de juntas y grietas	m	117.75	₡3,714	₡437,324
19		-	-	-	-	-
20		-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>						<b>₡18,905,225</b>

Fuente: Propia



**Figura 51.** Comparación en costos de mantenimiento según tipo de pavimento  
Fuente: Propia

Cuadro 50. Diferencias obtenidas en los		
Flexible y Semi-Rígido	Semi-Rígido y Rígido	Flexible y Rígido
₡5,496,076	₡24,369,409	₡29,865,485
11%	56%	61%

Fuente: Propia

También en cada año de vida útil, se hará mínimo una inspección de control y seguimiento del pavimento.

# Análisis Técnico

## Matriz FODA

Con la matriz FODA, se recopilaron los puntos de vista que podrían beneficiar o perjudicar en el uso de un pavimento u otro, por lo cual estos resultados se presentan en los siguientes cuadros.

Cuadro 51. Matriz FODA del Pavimento Flexible	
Fortalezas	Oportunidades
Menor costo de inversión.	Mejorar la mezcla asfáltica con polímeros para aumentarle la rigidez, con lo cual puede reducir espesores de la capa de soporte.
Tiempo de colocación es más rápido	Reducción de tiempo en inicio de operaciones, lo cual beneficia a los usuarios.
Impermeable.	
No necesita juntas.	
Mayor facilidad de rehabilitación o reconstrucción	
Debilidades	Amenazas
Deformaciones.	Mala ejecución del proceso constructivo.
Durabilidad ya que el asfalto se oxida.	No se puede colocar mezcla asfáltica con lluvia.
Resistencia bajas a cargas abrasivas, puntuales o de impacto, en comparación con el rígido.	Acarreo lejanos que provoque bajas en las temperatura de la mezcla y no pueda ser colocada.
Mayor costo de mantenimiento	
Mayores espesores de capas de soporte	
Menos factible en términos de costo para tránsitos altos, en comparación con el rígido.	

Fuente: Propia



<b>Cuadro 52. Matriz FODA del Pavimento Semi-Rígidos</b>	
<b>Fortalezas</b>	<b>Oportunidades</b>
Reducción de espesor de la capa asfáltica.	Mezclar la base con el cemento en planta y acarrearlo.
Inversión inicial menor que el pavimento rígido.	Mejorar la mezcla asfáltica con polímeros para aumentarle la rigidez, con lo cual puede reducir espesores de la capa de soporte.
Más factible desde el punto de vista de costos para tránsitos altos que el pavimento flexible.	Creación de juntas en la base estabilizada para disminuir el agrietamiento interno.
Resistencia al agrietamiento por fatiga en la capa asfáltica.	
<b>Debilidades</b>	<b>Amenazas</b>
Tiempo de curado de la base estabilizada (mínimo 7 días).	Mala ejecución del proceso constructivo.
Resistencia bajas a cargas abrasivas, puntuales o de impacto.	No se puede colocar mezcla asfáltica con lluvia.
Susceptible al agrietamiento por contracción en la base estabilizada con cemento.	Acarreo lejanos que provoque bajas en la temperatura de la mezcla y no pueda ser colocada.
Problemas constructivos frecuentes en la compactación de bases estabilizadas con el cemento en el sitio de las obras.	

Fuente: Propia

<b>Cuadro 53. Matriz FODA del Pavimento Rígidos</b>	
<b>Fortalezas</b>	<b>Oportunidades</b>
Rigidez y resistencia alta de la estructura.	Nuevas tecnológicas de concreto o colocación que agilice su construcción.
Menores espesores de capas de soporte.	Utilización de dovelas en las juntas para mejorar la transmisión de la cargas entre losas adyacentes.
Resistencia altas a cargas abrasivas, puntuales o de impacto.	Beneficio en las comunidades, ya que la obra se debe intervenir en menor manera por mantenimiento y es más duradera.
Durabilidad alta.	
Menor costo de mantenimiento.	
<b>Debilidades</b>	<b>Amenazas</b>
Mayor costo de inversión inicial.	Mala ejecución del proceso constructivo.
Tiempo de colocación lento en comparación con el flexible. (Depende del método constructivo)	Agrietamiento temprano, por el viento.
Necesidad de juntas.	
Menor facilidad de trabajos diferidos.	
Mayor dificultad de rehabilitación o reconstrucción	

Fuente: Propia

## Revisión de Espesores

La calle, al ser una vía urbana, cuenta con sistemas de alcantarillados pluviales y sanitarios por debajo en algunos tramos, por lo que se consultó al Instituto de Acueductos y Alcantarillados la profundidad del sistema sanitario, ya que son los encargados.

En el cuadro 54 se observan las profundidades de cada pozo correspondiente a los que se encuentran ubicados en la Calle 1, por lo cual los espesores propuestos en los diseños no tendrían problemas constructivos por llegar a este sistema.

En el caso del alcantarillado pluvial la profundidad más cercana a la superficie es a los 60 cm por lo que cumple con los paquetes estructurales diseñados.

Pozo	Profundidad (m)
94	1.55
118	1.25
122	1.25
123	1
124	1
125	0.85

Fuente: Acueductos y alcantarillados

## Análisis Económico

Con respecto al análisis económico, la herramienta RED proporciona mucha información, pero de la cual en el siguiente cuadro y figuras se pueden observar los aspectos más importantes del análisis que la herramienta desarrolla y genera para el apoyo en la toma de decisiones.

En el cuadro 55, se observan como datos más importantes el valor actual neto y la tasa interna de retorno, pero, igualmente, se detallan más valores que el modelo calcula y proporciona.

Es importante destacar que en el análisis se toman en cuenta los costos de inversión inicial y costos de conservación en cada alternativa propuesta y también los costos de la conservación del pavimento existente en este momento.

<b>Cuadro 55. Resultados del Modelo RED, para las alternativas planteadas.</b>				
<b>Alternativas Estudiadas</b>	<b>SIN INVERSION</b>	<b>Nuevo Pavimento Flexible</b>	<b>Nuevo Pavimento Semi-Rígido</b>	<b>Nuevo Pavimento Rígido</b>
Valor Actual Neto (millones de \$) a una Tasa de Descuento del 12%	0.00	0.024	-0.007	-0.099
Tasa Interna de Retorno (%)	#N/A	13%	12%	9%
Beneficios Netos Anuales Equivalentes (\$/km) a una Tasa de Descuento del 12%	0.00	3721	-1090	-15066
Tasa de Retorno Modificada a una Tasa de Reinversión del 12% (%)	#N/A	12%	12%	11%
Valor Actual Neto por Costos Financieros de Inversión (proporción)	0.000	0.075	-0.019	-0.203
Valor Actual Neto por VA de Costos Económicos de Agencia (proporción)	0.000	0.065	-0.018	-0.199
Beneficios del Primer Año por Costos Económicos de Inversión (proporción)	0.000	0.105	0.090	0.070
Costos Financieros de Inversión (millones de \$)	0.000	0.382	0.449	0.572
VA de Costos Económicos de Agencia (millones de \$)	0.107	0.67	0.40	0.50
VA de Costos Económicos de Usuario de Tránsito Normal (millones de \$)	2.931	2.644	2.644	2.644
VA de Costos Económicos de Usuario de Tránsito Generado (millones de \$)	0.000	0.266	0.266	0.266
VA de Costos Económicos de la Sociedad (millones de \$)	3.038	3.283	3.315	3.407
Número de Muertes por km-año Después de la Inversión	0.000	0.000	0.000	0.000
Inversión por Población Servida (\$/persona)	0.000	18.256	21.434	27.337
Población Servida por Inversión (personas/1000\$)	0.000	54.775	46.654	36.580

Fuente: Modelo RED.

## Propuesta Elegida

Para llegar a determinar qué propuesta o alternativa de pavimento se debía desarrollar en la Calle 1 se desarrolló la reunión el 18 de octubre del 2017 dejando como evidencia la minuta que se encuentra en las AP-21 a la AP-23 de apéndice con lo cual la decisión final es utilizar pavimento semi-rígido, ya que por el volumen de vehículos que circulan por esta vía y los vehículos pesados era una mejor opción para disminuir las deformaciones por las mismas cargas vehiculares y por el clima de la zona que en su mayoría cálido.

# Análisis de Resultados

## Diseño de Pavimentos

Según la propuesta de alternativas para la Calle 1, se decidió diseñar tres tipos de pavimentos, los cuales son el flexible, semi-rígido y rígido. Se aplicaría la metodología mecanística empírica, pero utilizando el cálculo de los espesores por medio de la metodología AASHTO

93. Con esto indirectamente se pueden comparar las dos metodologías y generar un diseño más adecuado para el pavimento en estudio.

## Materiales

Como primer punto que puede influir en el adecuado rendimiento de un pavimento, están los materiales con que se cuenta y por ello se deben analizar adecuadamente. En los siguientes puntos se puede determinar qué situaciones fueron favorables y cuáles fueron limitantes para el diseño desde el punto de vista de los materiales:

- El CBR obtenido para la sub-rasante por medio del ensayo de DCP como se observa en la figura A-7 de anexos fue de 8.6 %, se determinaba según Bowles, J. que este porcentaje corresponde a una sub-rasante buena y se puede observar en la Tabla A-10 de anexos. Tomando en cuenta la consideración de que este ensayo se hace con las condiciones y características propias de materiales en el sitio y del momento que se realiza, ya que incide mucho el contenido de humedad del material; el dato que se utiliza para el diseño puede que no sea el más preciso y de ahí que se le recomienda a la U.T.G.V. hacer ensayos de CBR en laboratorio para determinar

con más exactitud el CBR de la sub-rasante en la Calle 1.

- Los ensayos de laboratorio, específicamente para determinar granulometría en la sub-rasante y límites de plasticidad, no son exactamente del sitio, son de un lugar muy cercano. Como ya se sabe, las características del suelo pueden variar mucho en pocos metros, por lo cual en este caso se puede inducir a un diseño menos preciso.
- Con respecto a los datos de los materiales granulares de base y sub-base que son materiales que deben ser adquiridos, los proveedores que colaboraron facilitaron datos, pero con la condición de que no fueran reproducidos ni presentados. Para la base el CBR es de 87 % y la sub-base de 30 %, con lo cual son materiales óptimos para utilizar en el proyecto y cumplen con los mínimos establecidos por el CR-2010, ya que para la base es de 80 % y para la sub-base de 30%. Estos datos se pueden observar en los cuadros 2 y 3.
- Los datos de la mezcla asfáltica (cuadro 5) fueron facilitados igualmente por el proveedor del material en el cantón, donde se puede observar que esa mezcla cuenta con el porcentaje óptimo de vacíos de aire del 4 % y está dentro del rango establecido por la normativa que es del 3% al 5%, el porcentaje de asfalto óptimo fue de 5.56 % y cabe mencionar que el tamaño máximo nominal de la mezcla es de 12.5 mm, porque es la que se maneja en la planta en este momento, pero como una recomendación para mejorar el desempeño del pavimento, si se utilizara este material, es que se elabore una

mezcla con tamaño máximo nominal de 19 mm, esto para darle mayor estabilidad y que no se vea afectado por deformaciones tempranas con el paso de vehículos pesados y por el tránsito lento que se genere en las intersecciones con las que cuenta la calle.

- En cuanto al concreto, lo que se determinó fue que era necesario un mínimo de 320 kg/cm<sup>2</sup> en la resistencia del concreto a compresión a los 28 días para que fuera efectivo su diseño, esto por las cargas vehiculares que se determinaron en la Calle 1.

## Estructuras de Pavimento Obtenidos

### Pavimento Flexible

En el caso del pavimento flexible, según la metodología AASHTO 93, el paquete estructural determinado fue de 43 cm con los espesores de capa: 13 cm capa asfáltica, 15 cm de base granular y 15 cm de sub-base, estos dos últimos utilizando los valores mínimos de la AASHTO, ya que sus espesores fueron menores según el cálculo. Esto ya que, al tener una capa de mezcla asfáltica de buen espesor y con módulo resiliente de 450 000 psi, genera que la rigidez más importante se concentre en esta capa y que se reduzcan los espesores necesarios de las capas inferiores.

A revisar estos espesores en el *software* CR-ME de diseño de pavimentos por la metodología mecanística empírica, los materiales se ven afectados por las condiciones climáticas de la zona y con respecto a esto su módulo sufre variaciones.

En las gráficas de módulos de los materiales quedan demostradas las variaciones que se calculan por el clima, a las cuales las afecta directamente el índice Thornthwaite y la temperatura, teniendo módulos resilientes para base, sub-base y sub-rasante (figura 13) mayores en los meses de menor precipitación y viceversa. Mientras que en la carpeta asfáltica los mayores módulos dinámicos se presentan en meses con temperaturas menores (figura 14).

Al calcular el porcentaje de daño 70 % máximo; el agrietamiento longitudinal, el cual su

máximo es de 2000 pies/milla, y el porcentaje de área agrietada 75% máximo que sufre el pavimento, se determinó que es muy bajo, por lo que se determinó optimizar el diseño.

El ahuellamiento que se observa en la figura 18 se puede comprobar que cumple con el umbral de falla límite para deformaciones permanentes en pavimentos con menos de 3 millones de ejes equivalentes, el cual es de 25 mm establecido en LM-PI-GM-INF-22-14, ver tabla A-9 de anexos.

Por los resultados de la revisión de espesores, se propone la reducción de 13 cm a 9 cm en la capa de mezcla asfáltica y el aumento de las capas inferiores a 20 cm, esto para mejorar la distribución de los esfuerzos pensando más en las cargas vehiculares pesadas que siempre son las que generan mayor daño en los pavimentos. Por lo que el paquete total propuesto es de 49 cm.

Los módulos de materiales (figura 19) siguen el mismo comportamiento ya explicado anteriormente, al igual que el módulo dinámico de la mezcla asfáltica (figura 20).

Al calcular el porcentaje de daño, se nota que aumenta de 15.64% a 23.64% (figura 21), comparándolo con la revisión de espesores previa; aunque, igualmente, sigue siendo un valor bajo para un pavimento. El agrietamiento longitudinal aumentó un 56 % con respecto al calculado en la revisión, llegando a un valor de 1060 pies/milla (figura 22), pero inferior al máximo de 2000 pies/milla. El porcentaje de área agrietada se redujo muy levemente, de 4.4 % ahora a 4.2%(figura 23), esto debido al aumento de los espesores de las capas inferiores que ayudan a disminuir esfuerzos en la capa superior.

El ahuellamiento que se observa en la figura 24 se observa que tuvo un aumento de prácticamente 1 mm con respecto al diseño anterior, pero, igualmente, cumpliendo con el umbral de falla límite para deformaciones permanentes en pavimentos con menos de tres millones de ejes equivalentes, el cual es de 25 mm establecido en LM-PI-GM-INF-22-14, ver tabla A-9 de anexos.

### Pavimento Semi-Rígido

En el pavimento semi-rígido, utilizando base estabilizada con cemento, según la metodología AASHTO 93, se determinó que el paquete estructural es de 48 cm con los espesores de

capa: 8 cm capa asfáltica, 25 cm de base estabilizada y 15 cm de sub-base, utilizando los valores mínimos en la capa asfáltica y la sub-base, ya que sus espesores fueron menores según el cálculo. Esto debido a que, al tener una base estabilizada de mayor rigidez que la capa de mezcla asfáltica, concentrará los esfuerzos que vienen de la superficie a la capa de la base, la cual tendrá mayor capacidad para amortiguar las cargas vehiculares. Por esto, según el cálculo de espesor para la carpeta asfáltica da un valor de 2.74 cm

Igualmente, como se explicó en el pavimento flexible, el comportamiento de la sub-base y sub-rasante van a mantenerse, pero la base estabilizada cambia, ya que el *software* lo toma como módulo resiliente final por simplificación de cálculo y porque teóricamente la base estabilizada no debería verse afectada por el clima, esto fue aclarado por el Ing. Christopher Trejos. Este comportamiento se puede observar en la figura 22. El módulo dinámico de la carpeta asfáltica tiene el mismo comportamiento (figura 23).

Los porcentajes de daño, área agrietada y agrietamiento longitudinal son calculados para la carpeta asfáltica, por lo cual, en el caso de pavimentos con base estabilizada con cemento hidráulico, estos valores son prácticamente imperceptibles. El porcentaje de daño es de 1.44 % en la vida útil (figura 24), el área agrietada de 0 % (figura 25) y el agrietamiento longitudinal de 16.75 pies/milla (figura 26).

El ahuellamiento de 11.23 mm que se observa en la figura 27, cumple perfectamente el umbral de falla de 25 mm.

En este caso, la base estabilizada con cemento hidráulico es la capa clave del pavimento y como limitante del *software*, no calcula la fatiga, por lo cual se calcula externamente, y arrojó que cumplía con las cargas del tránsito en la calle, pero que no era posible su optimización, ya que, si se disminuía más, la fatiga sería muy alta o hasta mayor que los ejes equivalentes calculados.

Por las razones anteriores, los espesores obtenidos por AASHTO 93 son los que se utilizarían como paquete estructural final si esta alternativa se escogiera.

## Pavimento Rígido

En el pavimento rígido el objetivo de la metodología mecanística empírica es obtener un espesor para la losa de concreto hidráulico, con lo cual se deben suponer algunos factores para llegar a este cálculo, como el espesor de la base que en este caso se supuso de 8 in (alrededor de 20 cm) y la misma losa que se supuso igualmente de 20 cm.

Con los pasos determinados en la metodología AASHTO 93 para este caso, se llegó a un espesor de 23.5 cm que es un espesor, según la experiencia del Ing. Ronny Rojas, aceptable para las condiciones de carga que se presentan; pero al ser revisado por los modelos mecanísticos se determinó que no cumplía con el criterio máximo de 20% de agrietamiento longitudinal que el AASHTO 2008 determina.

Por lo anterior se debió revisar espesores mayores hasta determinar que el espesor de 25 cm era el que cumplía con este criterio.

También se diseñaron las dovelas y las barras de amarre que requería el pavimento por ser JPCP y por tener cargas vehiculares considerables, con lo que, según el Dr. Pedro Castro, estos mecanismos ayudan a distribuir los esfuerzos y a reducir fallas por escalonamiento entre las losas.

Las dovelas propuestas de varilla lisa # 6 a cada 25 cm, con una longitud de 35 cm cumplieron con la metodología de diseño establecida y las barras de amarre longitudinales que se obtuvieron son de varilla #4 a cada 60 cm, con longitud de 30 cm y deben ser lisas para que tengan la facilidad de movimiento por la expansión térmica del material.

Por lo cual, el pavimento debería comportarse de una buena manera por una mejor distribución de sus esfuerzos.

Los esfuerzos y deformaciones que son sometidos en este pavimento se observan en la figura 45 y establece que el esfuerzo máximo es de 150.8 psi. Con esto se determinó que el agrietamiento longitudinal estimado para el pavimento, según el modelo desarrollado para Costa Rica del Ing. Sukti Monge, es de 30 %, con un 90 % de confiabilidad, por lo que cumple con el valor límite 20 % establecido en AASHTO 2008.

Para el modelo de bombeo que Huang, Y presenta, se determinó un valor de 0.75, el cual está dentro del rango de 0 donde no hay bombeo y 1 hay un bombeo leve.

Con respecto al modelo de escalonamiento que presenta Huang Y., se prevé que el pavimento presentará un escalonamiento de 0.1 cm y cumplen con el máximo de 0.12 in que determina AASHTO 2008.

Por lo cual, el diseño previo según las revisiones no cumple, y se debe aumentar su espesor para reducir los esfuerzos que se generan en la losa. Se determinó que 25 cm cumple con los criterios de aceptación.

En la figura 46 se observa la reducción de los esfuerzos hasta 124 psi con ello ya el agrietamiento longitudinal era del 19% cumpliendo el criterio antes mencionado el bombeo se redujo a 0.6 y el escalonamiento se mantuvo igual.

Concluyendo que el diseño final requerido para el pavimento rígido debe ser de 25 cm de losa de concreto hidráulico y 20 cm de base granular.

## Comparación de Metodologías de Diseño

Los espesores de capa calculados con la metodología empírica cuando se hacen diseños de pavimentos flexibles muestran que son mayores a cuando se realizan con la metodología mecanística; además se observa que los espesores de carpeta asfáltica se reducen con el análisis mecanístico empírico, formulándose la hipótesis de que la metodología empírica, cuando se realizan diseños de pavimentos flexibles, es conservadora. Por otro lado, al realizar los diseños de pavimentos semi-rígidos el comportamiento se mantuvo constante porque al revisar la fatiga de la base estabilizada con cemento hidráulico no dio la opción de disminuirla.

En el caso del pavimento rígido se debió aumentar el espesor ya que el agrietamiento lateral no cumplía para el espesor dado por AASHTO 93; y con la revisión mecanística se determinó este criterio.

Con esto se nota que el diseño por la metodología empírica no es el más adecuado para utilizar en Costa Rica, debido a que podría dar espesores de capa mayores a lo realmente requerido en pavimentos flexibles generalmente, además esta metodología no toma en cuenta que los materiales son afectados de forma considerable dependiendo de la condición del

clima de la zona en que se desee colocar el pavimento, siendo esto bastante perjudicial para hacer un diseño certero debido a que son materiales muy afectados por las precipitaciones y temperatura.

Cabe destacar que el diseño empírico no toma en ningún momento consideración por la temperatura en la que se encuentra la zona donde se hace el diseño, incluso la humedad es considerada sutilmente en el factor de drenaje, siendo su escogencia de una tabla en la que se toma un dato dependiendo del tiempo en que la zona generalmente se mantienen húmeda y de su capacidad para drenar; siendo este factor muy dependiente de la experiencia del diseñador, pues no tiene una base clara por su escogencia, facilitando la posibilidad de cometer una equivocación y afectar gravemente el diseño.

Caso contrario ocurre con la metodología mecanística empírica en donde el software CR-ME desarrollado por LanammeUCR brinda la posibilidad de ingresar datos de precipitación y temperatura, haciendo un cálculo de la afectación de los módulos de la carpeta asfáltica, base, sub-base y subrasante mediante el índice de Thornthwaite, graficando su variación en los 12 meses del año. (Para pavimentos flexibles y semi-rígidos).

La metodología empírica, por otro lado, no hace ningún análisis para determinar los esfuerzos y deformaciones, a diferencia del mecanístico empírico, donde realiza un análisis de en la estructura del pavimento, permitiendo obtener resultados, mediante los modelos de desempeño calibrados por LanammeUCR, de la fatiga en la carpeta asfáltica, el área de agrietamiento, el agrietamiento longitudinal y, además, la deformación permanente en cada una de las capas, esto en el caso del pavimento flexible y semi-rígido. Para pavimento rígido también se hace la revisión, pero con otros modelos calculados en una hoja de cálculo.

Por lo dicho anteriormente, el diseño de pavimento se beneficia debido a que se permite tener conocimiento sobre, el comportamiento del pavimento durante el periodo de diseño; además brinda la oportunidad para realizar un plan de conservación para el pavimento diseñado y con ello intervenir en este antes de que presente condiciones que sean más costosas para rehabilitación.

Otro aspecto de importancia es que los módulos de resiliencia que se obtienen mediante

el método empírico son tomados de nomogramas de la AASHTO 93, siendo correlaciones realizadas con materiales diferentes a los que hay en nuestro país, siendo una vez más ventajoso el uso de la metodología mecanística empírica propuesta por LanammeUCR, ya que estas correlaciones de CBR con módulo dinámico y resilientes son realizadas con pruebas que se hicieron con materiales de Costa Rica, haciendo que sean datos más certeros.

Además, CR-ME brinda la posibilidad de escoger la velocidad operacional, el ancho de carril, el periodo de diseño y consideración o no del zigzagueo lateral, esto para analizar el impacto de las deformaciones en la superficie del pavimento. Por otro lado, brinda la posibilidad de escoger el tipo de granulometría, ligante, porcentaje de vacíos y porcentaje de asfalto efectivo que tendrá la carpeta asfáltica. Dando la posibilidad de hacer cada vez más específico el diseño de los pavimentos en Costa Rica y permitiendo tropicalizar las ecuaciones de desempeño según las condiciones del clima y los comportamientos de los materiales lo más cercano posible a la realidad.

## Presupuesto del Proyecto

Para las alternativas de pavimento propuesto, se debió calcular el costo de inversión inicial que debería hacer la Municipalidad de Pérez Zeledón para construir el pavimento, ya que este aspecto tiene un porcentaje muy grande en la decisión del pavimento por construir, en el aspecto público, los presupuestos siempre son reducidos y no siempre se tienen a la mano directamente. Por ello siempre es importante tener una estimación de costos que respalde las decisiones.

Para el pavimento flexible, se calculó un valor estimado de ₡220,114,035, en el cuadro 43 se describe de mejor manera. El pavimento semi-rígido un valor de ₡258,431,565 (cuadro 44) y, por último, el costo de la inversión inicial para construir un pavimento rígido es de ₡355,480,675 (cuadro 45).

Con lo cual se determina que el pavimento flexible es más económico en un 15 % que el pavimento semi-rígido y un 38 % que el

pavimento rígido. Suponiendo que el aspecto económico de la inversión inicial fuera el único factor para tomar la decisión, se construiría un pavimento flexible sin duda.

## Plan de Conservación

La determinación de fallas en el pavimento sin herramientas definidas es muy complicada, también porque la U.T.G.V. no tiene una base de datos de daños en los pavimentos por cada año. Por lo que, como soluciones que se pueden aplicar, se recurrió a la experiencia y conocimientos de los ingenieros viales y técnicos viales de la U.T.G.V, para proponer qué daños se pueden generar en los pavimentos y la forma de subsanarlos.

En ese caso, se pudo generar una matriz de daños que se podían presentar en el proyecto y soluciones con sus costos para que sea evaluado, posteriormente, en el análisis económico. Como se observan en los cuadros 47, 48, 49.

En este caso, el valor más alto de conservación se obtuvo para el pavimento flexible, seguido del semi-rígido y como el más económico en este aspecto está el pavimento rígido. Esto prueba lo que se comenta sobre este caso, que el pavimento flexible es mucho más caro que el rígido en términos de mantenimiento.

Mantener el pavimento flexible es 33 % más caro que el del pavimento rígido a lo largo de su vida útil.

Por lo cual, el ente municipal y las personas que estén decidiendo qué pavimento se va a utilizar deben tomar en cuenta este aspecto.

También es importante que sea cual sea el pavimento que se elija y se construya, ya en el periodo de operación se deben hacer inspecciones periódicas de mínimo un año, para estar monitoreando el estado del mismo con las hojas de inspección visuales que se anexan y así poder determinar una curva de rendimiento patrón del cantón que mejore futuros proyectos que se vayan a desarrollar.



# Análisis Técnico y Económico

## Análisis de la Matriz FODA

El pavimento flexible tiene varios aspectos que lo benefician con respecto a las otras alternativas, ya que su costo de inversión es menor y esto se puede confirmar con el presupuesto determinado anteriormente, ya que tiene ahorros del 15 % y 38 % con respecto al semi-rígido y rígido respectivamente. Otros aspectos importantes en la colocación de este tipo de pavimento es que es más rápido y esto beneficia en un menor tiempo de puesta en marcha, por lo que los usuarios no deben tomar otras rutas y en la parte comercial, se agiliza que se abra la ruta para que los clientes puedan acceder a estos establecimientos.

Como aspecto importante, en el futuro, las obras de mantenimiento y rehabilitación del pavimento flexible son más rápidas que hacer una intervención en un pavimento rígido, por la naturaleza de los materiales y su composición. Pero tiene el aspecto negativo de que los costos de conservación son mayores y también se puede comprobar con los costos calculados (cuadro 44), donde este costo es mayor.

Según Padilla “La temperatura funcional del asfalto es de gran importancia, así como los gradientes de temperatura que en ocasiones pueden ser cambiados debido a la conductividad térmica de la mezcla, así como la brillantez o la reflectividad, por medio de la selección del agregado, lo que afecta a la deformabilidad de los pavimentos” (Padilla, 2014, p.66).

Por lo que si el pavimento flexible está en zonas climáticas cálidas con temperaturas altas es muy susceptible a las deformaciones permanentes conforme pasa su vida útil y esto se agrava más con cargas de tránsito pesado, por lo cual se podría mejorar utilizando una mezcla con tamaño máximo nominal de 19 mm o con la inclusión de polímeros que aumenten la rigidez.

Otro aspecto negativo es que con el paso del tiempo el asfalto de mezcla se va oxidando, deteriorando la unión de todas las partículas y esto puede llegar a generar pequeñas grietas o fisuras por donde puede ingresar agua que empiece a dañar las capas inferiores, llevando

así a otros daños más graves como bombeo de finos y deformaciones. Y así lo confirma Terán: “la oxidación incrementa la rigidez de la mezcla, vinculándose con las deformaciones plásticas y posibles agrietamientos por fatiga que pueden afectar al pavimento flexible, al relacionarse directamente con la tensión-deformación al cual está sometido” (p.1).

El pavimento semi-rígido en comparación con el flexible se diferencia solamente en la estabilización de su base con cemento, donde le genera mayor rigidez y capacidad de resistir mayores cargas. La estabilización de esta base atrasa el proceso de puesta en marcha siete días, para darle el tiempo de curado necesario a la base, en algunos casos este curado se reduce a tres días sin darle el máximo de resistencia, esto tal vez utilizando un diseño de mezcla que genera mayor resistencia temprana.

Como punto muy importante, el agrietamiento en la carpeta asfáltica es muy bajo y se comprobó con el diseño mecanístico empírico desarrollado, donde del flexible al semi-rígido el daño pasó de 23.64% a 1.44%, esta es una reducción muy considerable que se debe ver reflejada en una menor generación de grietas en la carpeta asfáltica.

Pero se debe tomar en cuenta que se debe revisar la fatiga en la base estabilizada, ya que al ser la capa de la estructura que toma la mayoría de la carga, ésta se va a fatigar más y puede que genere las grietas internas y las refleje de abajo hacia arriba en la carpeta asfáltica. Esta generación de grietas se puede disminuir haciendo juntas como en las losas de concreto, ya que ayuda a que las fallas y la energía se dirijan a las juntas y no las genere en otro lugar que afecte mayormente.

También es de suma importancia que la base estabilizada tenga la cantidad de cemento hidráulico requerida según la resistencia deseada revuelto con el material granular, ya que si se da un exceso de cemento en la mezcla es propenso a generar grietas por contracción tempranas y que desde el inicio disminuiría la calidad del pavimento.

Como un aspecto importante que se pudo determinar en el proyecto, fue que el pavimento semi-rígido no es tan beneficioso en cuanto a reducción del espesor de la capa asfáltica para tránsitos bajos, ya que el beneficio de bajar el espesor de la carpeta asfáltica no se ve reflejado, por ser tan bajo este espesor, debido a las cargas

reducidas se debe utilizar el espesor mínimo y se pierde esa reducción de capa. Por lo tanto, determinar un mayor costo de inversión inicial que el pavimento flexible.

El pavimento rígido tiene la ventaja de que su rigidez es muy superior a los pavimentos con mezclas asfálticas, por lo que lo hacen mucho más duraderos y más efectivos a la hora de que circulan cargas de tránsito altas, ya que no se fatigan de la misma manera que lo hace la mezcla asfáltica.

La conservación de este tipo de pavimento se facilita muy considerablemente, dándole ventajas importantes a los administradores de estas vías, ya que como se nota en el cuadro 44, el pavimento flexible, en cuanto a conservación es un 61 % más caro y claramente se ve atractivo este aspecto. Pero cuando se debe hacer una intervención o rehabilitación de la superficie, las labores son más complejas y más laboriosas que en un pavimento con mezcla asfáltica.

El tiempo de construcción y de puesta en marcha sí es mucho mayor en este tipo de superficies y por ello, en situaciones en que la vía debe ser habilitada rápidamente, no son factibles. Un punto importante que a veces no se toma en cuenta es la mano de obra y las constructoras, ya que el país cuenta con más de 90 % de las vías pavimentadas en pavimento flexible y la experiencia, el conocimiento y los equipos requeridos no son tan amplios como lo es para la aplicación de mezclas asfálticas. Por eso es que se reflejan en malas prácticas constructivas que generan fallas tempranas en los pavimentos rígidos construidos en el país. Pero, igualmente, no debe ser excusa para desarrollar pavimentos de este tipo, ya que son muy útiles y necesarios dependiendo de las características de las vías y las cargas vehiculares que se presenten.

## Análisis de Espesores

Tomando en cuenta que por debajo de la vía en estudio se encuentran sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial era requerido determinar si los espesores diseñados podían construirse sin afectar estas estructuras subterráneas.

En el caso del sistema de alcantarillado pluvial, el punto más cerca de la superficie se encuentra a 85 cm, por lo que no se vería afectado de ninguna manera, ya que la estructura

más gruesa es la del pavimento semi-rígido y esta es de 49 cm.

En el sistema de alcantarillado pluvial, el punto más cercano a la superficie está a 80 cm, por lo cual tampoco habría afectaciones al mismo.

## Análisis Económico Aplicando el Modelo RED

En el cuadro 55 se observa que el pavimento flexible arroja un VAN de 0.024, esto en millones de dólares y un TIR de 13 %, el pavimento semi-rígido un VAN de -0.007 y un TIR de 12 % y, por último, el pavimento rígido un VAN de -0.099 y un TIR de 9 %.

Con lo cual, según el criterio que Saul Fernandez, proporciona, el VAN positivo y el TIR positivo dan el criterio de que se debe escoger el proyecto del pavimento flexible, desde el punto de vista económico, dando de baja las otras dos alternativas.

Estos valores reflejan desde un punto de vista matemático que el proyecto utilizando un pavimento flexible es rentable para la municipalidad y para los usuarios, ya que genera beneficios en cuanto a una mejora en los tiempos de tránsito por el mismo y el costo de los usuarios al transitar, con respecto a el estado actual que tiene el pavimento.

## Propuesta Elegida

En la reunión donde presentaron las propuestas y se debía determinar que alternativa era la más viable para desarrollar en la calle 1 se pudo analizar con base a los resultados del proyecto y experiencia y conocimiento de los profesionales involucrados los siguientes comentarios y análisis que determinaron el pavimento a construir.

- En cuanto a los espesores de los sistemas de alcantarillado por debajo de la calle ninguno de los espesores lo afectaría por lo cual este aspecto no interfiere en la decisión de la alternativa.
- Discusión del costo de inversión inicial: Según los resultados el costo más bajo de las alternativas era construir un pavimento flexible el cual sus costos se estimaba en \$220,114,034, pero el

pavimento semi-rígido tiene una diferencia del 15% mayor, aunque por aspectos técnicos y mejora en el rendimiento del pavimento se puede asumir. El pavimento rígido en este caso si se encuentra bastante más elevado el precio y por lo cual se descarta según este criterio.

- Aspectos Técnicos y Constructivos: Entre el pavimento flexible, semi-rígido y rígido se comenta que el pavimento flexible es el más sencillo de desarrollar y el que tomaría menor tiempo de puesta en marcha pero que igualmente se podría el pavimento semi-rígido para disminuir el efecto de las deformaciones en la vida útil del pavimento ya que a lo largo de los años en el futuro el crecimiento de la flota vehicular subirá un 3% y pasan vehículos pesados a velocidades bajas que propician a que esta deformación se genere. Igualmente se propone que la mezcla que se utilice sea de 19 mm para ayudar a la estabilidad de la mezcla.
- Conservación: El costo de mantenimiento será en flexible y semi-rígido son más elevados que el rígido, pero igualmente sumando costos iniciales y mantenimiento se determina que estas dos primeras opciones son menores. Y que el mantenimiento que se haga es más rápido que en un pavimento flexible.
- Aspectos Sociales: En cuanto a este aspecto se determina que cualquier alternativa va mejorar en un 100 % el transitar por esta vía, pero que construir

un pavimento rígido va afectar mayormente a los comerciantes que por estar cerrada más tiempo la vía las ventas y servicios que ofrecen van a decaer. En este caso necesario que la puesta en marcha será rápida para habilitar el ingreso al Hospital.

- Análisis Económico: Se determinó que según los resultados solo el pavimento flexible cumplía con los requerimientos de VAN positivo y TIR mayor al 12% de la tasa de retorno, pero se comenta que este método bueno, pero que no satisface por completo las necesidades para decidir con base en estos indicadores. Y por lo cual se sigue tomando en cuenta la opción del pavimento semi-rígido.

Por lo que tomando en cuenta los pros y contras de cómo se podrá comportar el pavimento en el paso de tiempo con las cargas vehiculares en crecimiento y vehículos pesados transitando por el mismo se determina que el pavimento semi-rígido es la mejor opción para satisfacer las necesidades de la Calle 1 y que no se vea deformada en un periodo muy temprano por el tránsito pesado que pueda circular por esta vía. Los costos son aceptables y el rendimiento del pavimento va ser mejor por el aumento de rigidez

# Conclusiones

- La estructura del pavimento flexible diseñada por la metodología mecanística empírica arroja un espesor de 9 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base granular y 20 cm de sub-base aplicando criterio ingenieril y evaluando cómo se podría desarrollar en el tiempo.
- La estructura del pavimento semi-rígido diseñada por la metodología mecanística empírica arroja un espesor de 8 cm de carpeta asfáltica, 25 cm de base estabilizada con cemento hidráulico y 15 cm de sub-base.
- La estructura del pavimento rígido diseñada por la metodología mecanística empírica arroja un espesor de losa de 25 con 20 cm de base granular.
- La metodología empírica no toma en cuenta específicamente las condiciones climatológicas de la zona donde se van a realizar los diseños para un pavimento, está básicamente solo toma como variables más importantes los tránsitos y módulos de los materiales, pero sin afectarlos con el paso del tiempo ni haciendo un análisis de esfuerzos o deformaciones para determinar los desempeños de la estructura de pavimento.
- Se determinó que el pavimento semi-rígido no es tan beneficioso desde el punto de vista de que ahorra en la capa de mezcla asfáltica, ya que el espesor determinado por la metodología mecanística empírica es mucho menor al mínimo y por ello se debe usar este último. Ya que es al ser no tener una disposición en cuanto a espesores mínimos con la metodología mecanística empírica se toma como regla la AASHTO 93 es este aspecto.
- El pavimento rígido tiene mejor desempeño en el tiempo, pero el costo de inversión inicial es muy elevado, casi un 38 %, pero en la conservación de este pavimento es el de menor costo.
- El pavimento más factible para construir y generar beneficios a la comunidad, según el modelo RED de evaluación económica de caminos, es el pavimento flexible, ya que su VAN es positivo y la tasa interna de retorno es mayor al 12 %, el cual es el valor establecido por el programa MOPT-BID.
- El modelo RED de evaluación económica de caminos está desarrollado para pavimentos de bajo volumen, por lo que utilizarlo en grandes proyectos no es muy adecuado.
- El pavimento semi-rígido actúa mejor en cuanto a deformaciones permanentes ya que evita que a lo largo de la vida útil se generen estas deformaciones en gran magnitud y así disminuir los daños que se presenten tomando en cuenta las cargas vehiculares que circulan por esta vía.
- Se determinó por medio de la reunión desarrollada con todos los profesionales de la Unidad Técnica de Conservación Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón que la mejor opción para construir en la Calle 1 y que efectivamente va a dar buenos resultados es construir un pavimento semi-rígido.
- Las decisiones que se tomen en proyectos de este tipo no se pueden basar solo en los costos de inversión y mantenimiento se deben tomar en cuenta los impactos que haga en la sociedad y las ventajas de desarrollar uno u otro tipo de pavimento.

# Recomendaciones

- Para la Municipalidad de Pérez Zeledón la mejor opción para determinar las necesidades de los pavimentos de su red vial es implementar un Sistema Municipal de Administración de Pavimentos (SMAP). El cual por sí mismo pueda categorizar cada una de las calles que se encuentran inventariadas y agilizar la decisión de los funcionarios encargados de las intervenciones en ellos. La elaboración de este sistema no entra en el alcance del proyecto, pero es una recomendación para el ente municipal.
- También es importante que la U.T.G.V. de la Municipalidad de Pérez Zeledón esté cuantificando la fatiga, el agrietamiento y el ahuellamiento de los pavimentos diseñados con CR-ME en sitio, para comparar el modelo teórico con la realidad y determinar si debe ser ajustado para futuros diseños. Esto con inspecciones periódicas cada año también, con el fin de determinar una curva de rendimiento del pavimento que funcione como guía para el desarrollo de otros planes de mantenimiento en el futuro.
- La aplicación de *softwares* como el HDM-4, para el análisis de pavimentos y planificación de mantenimientos es muy útil para U.T.C.V, por lo que capacitarse sobre este y el utilizarlo sería una ventaja en este aspecto.
- En cuanto a los datos para diseño de pavimentos, sí es importante realizar todos los ensayos de materiales que sean requeridos para tener información veraz y así procurar que el diseño sea más acorde al escenario que se presente.
- En el CR-ME es necesario corregir algunos aspectos en el cálculo de los módulos resilientes, ya que las gráficas en la versión más reciente los genera constantes, por ello se debió utilizar la versión anterior que sí los calculaba bien.
- Es importante mejorar el diseño de pavimentos semi-rígidos, ya que no calcula la fatiga de la base estabilizada con cemento hidráulico, que en este caso es uno de los puntos más importantes. También que su módulo resiliente es calculado como el módulo final por simplificación de los cálculos y no tiene una ecuación que pueda predecir cuál es el comportamiento a lo largo de los meses, como sucede en el módulo dinámico y módulos resilientes de los materiales granulares.
- Para el pavimento semi-rígido escogido como la alternativa más efectiva, se recomienda que su mezcla asfáltica sea de 19 mm y no de 12,5 mm, esto para darle mayor estabilidad y para los vehículos pesados que puedan transitar por la vía.
- Revisar previo a la construcción del pavimento el sistema de drenajes y determinar si se debe intervenir para prevenir daños por mala conducción del agua pluvial a la hora de que el pavimento entre en funcionamiento.

# Apéndices

Proyecto: Calle 1, Ciudad de San Isidro, Pérez Zeledón.

Tipo de Pavimento: Flexible

Fecha: 17/07/2017

Elaborado por: José R. Murillo Barboza

## DISEÑO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS FLEXIBLE EN AASHTO 93

### A. CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES

1. Módulo de resiliencia de la carpeta asfáltica (psi)=	450000
2. Módulo de resiliencia de la base granular (psi)=	29110
3. Módulo de resiliencia de la sub-base (psi)=	14780
4. Módulo de resiliencia de la sub-rasante (psi)=	12900

### B. DATOS DE TRÁFICO Y PROPIEDADES DE LA SUBRASANTE

1. Número de ejes equivalentes totales (W18) =	1,437,984.39
2. Confiabilidad (R) =	90%
3. Desviación estándar (So)=	0.45
4. Servicialidad inicial (Pi)=	4.2
5. Servicialidad final (Pf)=	2.5
6. Periodo de diseño (años)=	20
7. ΔPSI=	1.7
8. Estadístico Z (Zr) =	-1.282

### C. DATOS PARA ESTRUCTURACION DEL REFUERZO

1. Coeficiente estructural (a1)=	0.442
2. Coeficiente estructural (a2)=	0.132
3. Coeficiente estructural (a3)=	0.108
4. Coeficiente de drenaje base granular (m2)=	1
5. Coeficiente de drenaje sub-base granular (m3)=	1

### D. NÚMEROS ESTRUCTURALES

1. Número estructural carpeta asfáltica (SN 1)=	2.188
2. Número estructural base granular (SN 2)=	2.844
3. Número estructural sub-base (SN 3)=	2.997

### E. Espesores

	E. Espesores			SN req	SN total
	Teórico (in/cm)	Propuesto (in/cm)			
1. Espesor de carpeta asfáltica =	4.95	12.58	5.12	2.19	2.26
2. Espesor de base granular =	4.41	11.20	5.91	0.58	0.78
3. Espesor de sub-base =	-0.41	-1.05	5.91	-0.04	0.63
4. Espesor total =			16.93	2.73	3.68
					Sí cumple

Figura AP-1. Diseño de pavimentos flexible por metodología AASHTO 93 utilizando hoja de cálculo elaborada

Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecánica empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de mantenimiento.

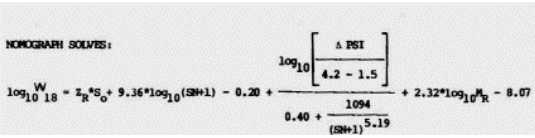
CÁLCULO DE NÚMEROS ESTRUCTURALES (SN)														
SN 1	Parámetros iniciales		SN 1 2.188											
	R	90%												
	So	0.45												
	ΔPSI	1.7												
	Mr-E (psi)	29110												
	W18 ESAL	1.44E+06												
	Zstat	-1.28155157												
													Compute Residual	
	LogW18	A term	SNlow (bajo)	SNAvg (promedio)	SNmax (máximo)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	LogW18*	LogW18*-LogW18	
	6.1578	-0.5767	0.0000	7.5000	15.0000	8.6994	-0.2000	-0.2009	0.4164	10.3566	-8.0700	9.7268	3.5690	
	6.1578	-0.5767	0.0000	3.7500	7.5000	6.3339	-0.2000	-0.2009	0.7365	10.3566	-8.0700	7.5709	1.4132	
	6.1578	-0.5767	0.0000	1.8750	3.7500	4.2929	-0.2000	-0.2009	4.9571	10.3566	-8.0700	5.7622	-0.3956	
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.8125	3.7500	5.4401	-0.2000	-0.2009	1.4533	10.3566	-8.0700	6.8118	0.6540	
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.3438	2.8125	4.9068	-0.2000	-0.2009	2.4809	10.3566	-8.0700	6.3357	0.1780	
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.1094	2.3438	4.6114	-0.2000	-0.2009	3.4342	10.3566	-8.0700	6.0628	-0.0950	
6.1578	-0.5767	2.1094	2.2266	2.3438	4.7618	-0.2000	-0.2009	2.9041	10.3566	-8.0700	6.2025	0.0448		
6.1578	-0.5767	2.1094	2.1680	2.2266	4.6873	-0.2000	-0.2009	3.1540	10.3566	-8.0700	6.1335	-0.0243		
6.1578	-0.5767	2.1680	2.1973	2.2266	4.7247	-0.2000	-0.2009	3.0255	10.3566	-8.0700	6.1682	0.0104		
6.1578	-0.5767	2.1680	2.1826	2.1973	4.7061	-0.2000	-0.2009	3.0888	10.3566	-8.0700	6.1509	-0.0069		
6.1578	-0.5767	2.1826	2.1899	2.1973	4.7154	-0.2000	-0.2009	3.0570	10.3566	-8.0700	6.1596	0.0018		
6.1578	-0.5767	2.1826	2.1863	2.1899	4.7107	-0.2000	-0.2009	3.0728	10.3566	-8.0700	6.1552	-0.0025		
6.1578	-0.5767	2.1863	2.1881	2.1899	4.7131	-0.2000	-0.2009	3.0649	10.3566	-8.0700	6.1574	-0.0004		
6.1578	-0.5767	2.1881	2.1890	2.1899	4.7142	-0.2000	-0.2009	3.0609	10.3566	-8.0700	6.1585	0.0007		
6.1578	-0.5767	2.1881	2.1886	2.1890	4.7137	-0.2000	-0.2009	3.0629	10.3566	-8.0700	6.1579	0.0002		
6.1578	-0.5767	2.1881	2.1883	2.1886	4.7134	-0.2000	-0.2009	3.0639	10.3566	-8.0700	6.1577	-0.0001		
SN 2	Parámetros iniciales		SN 2 2.84											
	R	90%												
	So	0.45												
	ΔPSI	1.7												
	Mr-E (psi)	14780												
	W18 ESAL	1.44E+06												
	Zstat	-1.28155157												
													Compute Residual	
	LogW18	A term	SNlow (bajo)	SNAvg (promedio)	SNmax (máximo)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	LogW18*	LogW18*-LogW18	
	6.1578	-0.5767	0.0000	7.5000	15.0000	8.6994	-0.2000	-0.2009	0.4164	9.6736	-8.0700	9.0438	2.8861	
	6.1578	-0.5767	0.0000	3.7500	7.5000	6.3339	-0.2000	-0.2009	0.7365	9.6736	-8.0700	6.8880	0.7302	
	6.1578	-0.5767	0.0000	1.8750	3.7500	4.2929	-0.2000	-0.2009	4.9571	9.6736	-8.0700	5.0793	-1.0785	
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.8125	3.7500	5.4401	-0.2000	-0.2009	1.4533	9.6736	-8.0700	6.1288	-0.0289	
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.2813	3.7500	5.9115	-0.2000	-0.2009	0.9770	9.6736	-8.0700	6.5328	0.3750	
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.0469	3.2813	5.6826	-0.2000	-0.2009	1.1728	9.6736	-8.0700	6.3383	0.1805	
6.1578	-0.5767	2.8125	2.9297	3.0469	5.5632	-0.2000	-0.2009	1.3001	9.6736	-8.0700	6.2356	0.0778		
6.1578	-0.5767	2.8125	2.8711	2.9297	5.5021	-0.2000	-0.2009	1.3731	9.6736	-8.0700	6.1827	0.0250		
6.1578	-0.5767	2.8125	2.8418	2.8711	5.4712	-0.2000	-0.2009	1.4122	9.6736	-8.0700	6.1559	-0.0018		
6.1578	-0.5767	2.8418	2.8564	2.8711	5.4867	-0.2000	-0.2009	1.3924	9.6736	-8.0700	6.1694	0.0116		
6.1578	-0.5767	2.8418	2.8491	2.8564	5.4790	-0.2000	-0.2009	1.4023	9.6736	-8.0700	6.1627	0.0049		
6.1578	-0.5767	2.8418	2.8455	2.8491	5.4751	-0.2000	-0.2009	1.4072	9.6736	-8.0700	6.1593	0.0015		
6.1578	-0.5767	2.8418	2.8436	2.8455	5.4732	-0.2000	-0.2009	1.4097	9.6736	-8.0700	6.1576	-0.0001		
6.1578	-0.5767	2.8436	2.8445	2.8455	5.4741	-0.2000	-0.2009	1.4085	9.6736	-8.0700	6.1584	0.0007		
6.1578	-0.5767	2.8436	2.8441	2.8445	5.4737	-0.2000	-0.2009	1.4091	9.6736	-8.0700	6.1580	0.0003		
6.1578	-0.5767	2.8436	2.8439	2.8441	5.4734	-0.2000	-0.2009	1.4094	9.6736	-8.0700	6.1578	0.0001		
SN 3	Parámetros iniciales		SN 3 3.00											
	R	90%												
	So	0.45												
	ΔPSI	1.7												
	Mr-E (psi)	12900												
	W18 ESAL	1.44E+06												
	Zstat	-1.28155157												
													Compute Residual	
	LogW18	A term	SNlow (bajo)	SNAvg (promedio)	SNmax (máximo)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	LogW18*	LogW18*-LogW18	
	6.1578	-0.5767	0.0000	7.5000	15.0000	8.6994	-0.2000	-0.2009	0.4164	9.5366	-8.0700	8.9067	2.7490	
	6.1578	-0.5767	0.0000	3.7500	7.5000	6.3339	-0.2000	-0.2009	0.7365	9.5366	-8.0700	6.7509	0.5932	
	6.1578	-0.5767	0.0000	1.8750	3.7500	4.2929	-0.2000	-0.2009	4.9571	9.5366	-8.0700	4.9422	-1.2156	
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.8125	3.7500	5.4401	-0.2000	-0.2009	1.4533	9.5366	-8.0700	5.9917	-0.1660	
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.2813	3.7500	5.9115	-0.2000	-0.2009	0.9770	9.5366	-8.0700	6.3957	0.2380	
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.0469	3.2813	5.6826	-0.2000	-0.2009	1.1728	9.5366	-8.0700	6.2012	0.0434	
6.1578	-0.5767	2.8125	2.9297	3.0469	5.5632	-0.2000	-0.2009	1.3001	9.5366	-8.0700	6.0985	-0.0592		
6.1578	-0.5767	2.8125	2.9883	3.0469	5.6234	-0.2000	-0.2009	1.2336	9.5366	-8.0700	6.1504	-0.0074		
6.1578	-0.5767	2.9883	3.0176	3.0469	5.6531	-0.2000	-0.2009	1.2025	9.5366	-8.0700	6.1759	0.0181		
6.1578	-0.5767	2.9883	3.0029	3.0176	5.6383	-0.2000	-0.2009	1.2179	9.5366	-8.0700	6.1632	0.0054		
6.1578	-0.5767	2.9883	2.9956	3.0029	5.6308	-0.2000	-0.2009	1.2257	9.5366	-8.0700	6.1568	-0.0010		
6.1578	-0.5767	2.9956	2.9993	3.0029	5.6345	-0.2000	-0.2009	1.2217	9.5366	-8.0700	6.1600	0.0022		
6.1578	-0.5767	2.9956	2.9974	2.9993	5.6327	-0.2000	-0.2009	1.2237	9.5366	-8.0700	6.1584	0.0006		
6.1578	-0.5767	2.9956	2.9965	2.9974	5.6317	-0.2000	-0.2009	1.2247	9.5366	-8.0700	6.1576	-0.0002		
6.1578	-0.5767	2.9965	2.9970	2.9974	5.6322	-0.2000	-0.2009	1.2242	9.5366	-8.0700	6.1580	0.0002		
6.1578	-0.5767	2.9965	2.9967	2.9970	5.6320	-0.2000	-0.2009	1.2244	9.5366	-8.0700	6.1578	0.0000		

Figura AP-2. Iteraciones realizadas por la hoja de cálculo para determinar los números estructurales de las capas en el pavimento flexible, según la ecuación de AASHTO 93

Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecanística empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de mantenimiento.

Proyecto: Calle 1, Ciudad de San Isidro, Pérez Zeledón.

Tipo de Pavimento: Semi-Rígido

Fecha: 17/07/2017

Elaborado por: José R. Murillo Barboza

### DISEÑO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDO EN AASHTO 93

#### A. CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES

1. Módulo de resiliencia de la carpeta asfáltica (psi)=	450000
2. Módulo de resiliencia de la base estabilizada con cemento (psi)=	610000
3. Módulo de resiliencia de la sub-base (psi)=	14780
4. Módulo de resiliencia de la sub-rasante(psi)=	12900

#### B. DATOS DE TRÁFICO Y PROPIEDADES DE LA SUBRASANTE

1. Número de ejes equivalentes totales (W18) =	1,437,984.39
2. Confiabilidad (R) =	90%
3. Desviación estándar (So)=	0.45
4. Servicialidad inicial (Pi)=	4.3
5. Servicialidad final (Pf)=	2.5
6. Periodo de diseño (años)=	20
7. ΔPSI=	1.8
8. Estadístico Z (Zr) =	-1.282

#### C. DATOS PARA ESTRUCTURACION DEL REFUERZO

1. Coeficiente estructural (a1)=	0.442
2. Coeficiente estructural (a2)=	0.158
3. Coeficiente estructural (a3)=	0.108
4. Coeficiente de drenaje base estabilizada con cemento(m2)=	1
5. Coeficiente de drenaje sub-base granular (m3)=	1

#### D. NÚMEROS ESTRUCTURALES

1. Número estructural carpeta asfáltica (SN 1)=	0.476
2. Número estructural base estabilizada con cemento (SN 2)=	2.825
3. Número estructural sub-base (SN 3)=	2.974

#### E. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO PROPUESTA

	E. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO PROPUESTA		SN req	SN total
	Teórico (in/cm)	Propuesto (in/cm)		
1. Espesor de carpeta asfáltica =	1.08	2.74	0.48	1.39
2. Espesor de base estabilizada con cemento =	9.07	23.04	1.43	1.56
3. Espesor de sub-base =	0.25	0.64	0.03	0.63
4. Espesor total =		18.90	1.94	3.58

Sí cumple

Figura AP-3. Diseño de pavimentos semi-rígido por metodología AASHTO 93 utilizando hoja de cálculo elaborada.



CÁLCULO DE NÚMEROS ESTRUCTURALES (SN)															
SN 1	Parámetros iniciales		SN 1		$\log_{10} \frac{W_{18}}{18} = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07$										
	R	90%	0.476											Compute Residual	
	So	0.45												Log W18*	Log W18*-Log W18
	ΔPSI	1.8													
	Mr-E (psi)	610000													
	W18 ESAL	1.44E+06													
	Zstat	-1.28155157													
	LogW18	A term	SNlow (bajo)	SNavg (promedio)	SNmax (máximo)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	Log W18*	Log W18*-Log W18		
	6.1578	-0.5767	0.0000	7.5000	15.0000	8.6994	-0.2000	-0.1761	0.4164	13.4220	-8.0700	12.8518	6.6940		
	6.1578	-0.5767	0.0000	3.7500	7.5000	6.3339	-0.2000	-0.1761	0.7365	13.4220	-8.0700	10.6700	4.5123		
	6.1578	-0.5767	0.0000	1.8750	3.7500	4.2929	-0.2000	-0.1761	4.9571	13.4220	-8.0700	8.8326	2.6748		
	6.1578	-0.5767	0.0000	0.9375	1.8750	2.6886	-0.2000	-0.1761	35.7373	13.4220	-8.0700	7.2589	1.1012		
	6.1578	-0.5767	0.0000	0.4688	0.9375	1.5626	-0.2000	-0.1761	149.1845	13.4220	-8.0700	6.1367	-0.0210		
	6.1578	-0.5767	0.4688	0.7031	0.9375	2.1645	-0.2000	-0.1761	69.3998	13.4220	-8.0700	6.7372	0.5794		
	6.1578	-0.5767	0.4688	0.5859	0.7031	1.8747	-0.2000	-0.1761	100.2924	13.4220	-8.0700	6.4482	0.2904		
6.1578	-0.5767	0.4688	0.5273	0.5859	1.7216	-0.2000	-0.1761	121.8466	13.4220	-8.0700	6.2955	0.1377			
6.1578	-0.5767	0.4688	0.4980	0.5273	1.6429	-0.2000	-0.1761	134.6890	13.4220	-8.0700	6.2169	0.0591			
6.1578	-0.5767	0.4688	0.4834	0.4980	1.6030	-0.2000	-0.1761	141.7153	13.4220	-8.0700	6.1770	0.0192			
6.1578	-0.5767	0.4688	0.4761	0.4834	1.5829	-0.2000	-0.1761	145.3926	13.4220	-8.0700	6.1569	-0.0008			
6.1578	-0.5767	0.4761	0.4797	0.4834	1.5929	-0.2000	-0.1761	143.5399	13.4220	-8.0700	6.1670	0.0092			
6.1578	-0.5767	0.4761	0.4779	0.4797	1.5879	-0.2000	-0.1761	144.4627	13.4220	-8.0700	6.1619	0.0042			
6.1578	-0.5767	0.4761	0.4770	0.4779	1.5854	-0.2000	-0.1761	144.9267	13.4220	-8.0700	6.1594	0.0017			
6.1578	-0.5767	0.4761	0.4765	0.4770	1.5841	-0.2000	-0.1761	145.1594	13.4220	-8.0700	6.1582	0.0004			
6.1578	-0.5767	0.4761	0.4763	0.4765	1.5835	-0.2000	-0.1761	145.2760	13.4220	-8.0700	6.1575	-0.0002			
SN 2	Parámetros iniciales		SN 2												
	R	90%	2.83											Compute Residual	
	So	0.45												Log W18*	Log W18*-Log W18
	ΔPSI	1.8													
	Mr-E (psi)	14780													
	W18 ESAL	1.44E+06													
	Zstat	-1.28155157													
	LogW18	A term	SNlow (bajo)	SNavg (promedio)	SNmax (máximo)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	Log W18*	Log W18*-Log W18		
	6.1578	-0.5767	0.0000	7.5000	15.0000	8.6994	-0.2000	-0.1761	0.4164	9.6736	-8.0700	9.1034	2.9457		
	6.1578	-0.5767	0.0000	3.7500	7.5000	6.3339	-0.2000	-0.1761	0.7365	9.6736	-8.0700	6.9217	0.7640		
	6.1578	-0.5767	0.0000	1.8750	3.7500	4.2929	-0.2000	-0.1761	4.9571	9.6736	-8.0700	5.0843	-1.0735		
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.8125	3.7500	5.4401	-0.2000	-0.1761	1.4533	9.6736	-8.0700	6.1459	-0.0119		
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.2813	3.7500	5.9115	-0.2000	-0.1761	0.9770	9.6736	-8.0700	6.5582	0.4005		
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.0469	3.2813	5.6826	-0.2000	-0.1761	1.1728	9.6736	-8.0700	6.3594	0.2017		
	6.1578	-0.5767	2.8125	2.9297	3.0469	5.5632	-0.2000	-0.1761	1.3001	9.6736	-8.0700	6.2547	0.0969		
6.1578	-0.5767	2.8125	2.8711	2.9297	5.5021	-0.2000	-0.1761	1.3731	9.6736	-8.0700	6.2008	0.0431			
6.1578	-0.5767	2.8125	2.8418	2.8711	5.4712	-0.2000	-0.1761	1.4122	9.6736	-8.0700	6.1735	0.0157			
6.1578	-0.5767	2.8125	2.8271	2.8418	5.4557	-0.2000	-0.1761	1.4325	9.6736	-8.0700	6.1597	0.0020			
6.1578	-0.5767	2.8125	2.8198	2.8271	5.4479	-0.2000	-0.1761	1.4428	9.6736	-8.0700	6.1528	-0.0049			
6.1578	-0.5767	2.8198	2.8235	2.8271	5.4518	-0.2000	-0.1761	1.4377	9.6736	-8.0700	6.1563	-0.0015			
6.1578	-0.5767	2.8235	2.8253	2.8271	5.4538	-0.2000	-0.1761	1.4351	9.6736	-8.0700	6.1580	0.0003			
6.1578	-0.5767	2.8235	2.8244	2.8253	5.4528	-0.2000	-0.1761	1.4364	9.6736	-8.0700	6.1571	-0.0006			
6.1578	-0.5767	2.8244	2.8249	2.8253	5.4533	-0.2000	-0.1761	1.4357	9.6736	-8.0700	6.1576	-0.0002			
6.1578	-0.5767	2.8249	2.8251	2.8253	5.4535	-0.2000	-0.1761	1.4354	9.6736	-8.0700	6.1578	0.0000			
SN 3	Parámetros iniciales		SN 3												
	R	90%	2.97											Compute Residual	
	So	0.45												Log W18*	Log W18*-Log W18
	ΔPSI	1.8													
	Mr-E (psi)	12900													
	W18 ESAL	1.44E+06													
	Zstat	-1.28155157													
	LogW18	A term	SNlow (bajo)	SNavg (promedio)	SNmax (máximo)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	Log W18*	Log W18*-Log W18		
	6.1578	-0.5767	0.0000	7.5000	15.0000	8.6994	-0.2000	-0.1761	0.4164	9.5366	-8.0700	8.9664	2.8086		
	6.1578	-0.5767	0.0000	3.7500	7.5000	6.3339	-0.2000	-0.1761	0.7365	9.5366	-8.0700	6.7846	0.6269		
	6.1578	-0.5767	0.0000	1.8750	3.7500	4.2929	-0.2000	-0.1761	4.9571	9.5366	-8.0700	4.9472	-1.2106		
	6.1578	-0.5767	1.8750	2.8125	3.7500	5.4401	-0.2000	-0.1761	1.4533	9.5366	-8.0700	6.0088	-0.1489		
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.2813	3.7500	5.9115	-0.2000	-0.1761	0.9770	9.5366	-8.0700	6.4211	0.2634		
	6.1578	-0.5767	2.8125	3.0469	3.2813	5.6826	-0.2000	-0.1761	1.1728	9.5366	-8.0700	6.2224	0.0646		
	6.1578	-0.5767	2.8125	2.9297	3.0469	5.5632	-0.2000	-0.1761	1.3001	9.5366	-8.0700	6.1176	-0.0401		
6.1578	-0.5767	2.9297	2.9883	3.0469	5.6234	-0.2000	-0.1761	1.2336	9.5366	-8.0700	6.1705	0.0127			
6.1578	-0.5767	2.9297	2.9590	2.9883	5.5934	-0.2000	-0.1761	1.2661	9.5366	-8.0700	6.1442	-0.0136			
6.1578	-0.5767	2.9590	2.9736	2.9883	5.6084	-0.2000	-0.1761	1.2496	9.5366	-8.0700	6.1574	-0.0004			
6.1578	-0.5767	2.9736	2.9810	2.9883	5.6159	-0.2000	-0.1761	1.2416	9.5366	-8.0700	6.1639	0.0062			
6.1578	-0.5767	2.9736	2.9773	2.9810	5.6121	-0.2000	-0.1761	1.2456	9.5366	-8.0700	6.1606	0.0029			
6.1578	-0.5767	2.9736	2.9755	2.9773	5.6103	-0.2000	-0.1761	1.2476	9.5366	-8.0700	6.1590	0.0012			
6.1578	-0.5767	2.9736	2.9745	2.9755	5.6093	-0.2000	-0.1761	1.2486	9.5366	-8.0700	6.1582	0.0004			
6.1578	-0.5767	2.9736	2.9741	2.9745	5.6089	-0.2000	-0.1761	1.2491	9.5366	-8.0700	6.1578	0.0000			
6.1578	-0.5767	2.9736	2.9739	2.9741	5.6086	-0.2000	-0.1761	1.2494	9.5366	-8.0700	6.1576	-0.0002			

Figura AP-4. Iteraciones realizadas por la hoja de cálculo para determinar los números estructurales de las capas en el pavimento semi-rígido, según la ecuación de AASHTO 93

Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecánica empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de mantenimiento.

**DISEÑO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS RÍGIDO EN AASHTO 93**

<b>DATOS DE TRÁFICO Y PROPIEDADES DE LA SUBRASANTE</b>	
1. Número de ejes equivalentes totales (W18) =	1,898,400.85
2. Confiabilidad (R) =	90%
3. Desviación estándar (So)=	0.35
4. Servicialidad inicial (Pi)=	4.5
5. Servicialidad final (Pf)=	2.5
6. Periodo de diseño (años)=	20
7. ΔPSI=	2
8. Estadístico Z (Zr) =	-1.282

<b>COEFICIENTE DE DRENAJE</b>	
1. Calidad del Drenaje	Bueno
2. Porcentaje del tiempo de exposición a humedades cercanas a la saturación	Más de 25%
3. Coeficiente de drenaje (Cd)=	1

<b>COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CARGA</b>	
1. Tipo de Espaldón	Concreto Asfáltico u otro
2. Tipo de Pavimento Rígido	JPCP
3. Utiliza dovela de transmisión de carga.	SI
4. Coeficiente de transmisión de carga (J)	3.2

<b>DATOS DE CONCRETO</b>	
1. Resistencia del concreto a la compresión 28 días f'c (psi)	4,551
2. Módulo Resiliente del Concreto MRc (psi)	3,845,477
3. Módulo de ruptura S'c (psi)	492

<b>MÓDULO DE REACCION DE LA SUB-RASANTE</b>	
1. Espesor de Losa "Asumido" (plg)	8
2. Espesor de Base "Asumido" (plg)	8
3. Modulo resiliente Sub-Rasante (psi)	12,900
4. Modulo resiliente Base/Sub-Base (psi)	29,110
5. Modulo Compuesto Sub-Rasante (pci)	653
Necesita corregir por profundidad de estrato rígido	<input type="radio"/> SI <input checked="" type="radio"/> NO
6. Profundidad del estrato rígido (plg)	120
7. Módulo compuesto corregido por estrato rígido (pci)	653
8. Factor de Daño	28.163
9. Módulo Efectivo de reacción de la Sub-Rasante (pci)	653
10. Corrección por pérdida potencial de soporte de la subbase. LS	1.5
11. Módulo Efectivo Final de reacción de la Sub-Rasante (pci) K	94

<b>CÁLCULO DE ESPESOR DE LOSA</b>	
1. Espesor de Losa (plg)	<b>9.14</b>
2. Espesor Redondeado (cm)	<b>23.50</b>

Figura AP-5. Diseño de pavimentos semi-rígidos por metodología AASHTO 93 utilizando hoja de cálculo elaborada

Parámetros iniciales	
R	90%
So	0.35
ΔPSI	2
Mr-E (psi)	3845477
W18 ESAL	1898401

Zstat	-1.282
-------	--------

D losa final	9.15
pt	2.50
sc	492
cd	1
k	94
j	3.2

$$\log(W_{18}) = Zr \cdot S_o + 7.35 \cdot \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \cdot p_r) \cdot \log\left[\frac{S'_c \cdot C_d \cdot (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \cdot J \cdot \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

▪ Donde:

- $W_{18}$ : Número de repeticiones del eje sencillo estándar AASHTO de 18 kips, estimadas para el periodo de diseño estructural.
- $Zr$ : Desviación normal estándar correspondiente a la confiabilidad del diseño.
- $S_o$ : Desviación estándar total (overall) del proceso de diseño.
- $D$ : Espesor del pavimento de concreto hidráulico (plg.).
- $\Delta PSI$ : Degradación del PSI considerada para el diseño.
- $p_r$ : Serviciabilidad final del pavimento.
- $S'_c$ : Módulo de rotura del concreto (psi).
- $C_d$ : Coeficiente de drenaje.
- $J$ : Coeficiente de transferencia de carga.
- $E_c$ : Módulo de Young del concreto (psi).
- $k$ : Módulo de reacción de la subrasante (psi/plg.).

LogW18	A term	Dlow (bajo)	Davg (medio)	Dmax (alto)	B term	C term	D term	E term	F term	G term	H term	J term	K term	Compute Residual	
														Log W18*	LogW18*-LogW18
6.278	-0.449	5.90	12.95	20.00	8.41	-0.06	-0.1761	1.0034	3.42	2803.7	5.5	3816.7	-0.4581	7.27043	0.99204
6.278	-0.449	5.90	9.43	12.95	7.48	-0.06	-0.1761	1.0396	3.42	2091.0	4.1	2818.0	-0.4431	6.36179	0.08341
6.278	-0.449	5.90	7.66	9.425	6.89	-0.06	-0.1761	1.1897	3.42	1710.2	3.3	2284.2	-0.4299	5.80526	-0.47312
6.278	-0.449	7.66	8.54	9.425	7.20	-0.06	-0.1761	1.0836	3.42	1903.1	3.7	2554.5	-0.4373	6.09262	-0.18577
6.278	-0.449	8.54	8.98	9.43	7.35	-0.06	-0.1761	1.0571	3.42	1997.6	3.9	2687.1	-0.4404	6.22952	-0.04887
6.278	-0.449	8.98	9.20	9.43	7.41	-0.06	-0.1761	1.0474	3.42	2044.5	4.0	2752.7	-0.4418	6.29623	0.01784
6.278	-0.449	8.98	9.09	9.20	7.38	-0.06	-0.1761	1.0520	3.42	2021.1	3.9	2719.9	-0.4411	6.26302	-0.01537
6.278	-0.449	9.09	9.15	9.20	7.40	-0.06	-0.1761	1.0497	3.42	2032.8	4.0	2736.3	-0.4414	6.27966	0.00127
6.278	-0.449	9.09	9.12	9.15	7.39	-0.06	-0.1761	1.0508	3.42	2026.9	4.0	2728.1	-0.4413	6.27135	-0.00704
6.278	-0.449	9.12	9.14	9.15	7.39	-0.06	-0.1761	1.0502	3.42	2029.9	4.0	2732.2	-0.4413	6.27551	-0.00288
6.278	-0.449	9.14	9.14	9.15	7.40	-0.06	-0.1761	1.0499	3.42	2031.3	4.0	2734.3	-0.4414	6.27759	-0.00080
6.278	-0.449	9.14	9.15	9.15	7.40	-0.06	-0.1761	1.0498	3.42	2032.1	4.0	2735.3	-0.4414	6.27862	-0.00020

Figura AP-4. Iteraciones realizadas por la hoja de cálculo para determinar el espesor de la losa de concreto en pavimento rígido según la ecuación de AASHTO 93

## Revisión de Diseño por Criterios Mecánísticos-Empíricos en Pavimentos Rígidos

<b>Agrietamiento Transversal</b>	
Aplicaciones estimadas	1,898,400.80
Periodo de diseño (años)=	20
Esfuerzo en la losa (psi)	124
Modulo de Ruptura (psi)	492
Confiabilidad (%)	90%
Desviacion Estandar Z	1.282
Aplicaciones admisibles	5,181,703
FD	0.366
CRK al 50% de Confiabilidad	16%
STDp	0.029
CRKp	<b>19%</b>
<b>Modelo de Bombeo y Erosion del Pavimento Indice de Bombeo</b>	
Ejes equivalentes en millones "N18"	1.90
Tipo de Suelo Sub-Rasante según AASHTO	A-7
Constante otorgada	1
Precipitacion anual "P" (cm)	254
Espesor de Losa "H" (in)	9.84
Indice de congelamiento "FI", en días debajo de cero grados	0
Indice de bombeo "PI"	0.60
<b>Modelo de Escalonamiento</b>	
Ejes equivalentes en millones "N18"	1.90
Esfuerzo Maximo "S" (psi)	124
Espaciamiento entre Juntas (ft)	9.84
Módulo Efectivo de Reacción de la Sub-Rasante (pci)	94
Escalonamiento del Pavimento (in)	0.0508
Escalonamiento del Pavimento (cm)	0.129

Figura AP-5. Revisión de criterios mecánísticos-empíricos en pavimentos rígidos

PAVIMENTO FLEXIBLE			
ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Excavacion de la vía	CR 204.03	m3	3078
MAQUINARIA			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Motoniveladora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
Excavadora	188.00	¢35,000.00	¢6,580,000.00
Vagoneta	381.00	¢25,000.00	¢9,525,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢19,535,000.00</b>
MANO DE OBRA			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	49.00	¢1,282.96	¢62,865.19
Ingeniero	18.00	¢2,266.70	¢40,800.60
Inspector	49.00	¢1,433.30	¢70,231.70
Cargas Sociales		9%	¢37,685.44
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢456,412.61</b>
MATERIALES			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
-			¢0.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢0.00</b>
TOTALES			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢19,991,412.61	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢6,494.94	
IMPREVISTOS	5%	¢324.75	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢324.75	
UTILIDAD	10%	¢649.49	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢7,793.92</b>	

Figura AP-6. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento flexible. Parte 1

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular	CR 301.06	m3	1508
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Vagoneta	49.00	¢25,000.00	¢1,225,000.00
Motoniveladora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Tanque de agua	49.00	¢20,000.00	¢980,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢4,795,000.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	49.00	¢1,282.96	¢62,865.19
Ingeniero	18.00	¢2,266.70	¢40,800.60
Inspector	49.00	¢1,433.30	¢70,231.70
Cargas Sociales		9%	¢37,685.44
<b>SUBTOTAL</b>			¢456,412.61
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Material de sub-base granular (m3)	1508	¢10,080.00	¢15,200,640.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢15,200,640.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢20,452,052.61	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢13,562.37	
IMPREVISTOS	5%	¢678.12	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢678.12	
UTILIDAD	10%	¢1,356.24	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		¢16,274.84	

Figura AP-7. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento flexible. Parte 2

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de base granular	CR 301.03	m3	1508
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Vagoneta	49.00	¢25,000.00	¢1,225,000.00
Motoniveladora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Tanque de agua	49.00	¢20,000.00	¢980,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢4,795,000.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	49.00	¢1,282.96	¢62,865.19
Ingeniero	18.00	¢2,266.70	¢40,800.60
Inspector	49.00	¢1,433.30	¢70,231.70
Cargas Sociales		9%	¢37,685.44
<b>SUBTOTAL</b>			¢456,412.61
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Material de base granular (m3)	1508	¢10,080.00	¢15,200,640.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢15,200,640.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢20,452,052.61	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢13,562.37	
IMPREVISTOS	5%	¢678.12	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢678.12	
UTILIDAD	10%	¢1,356.24	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢16,274.84</b>	

Figura AP-8. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento flexible. Parte 3

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Riego de imprimación	CR 413.01	lt	10680
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Barredora	25.00	¢19,110.00	¢477,750.00
Distribuidor de asfalto	25.00	¢15,000.00	¢375,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢852,750.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Peón	78.00	¢982.21	¢76,612.15
Capataz	25.00	¢1,282.96	¢32,074.08
Ingeniero	6.00	¢2,266.70	¢13,600.20
Inspector	25.00	¢1,433.30	¢35,832.50
Cargas Sociales		9%	¢14,230.70
<b>SUBTOTAL</b>			¢172,349.62
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Emulsión asfáltica (lt)	10680	¢510.00	¢5,446,902.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢5,446,902.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢6,472,001.62	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢605.98	
IMPREVISTOS	5%	¢30.30	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢30.30	
UTILIDAD	10%	¢60.60	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		¢727.18	

Figura AP-9. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento flexible. Parte 4



ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente	CR 401.01	m2	6280
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Vagoneta covencional	25.00	¢25,000.00	¢625,000.00
Pavimentadora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Compactadora Vibratoria	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Compactador Neumatica	15.00	¢35,490.00	¢532,350.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢2,907,350.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	60.00	¢1,087.74	¢65,264.46
Ayudante	164.00	¢1,068.08	¢175,165.12
Peón	60.00	¢982.21	¢58,932.42
Capataz	30.00	¢1,282.96	¢38,488.89
Ingeniero	22.00	¢2,266.70	¢49,867.40
Inspector	30.00	¢1,433.30	¢42,999.00
Cargas Sociales		9%	¢38,764.56
<b>SUBTOTAL</b>			¢469,481.85
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	1668	¢55,000.00	¢91,712,500.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢91,712,500.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢95,089,331.85	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢15,141.61	
IMPREVISTOS	5%	¢757.08	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢757.08	
UTILIDAD	10%	¢1,514.16	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢18,169.94</b>	

Figura AP-10. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento flexible. Parte 5

PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO			
ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Excavacion de la vía	CR 204.03	m3	3016
MAQUINARIA			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Motoniveladora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
Excavadora	188.00	¢35,000.00	¢6,580,000.00
Vagoneta	381.00	¢25,000.00	¢9,525,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢19,535,000.00</b>
MANO DE OBRA			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	49.00	¢1,282.96	¢62,865.19
Ingeniero	17.00	¢2,266.70	¢38,533.90
Inspector	49.00	¢1,433.30	¢70,231.70
Cargas Sociales		9%	¢37,481.44
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢453,941.90</b>
MATERIALES			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
-			¢0.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢0.00</b>
TOTALES			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢19,988,941.90	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢6,627.63	
IMPREVISTOS	5%	¢331.38	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢331.38	
UTILIDAD	10%	¢662.76	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢7,953.16</b>	

Figura AP-11. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento semi-rígido. Parte 1

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de sub-base granular	CR 301.06	m3	1178
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Vagoneta	49.00	¢25,000.00	¢1,225,000.00
Motoniveladora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Tanque de agua	49.00	¢20,000.00	¢980,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢4,795,000.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	49.00	¢1,282.96	¢62,865.19
Ingeniero	18.00	¢2,266.70	¢40,800.60
Inspector	49.00	¢1,433.30	¢70,231.70
Cargas Sociales		9%	¢37,685.44
<b>SUBTOTAL</b>			¢456,412.61
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Material de sub-base granular (m3)	1178	¢10,080.00	¢11,874,240.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢11,874,240.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢17,125,652.61	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢14,537.91	
IMPREVISTOS	5%	¢726.90	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢726.90	
UTILIDAD	10%	¢1,453.79	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		¢17,445.49	

Figura AP-12. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento semi-rígido. Parte 2

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de base estabilizada BE-25	CR 302.01	m3	1963
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Recuperadora	62.00	¢60,000.00	¢3,720,000.00
Vagoneta	62.00	¢25,000.00	¢1,550,000.00
Motoniveladora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Tanque de agua	62.00	¢20,000.00	¢1,240,000.00
Compactadora	62.00	¢35,000.00	¢2,170,000.00
Back-Hoe	62.00	¢17,472.00	¢1,083,264.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢10,638,264.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	59.00	¢1,087.74	¢64,176.72
Peón	99.00	¢982.21	¢97,238.49
Capataz	30.00	¢1,282.96	¢38,488.89
Ingeniero	55.00	¢2,266.70	¢124,668.50
Inspector	59.00	¢1,433.30	¢84,564.70
Cargas Sociales		9%	¢36,822.36
<b>SUBTOTAL</b>			¢445,959.66
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Material de base granular (m3)	1848	¢10,080.00	¢18,627,840.00
Sacos de cemento 50 kg (ud)	5480	¢6,115.00	¢33,510,200.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢52,138,040.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢63,222,263.66	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢32,206.96	
IMPREVISTOS	5%	¢1,610.35	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢1,610.35	
UTILIDAD	10%	¢3,220.70	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢38,648.35</b>	

Figura AP-13. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento semi-rígido. Parte 3

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Riego de imprimación	CR 413.01	lt	10680
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Barredora	25.00	¢19,110.00	¢477,750.00
Distribuidor de asfalto	25.00	¢15,000.00	¢375,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢852,750.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Peón	96.00	¢982.21	¢94,291.87
Capataz	25.00	¢1,282.96	¢32,074.08
Ingeniero	6.00	¢2,266.70	¢13,600.20
Inspector	25.00	¢1,433.30	¢35,832.50
Cargas Sociales		9%	¢15,821.88
<b>SUBTOTAL</b>			¢191,620.53
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Emulsión asfáltica (lt)	10680	¢510.00	¢5,446,902.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢5,446,902.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢6,491,272.53	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢607.79	
IMPREVISTOS	5%	¢30.39	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢30.39	
UTILIDAD	10%	¢60.78	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢729.34</b>	

Figura AP-14. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento semi-rígido. Parte 4

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de mezcla asfáltica en caliente	CR 401.01	m2	6280
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Vagoneta convencional	25.00	¢25,000.00	¢625,000.00
Pavimentadora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Compactadora Vibratoria	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Compactador Neumatica	15.00	¢35,490.00	¢532,350.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢2,907,350.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	43.00	¢1,087.74	¢46,772.86
Ayudante	116.00	¢1,068.08	¢123,897.28
Peón	43.00	¢982.21	¢42,234.90
Capataz	30.00	¢1,282.96	¢38,488.89
Ingeniero	20.00	¢2,266.70	¢45,334.00
Inspector	25.00	¢1,433.30	¢35,832.50
Cargas Sociales		9%	¢29,930.44
<b>SUBTOTAL</b>			¢362,490.87
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Mezcla asfáltica en caliente (ton)	1484	¢55,000.00	¢81,592,500.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢81,592,500.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢84,862,340.87	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢13,513.11	
IMPREVISTOS	5%	¢675.66	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢675.66	
UTILIDAD	10%	¢1,351.31	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢16,215.73</b>	

Figura AP-15. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento semi-rígido. Parte 5

PAVIMENTO RÍGIDO			
ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Excavacion de la vía	CR 204.03	m3	2671
MAQUINARIA			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Motoniveladora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
Excavadora	191.00	¢35,000.00	¢6,685,000.00
Vagoneta	381.00	¢25,000.00	¢9,525,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢19,640,000.00</b>
MANO DE OBRA			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	166.00	¢1,282.96	¢212,971.86
Ingeniero	29.00	¢2,266.70	¢65,734.30
Inspector	32.00	¢1,433.30	¢45,865.60
Cargas Sociales		9%	¢51,246.13
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢620,647.56</b>
MATERIALES			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
-			¢0.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>¢0.00</b>
TOTALES			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢20,260,647.56	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢7,585.42	
IMPREVISTOS	5%	¢379.27	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢379.27	
UTILIDAD	10%	¢758.54	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢9,102.50</b>	

Figura AP-16. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento rígido. Parte 1

ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Suministro, colocación y compactación de base granular	CR 301.03	m3	1508
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Vagoneta	49.00	¢25,000.00	¢1,225,000.00
Motoniveladora	25.00	¢35,000.00	¢875,000.00
Tanque de agua	49.00	¢20,000.00	¢980,000.00
Compactadora	49.00	¢35,000.00	¢1,715,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢4,795,000.00
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	49.00	¢1,087.74	¢53,299.31
Peón	195.00	¢982.21	¢191,530.37
Capataz	49.00	¢1,282.96	¢62,865.19
Ingeniero	17.00	¢2,266.70	¢38,533.90
Inspector	49.00	¢1,433.30	¢70,231.70
Cargas Sociales		9%	¢37,481.44
<b>SUBTOTAL</b>			¢453,941.90
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Material de base granular (m3)	1508	¢10,080.00	¢15,200,640.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢15,200,640.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢20,449,581.90	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢13,560.73	
IMPREVISTOS	5%	¢678.04	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢678.04	
UTILIDAD	10%	¢1,356.07	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		¢16,272.88	

Figura AP-17. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento rígido. Parte 2



ACTIVIDAD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD
Losa de concreto hidráulico f'c = 320 kg/cm2	CR 501.01	m2	6280
<b>MAQUINARIA</b>			
EQUIPO	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Bomba Estacionaria	59.00	¢16,000.00	¢944,000.00
Máquina para texturizado (Gomaco TC-400)	15.00	¢5,454.90	¢81,823.50
<b>SUBTOTAL</b>			¢1,025,823.50
<b>MANO DE OBRA</b>			
PERSONAL	HORAS	COSTO/HR	MONTO
Operario	118.00	¢1,087.74	¢128,353.44
Ayudante	236.00	¢1,068.08	¢252,066.88
Peón	196.00	¢982.21	¢192,512.57
Capataz	59.00	¢1,282.96	¢75,694.82
Ingeniero	39.00	¢2,266.70	¢88,401.30
Inspector	59.00	¢1,433.30	¢84,564.70
Cargas Sociales		9%	¢73,943.43
<b>SUBTOTAL</b>			¢895,537.14
<b>MATERIALES</b>			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO/UD	MONTO
Suministro de concreto hidráulico (m3)	1650	¢119,000.00	¢196,350,000.00
Acero Varilla lisa No. 6 de 6 m (ud)	515	¢8,883.00	¢4,574,745.00
Acero Varilla corrugada No. 4 de 9 m (ud)	48	¢4,092.00	¢196,416.00
Bad-road para juntas (m)	3025	¢51.44	¢155,606.00
Elastomérico Isoflex 880 (lt)	3103	¢6,650.00	¢20,634,950.00
Malla Electrosoldada	898	¢19,500.00	¢17,511,000.00
<b>SUBTOTAL</b>			¢221,911,717.00
<b>TOTALES</b>			
RUBRO	PORCENTAJE	MONTO	
TOTAL		¢223,833,077.64	
TOTAL PRECIO UNITARIO		¢35,642.21	
IMPREVISTOS	5%	¢1,782.11	
ADMINISTRACIÓN	5%	¢1,782.11	
UTILIDAD	10%	¢3,564.22	
<b>PRECIO UNITARIO</b>		<b>¢42,770.65</b>	

Figura AP-18. Presupuesto de inversión inicial en el pavimento rígido. Parte 3

**Tabla AP-1.** Tipos de deterioros presentes en pavimentos flexibles y semi-rígidos.

<b>Tipo de deterioro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Causa</b>	<b>Solución</b>
Piel de cocodrilo (Fatiga)	Son una serie de fisuras interconectadas cuyo origen es la falla por fatiga de la capa de rodamiento asfáltica bajo la acción repetida de las cargas de tránsito.	Fatiga de la carpeta asfáltica, se considera falla estructural.	<b>Bajo:</b> Sello superficial/ Sobrecapa. <b>Medio y Alto:</b> Bacheo parcial o profundo/ Sobrecapa/ Reconstrucción.
Exudación	Película de material bituminoso sobre la superficie del pavimento, la cual forma una capa brillante, cristalina y reflectora de luz que puede llegar a ser pegajosa.	Exceso de asfalto en la mezcla, exceso de ligante, bajo contenido de vacíos.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Aplicar arena y compactar con cilindro. Precalentar si fuera necesario.
Agrietamiento en bloque	Fisuras interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares. Los bloques pueden variar en tamaño 30 cm x 30 cm hasta 3 m x 3 m.	Contracción de la mezcla asfáltica por los ciclos diarios de temperatura.	<b>Bajo:</b> Sello de grietas con ancho mayor de 3 mm/ Riego de sello. <b>Medio y Alto:</b> Sello de grietas/ Perfilado superficial/ Escarificado en caliente y sobrecapa.
Abultamientos y hundimientos	Son desplazamientos hacia arriba, pequeños y puntales de la superficie del pavimento.	Expansión por congelamiento, infiltración y elevación de material en combinación con las cargas de tránsito.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Perfilado/ Bacheo profundo o parcial.
Corrugación	Es una serie de crestas y valles muy próximos que ocurren en intervalos bastante regulares, usualmente de menos de 3 m, a lo largo del pavimento.	Por la acción del tránsito combinado una capa asfáltica inestable.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Reconstrucción.
Depresión	Áreas puntuales de la superficie del pavimento con niveles más bajos que los del pavimento a su alrededor.	Asentamientos de la subrasante o por construcción incorrecta.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Bacheo superficial, parcial o profundo.
Grieta de borde	Son fisuras paralelas al borde exterior del pavimento.	Debilitamiento de la base o de la subrasante en los bordes y la carga del tránsito.	<b>Bajo:</b> Sello de fisuras ancho mayor a 3 mm <b>Medio y Alto:</b> Sello de grietas/ Bacheo parcial o profundo. .

Grieta de reflexión de junta	Cuando una capa asfáltica es construida sobre losas de concreto.	Movimiento de las losas de concreto por cambios de temperatura o humedad.	<b>Bajo:</b> Sello de fisuras ancho mayor a 3 mm <b>Medio:</b> Sello de grietas/ Bacheo <b>Alto:</b> Bacheo/ Reconstrucción de Junta.
Desnivel de carril/espaldón	Diferencia de alturas entre el borde del pavimento y la superficie del espaldón.	Erosión o el asentamiento del espaldón o construcción de sobrecapa sin ajustar altura.	<b>Bajo, Medio, Alto:</b> Reconstrucción del espaldón para ajustarlo con la calzada.
Grietas longitudinales y transversales	Son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de la construcción del mismo.	Juntas entre carriles mal elaboradas, contracción de la capa asfáltica, reflexión de agrietamiento de capas inferiores.	<b>Bajo:</b> Sello de fisuras ancho mayor a 3 mm <b>Medio y Alto:</b> Sello de grietas/ Bacheo.
Baches y acometidas de servicios públicos	Área de pavimento que ha sido remplazada con nuevo material para reparar una estructura existente.	Se considera un defecto	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Sustitución del Bache.
Pulimiento de agregados	Porción del agregado que se extiende por encima del asfalto, es muy pequeño o no hay partículas de agregado ásperas que proporcionen resistencia al deslizamiento.	Por las cargas de tránsito.	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Nada/ Tratamiento superficial/ Sobrecarpeta/ Fresado y sobrecarpeta.
Huecos	Son depresiones pequeñas de la superficie del pavimento y forma de tazón.	Cuando el tránsito arranca pequeños pedazos de la superficie del pavimento y el ingreso de agua los lava.	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Bacheo parcial o profundo.
Ahuellamiento	Es una depresión de la superficie en el trayecto de las ruedas de los vehículos.	Deformaciones permanentes de cualquiera de las capas del pavimento.	<b>Bajo:</b> Nada/ Perfilado y sobrecapa. <b>Medio y Alto:</b> Bacheo parcial o profundo/ Perfilado y sobrecarpeta.
Desplazamiento	Movimiento longitudinal y permanente de un área localizada de la superficie del pavimento.	Por cargas de tránsito.	<b>Bajo:</b> Nada/ Perfilado <b>Medio y Alto:</b> Perfilado/ Bacheo.
Grietas parabólicas	Son fisuras en forma de media luna, perpendiculares a la dirección del tránsito.	Por el frenado o giro de los vehículos que inducen a deslizamiento en la superficie.	<b>Bajo:</b> Nada/ Bacheo. <b>Medio y Alto:</b> Bacheo.

Hinchamiento	Pandeo de la superficie del pavimento hacia arriba.	Causado por congelamiento de la subrasante.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Reconstrucción.
Desprendimiento de agregado grueso	Material se desprende de la capa asfáltica.	Bajo contenido de ligante, mala calidad de la mezcla o compactación insuficiente.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Perfilado y Sobrecapa.
Meteorización	Desgaste del ligante asfáltico y la matriz de agregado fino de la mezcla.	Envejecimiento	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Perfilado y Sobrecapa.

Fuente: Procedimiento de inspección y calificación del pavimento. Parte 1. Pavimentos asfálticos / Propia.

**Tabla AP-2** Tipos de deterioros presentes en pavimentos rígidos.

Tipo de deterioro	Descripción	Causa	Solución
Rotura de pandeo	Suele ocurrir en clima cálido, a lo largo de una junta o grieta transversal que no tiene suficiente espacio para permitir la expansión de la losa.	Cuando el proceso de expansión no puede disipar suficiente presión.	<b>Bajo:</b> Nada/ Bacheo profundo o parcial. <b>Medio y Alto:</b> Bacheo profundo/ Reemplazo de la losa.
Rotura de esquina	Es una grieta que intercepta las juntas de la losa a distancias menores o iguales que la mitad de sus respectivas longitudes medidas desde la esquina de interés.	Cargas de tránsito, resistencia inadecuada del concreto.	<b>Bajo:</b> Nada / Sello de Grietas. <b>Medio:</b> Sello de Grietas / Bacheo profundo <b>Alto:</b> Bacheo profundo.
Losa dividida	Las losas se dividen en cuatro o más pedazos.	Sobrecargas, soporte inadecuado o combinación de ambas.	<b>Bajo:</b> Sello de grietas. <b>Medio y Alto:</b> Reemplazo de losa.

Grietas de durabilidad ("D")	Patrón de grietas cercanas y paralelas a una junta o una grieta lineal.	Se debe a la expansión térmica de los agregados gruesos, debido al ciclo de congelamiento y descongelamiento.	<b>Bajo:</b> Nada / <b>Medio:</b> Bacheo profundo / Reconstrucción de junta <b>Alto:</b> Bacheo profundo / Reconstrucción de junta / Reemplazo de losa.
Escalonamiento	Diferencia de nivel entre losas a través de una junta.	Asentamientos, bombeo o erosión de material inferior a la losa, alabeo de los bordes por cambios de temperatura.	<b>Bajo:</b> Nada/ Pulimiento con disco de diamante. <b>Medio y Alto:</b> Pulimiento con disco de diamante.
Daño del sello de junta	Cualquier condición que permita acumulación de fragmentos de suelo o roca o la infiltración de agua dentro de las juntas.	Crecimiento de vegetación, desprendimiento del sello, endurecimiento del material o pérdida de adherencia.	<b>Bajo:</b> Nada <b>Medio y Alto:</b> Resello de juntas.
Desnivel Carril/Espaldón	Es la diferencia entre asentamientos o erosión del espaldón y el borde de carril del pavimento. Puede ser una amenaza de seguridad y contribuye a la infiltración de agua.	Erosión de material, asentamientos.	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Renivelación del espaldón o carril para corregir el nivel.
Grietas lineales (Longitudinales, Transversales y Diagonales)	Grietas que dividen la losa en tres o más partes	Cargas de tránsito y el alabeo por el gradiente térmico.	<b>Bajo:</b> Nada / <b>Medio:</b> Sello de Grietas <b>Alto:</b> Sello de grietas / Bacheo profundo / Reemplazo de losa

Bacheo grande y acometidas de servicios públicos	Mayor a 0.5 m2. Área donde se retiró el pavimento original y se reemplazó con material nuevo.	Se considera un defecto	<b>Bajo:</b> Nada/ Sello de grietas <b>Medio y Alto:</b> Sello de grietas / Reemplazo de bache.
Bacheo pequeño	Mayor a 0.5 m2. Área donde se retiró el pavimento original y se reemplazó con material nuevo.	Se considera un defecto	<b>Bajo:</b> Nada/ Sello de grietas <b>Medio y Alto:</b> Sello de grietas / Reemplazo de bache.
Pulimientado de agregados	Porción del agregado que se extiende por encima del concreto cuando es muy pequeño o cuando no hay partículas de agregado ásperas y angulares que proporcionen resistencia.	Cargas de tránsito	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Ranurado de la superficie / Sobrecapa.
Desprendimientos	Separación de un pedazo del pavimento.	Acción de expansiones térmicas con agregados expansivos.	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Nada.
Bombeo	Expulsión de material inferior de la losa a través de las juntas o grietas.	Deflexión de la losa debido a cargas de tránsito.	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Sello de juntas y grietas / Restauración de la transferencia de carga entre losas.
Punzonamiento	Describe un área puntual y fragmentada de la losa.	Cargas pesadas, espesores inadecuadas de losa, pérdida de soporte de la fundación o deficiencias en la construcción.	<b>Bajo:</b> Nada/ Sello de grietas <b>Medio y Alto:</b> Bacheo profundo.
Descaramiento por agrietamiento	Se refiere a una red de grietas superficiales finas o capilares, las cuales se extienden de la parte superior del concreto y tienden a interceptarse en ángulos de 120°.	Exceso de manipulación en el concreto terminado	<b>Bajo:</b> Nada. <b>Medio:</b> Nada / Reemplazo de losa. <b>Alto:</b> Bacheo profundo o parcial / Reemplazo de losa / Sobrecapa.

Grietas de retracción	Fisuras capilares de menos de 2 metros de longitud y no se extiende a través de toda la losa.	Se forman durante el fraguado y el curado del concreto	<b>Bajo, Medio y Alto:</b> Nada.
Astillamiento de esquina	Es la rotura de la losa dentro de una distancia aproximada de 500 mm desde la arista.	Cargas de tránsito o infiltración de materiales.	<b>Bajo:</b> Nada. <b>Medio y Alto:</b> Bacheo parcial.
Astillamiento de junta	Es la rotura de los bordes de la losa dentro de una distancia aproximada de 500 mm desde la arista.	Cargas de tránsito o infiltración de materiales.	<b>Bajo:</b> Nada. <b>Medio:</b> Bacheo parcial. <b>Alto:</b> Bacheo parcial / Reconstrucción de la junta.

---

Fuente: Procedimiento de inspección y calificación del pavimento. Parte 1. Pavimentos asfálticos / Propio

**Tabla AP-3.** Acciones aplicables en los pavimentos flexibles y semi-rígidos.

Acciones	Descripción
Sellado de grietas	Es una actividad que consiste en la limpieza de las grietas suficientemente anchas y sellado de las mismas con productos asfálticos, lechada o mezcla asfáltica, a fin de prevenir la entrada de agua y otros materiales a la estructura del pavimento.
Sand Seal (Sello de Arena)	Consiste en agregar asfalto o emulsión sobre la superficie por tratar y enseguida la colocación de arena. Este tratamiento ayuda sellar la superficie y aumentar la resistencia al deslizamiento.
Fog Seal	Consiste en la aplicación de emulsión asfáltica sobre el pavimento.
Chip Seal	Consiste en agregar asfalto o emulsión que presenta una alta viscosidad, sobre la superficie y después la colocación de agregado grueso. Su función es sellar el agrietamiento o fisuras y mejorar la fricción.
Bacheo	Son las más comunes en la reparación de fallas localizadas en pavimentos. El bacheo es generalmente entendido como la remoción y reposición de un área localizada severamente dañada o el relleno de huecos producidos por disgregación. Se realiza para corregir fallas estructurales manifestadas por la aparición de grietas del tipo piel de cocodrilo de severidad media y alta, ahuellamiento profundo, grietas de deslizamiento y fallas puntuales como huecos, quiebres, hundimientos y otros.
Tratamiento superficial (sello) localizado	Es la aplicación de un sello asfáltico o tratamiento superficial en sitios localizados menores de 300 m <sup>2</sup> de área. La acción consiste en un riego con material asfáltico cubierto con agregados, o lechada asfáltica (slurry seal). Su ejecución es conveniente sobre pavimentos envejecidos y oxidados, que presenten grietas finas o pérdida de agregado por disgregación menor. Así mismo, pueden ser utilizados para corregir problemas de textura y mejorar la resistencia al deslizamiento en puntos críticos como curvas, intersecciones, pendientes y otros.
Nivelación localizada con mezcla asfáltica	Es un bacheo superficial. Es adecuada para corregir fallas de poca gravedad como hundimientos, ahuellamientos, zanjas, etc. Su ejecución requiere barrido y riego asfáltico de la superficie por tratar. Luego la mezcla es extendida a mano o con la ayuda de equipos de construcción (minicargadores, motoniveladoras, etc., según el caso).
Perfilado y/o texturización localizada	Perfilado en frío es un proceso por el cual un equipo provisto de un cilindro rotatorio, con dientes de especial dureza, remueve pavimentos de concreto asfáltico (o concreto Portland), hasta una profundidad especificada. Estos equipos cuentan con sistemas de nivelación automática y son capaces de operar con buena precisión.
Sobrecarpeta	Capa de concreto asfáltico. El procedimiento clásico para proteger un pavimento deteriorado, eliminar o reducir su rugosidad, mejorar la resistencia al deslizamiento y reforzar la estructura de un pavimento flexible o rígido es mediante la repavimentación con concreto asfáltico. Las capas asfálticas de alta calidad ofrecen solución para casi todo tipo de problema.



Reciclado en frío

Consiste en remover el espesor de mezcla asfáltica por tratar y reciclarla mediante la adición de emulsión asfáltica. Esta operación puede hacerse en planta, transportando el material removido o sobre la vía con equipos especiales para tal fin; en este caso, el equipo está dotado de dientes para escarificar (disgregar) la capa existente y dosificadores para agregar agua y emulsión, mezclando de forma simultánea los materiales dejando como producto final una mezcla reciclada en frío, la cual puede ser compactada seguidamente.

Nivelación de tapas de caja de registro

La remoción y nivelación con la nueva superficie de tapas de caja de registro, tanto circulares como rectangulares. Igualmente, para tragantes o parillas en drenajes. Se deben nivelar con piezas metálicas de hierro fundido colocadas sobre conos de concreto, los cuales aumentan la altura.

Fuente: Manual de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos / Propio

**Tabla AP-4.** Acciones aplicables en los pavimentos rígidos

<b>Acciones</b>	<b>Descripción</b>
Sellado de juntas y grietas	Es una actividad que consiste en la limpieza de las grietas suficientemente anchas y sellado de las mismas con productos asfálticos, lechada, mezcla asfáltica o termoplásticos, con el fin de prevenir la entrada de agua y otros materiales a la estructura del pavimento.
Bacheo	Son las más comunes en la reparación de fallas localizadas en pavimentos. El bacheo es generalmente entendido como la remoción y reposición de un área localizada severamente dañada o el relleno de huecos producidos por disgregación. Se realiza para corregir fallas estructurales manifestadas por la aparición de grietas del tipo piel de cocodrilo de severidad media y alta, ahuellamiento profundo, grietas de deslizamiento y fallas puntuales como huecos, quiebres, hundimientos y otros.
Cepillado de la superficie	Consiste en cepillar la cara superior del pavimento, con el fin de reducir irregularidades y mejorar el confort de los usuarios al manejar.
Perfilado y/o texturización localizada	Perfilado en frío es un proceso por el cual un equipo provisto de un cilindro rotatorio, con dientes de especial dureza, remueve pavimentos de concreto asfáltico (o concreto Portland), hasta una profundidad especificada. Estos equipos cuentan con sistemas de nivelación automática y son capaces de operar con buena precisión.
Sobrecarpetas	Capa de concreto asfáltico. El procedimiento clásico para proteger un pavimento deteriorado, eliminar o reducir su rugosidad, mejorar la resistencia al deslizamiento y reforzar la estructura de un pavimento flexible o rígido es mediante la repavimentación con concreto asfáltico. Las capas asfálticas de alta calidad ofrecen solución para casi todo tipo de problema.
Nivelación de espaldones en concreto	Renivelación o reparación de los espaldones en un pavimento con concreto hidráulico.
Nivelación de espaldones en concreto	Renivelación o reparación de los espaldones en un pavimento con concreto asfáltico.

Nivelación de tapas de  
caja de registro

La remoción y nivelación con la nueva superficie de tapas de caja de registro, tanto circulares como rectangulares. Igualmente, para tragantes o parillas en drenajes. Se deben nivelar con piezas metálicas de hierro fundido colocadas sobre conos de concreto, los cuales aumentan la altura.

---

Fuente: Catálogo de deterioros de pavimentos rígidos / Propio







## Municipalidad de Pérez Zeledón

Cédula Jurídica 3014042056

MINUTA DECISIÓN DEL TIPO DE PAVIMENTO A CONSTRUIR CALLE 1

FECHA: 20 de octubre del 2017

### PARTICIPANTES:

- José Murillo Barboza, Estudiante de Ingeniería en Construcción.
- Ing. Ronny Rojas, Coordinador U.T.C.V.
- Ing. Andrea Vargas, Ingeniera Vial U.T.C.V.
- MSc. Adán Barahona, Gerente de Proyectos U.T.C.V.
- Ing. Geiner Navarro, Ingeniera Vial U.T.C.V.
- Ing. Johan Aguirre, Ingeniero Topógrafo U.T.C.V.
- Lic. Leonardo Mena, Promotor Social U.T.C.V.

Como parte del desarrollo del proyecto final de graduación del estudiante José Rafael Murillo Barboza en la Unidad Técnica de Conservación Vial de la Municipalidad de Pérez Zeledón el día 20 de octubre del 2017, se aplicó la metodología de panel de expertos para determinar según los resultados y los criterios de cada participante cual alternativa de pavimento es la más factible y la que mejores resultados va a dar en el la Calle 1 de la Ciudad de San Isidro.

### Puntos importantes que se desarrollaron:

- En cuanto a los espesores de los sistemas de alcantarillado por debajo de la calle ninguno de los espesores lo afectaría por lo cual este aspecto no interfiere en la decisión de la alternativa.
- Discusión del costo de inversión inicial: Según los resultados el costo más bajo de las alternativas era construir un pavimento flexible el cual sus costos se estimaba en ¢220,114,034, pero el pavimento semi-rígido tiene una diferencia del 15% mayor, aunque por aspectos técnicos y mejora en le rendimiento del pavimento se puede asumir. El pavimento rígido en este caso si se encuentra bastante más elevado el precio y por lo cual se descarta según este criterio.
- Aspectos Técnicos y Constructivos: Entre el pavimento flexible, semi-rígido y rígido se comenta que el pavimento flexible es el más sencillo de desarrollar y el que tomaría menor tiempo de puesta en marcha pero que igualmente se podría el pavimento semi-rígido para disminuir el efecto de las deformaciones en la vida útil del pavimento ya que a lo largo de los años en el futuro el crecimiento de la flota vehicular subirá un 3% y pasan vehículos pesados a velocidades bajas que propician a que esta deformación se genere. Igualmente se propone que la mezcla que se utilice sea de 19 mm para ayudar a la estabilidad de la mezcla.

Teléfono (506) 2771-03-90 Fax (506) 2771-21-05  
Correo electrónico: rrojas@mpz.go.cr Apartado Postal 274-8000

Figura AP-21. Minuta del panel de experto realizado para determinar la alternativa a escoger.



## Municipalidad de Pérez Zeledón

Cédula Jurídica 3014042056

### MINUTA DECISIÓN DEL TIPO DE PAVIMENTO A CONSTRUIR CALLE 1

El pavimento rígido

- Mantenimiento: El costo de mantenimiento será en flexible y semi-rígido son más elevados que el rígido, pero igualmente sumando costos iniciales y mantenimiento se determina que estas dos primeras opciones son menores. Y que el mantenimiento que se haga es más rápido que en un pavimento flexible.
- Aspectos Sociales: En cuanto a este aspecto se determina que cualquier alternativa va mejorar en un 100 % el transitar por esta vía, pero que construir un pavimento rígido va afectar mayormente a los comerciantes que por estar cerrada más tiempo la vía las ventas y servicios que ofrecen van a decaer. En este caso necesario que la puesta en marcha será rápida para habilitar el ingreso a el Hospital.
- Análisis Económico: Se determino que según los resultados solo el pavimento flexible cumplía con los requerimientos de VAN positivo y TIR mayor al 12% de la tasa de retorno, pero se comenta que este método bueno, pero que no satisface por completo las necesidades para decidir con base en estos indicadores. Y por lo cual se sigue tomando en cuenta la opción del pavimento semi-rígido.

Por lo que tomando en cuenta los pros y contras de cómo se podrá comportar el pavimento en el paso de tiempo con las cargas vehiculares en crecimiento y vehículos pesados transitando por el mismo se determina que el pavimento semi-rígido es la mejor opción para satisfacer las necesidades de la Calle 1 y que no se vea deformada en un periodo muy temprano por el tránsito pesado que pueda circular por esta vía. Los costos son aceptables y lo único que se debe considerar es que se necesitaría poder colocar la capa de mezcla asfáltica a los 3 días por lo cual se debe de mejorar la resistencia de la base en edades tempranas

Como conclusión en conjunto y basándose en lo dicho anteriormente se decidió la utilización de un pavimento semi-rígido para la Calle 1 de la Ciudad de San Isidro del General, Pérez Zeledón.

---

Teléfono (506) 2771-03-90 Fax (506) 2771-21-05  
Correo electrónico: rrojas@mpz.go.cr Apartado Postal 274-8000

Figura AP-22. Minuta del panel de experto realizado para determinar la alternativa a escoger.




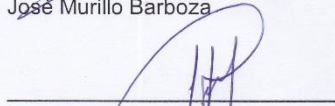
## Municipalidad de Pérez Zeledón

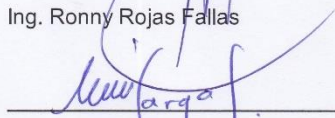
Cédula Jurídica 3014042056

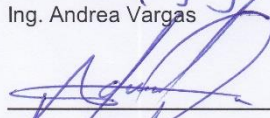
MINUTA DECISIÓN DEL TIPO DE PAVIMENTO A CONSTRUIR CALLE 1

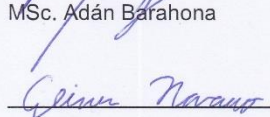
Firmas de Conformidad

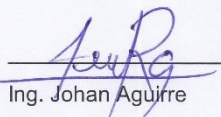
  
\_\_\_\_\_  
José Murillo Barboza

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Ronny Rojas Fallas

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrea Vargas

  
\_\_\_\_\_  
MSc. Adán Barahona

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Geiner Navarro

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Johan Aguirre

  
\_\_\_\_\_  
Lic. Leonardo Mena

Teléfono (506) 2771-03-90 Fax (506) 2771-21-05  
Correo electrónico: rrojas@mpz.go.cr Apartado Postal 274-8000

Figura AP-23. Minuta del panel de experto realizado para determinar la alternativa a escoger.

## **Recomendaciones técnicas para los materiales a utilizar:**

- Límite líquido no mayor de 25, según ensayo AASHTO T-89. Abrasión no mayor de 50%, según ensayo AASHTO T-96. La muestra por ensayar deberá someterse previamente a un período de saturación en agua no menor de 48 horas
- Un índice de durabilidad del material grueso (retenido en tamiz 4,75 mm [N° 4]), y del material fino (que pase el tamiz 4,75 mm [N° 4]), no menor de 35, determinado mediante el ensayo AASHTO T-210. El agregado fino (material que pasa el tamiz 4,75 mm [N° 4]) deberá consistir en arena natural o triturada y partículas minerales finas.
- La fracción que pasa por el tamiz 0,075 mm (N° 200) no deberá ser mayor que los 2/3 de la fracción que pasa por el tamiz 0,425 mm (N° 40)

## **Recomendaciones constructivas:**

- Se recomienda que el material para la capa de base y el agua deberán homogeneizarse en una mezcladora aprobada. El agua deberá adicionarse durante la operación de homogeneizado, en la cantidad necesaria para garantizar el contenido de humedad que permita compactar el material a la densidad especificada. Después de homogeneizado, el material deberá transportarse al sitio de trabajo y deberá mantener la humedad adecuada; y deberá colocarse por medio de una caja distribuidora acoplable al equipo de acarreo, o con vehículos especialmente equipados para colocar el material en una capa continua uniforme o camellón.
- Cuando el material esté uniformemente homogeneizado, se deberá extender en forma uniforme para poder obtener la compactación y el espesor indicados. El equipo de acarreo deberá distribuirse uniformemente sobre toda la superficie de la capa colocada, con el objeto de producir un mínimo de deformaciones por huellas del equipo, y evitar una compactación dispareja.
- La compactación deberá avanzar gradualmente de los lados hacia el centro, paralelamente a la línea central del camino, y deberá continuar hasta que se compacte toda la superficie.
- Todas las irregularidades o baches que se presenten deberán corregirse removiendo y adicionando material hasta que la superficie quede lisa y uniforme. Al lado de aceras, cabezales, muros y otros lugares inaccesibles para el rodillo, el material de base deberá compactarse con pisones u otros compactadores aprobados.
- La compactación deberá continuar hasta que el material se haya compactado a una densidad no inferior al 95 por ciento de la densidad máxima obtenida con el ensayo AASHTO T-180, método D.
- El acabado superficial y/o la textura final del pavimento deben ser homogéneos y adecuados según el criterio de la Ingeniería de Proyecto.
- Las pegadas longitudinales y transversales deberán construirse de tal manera que las paredes de la mezcla colocada con anterioridad estén perpendiculares a la superficie, limpias y debidamente imprimadas antes de colocar la carpeta fresca.

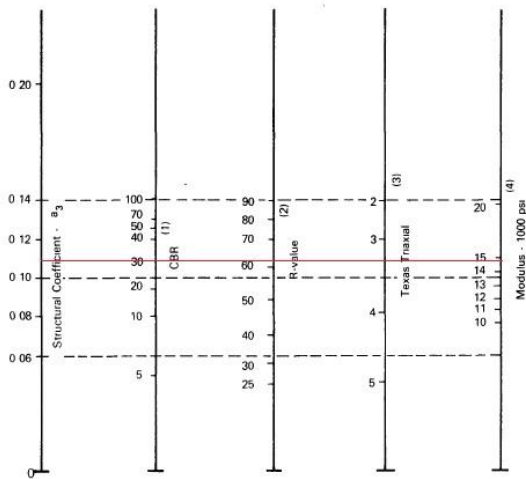
## **Equipo recomendado:**

- Equipo de acarreo (es necesario para asegurar la continuidad de las obras, de acuerdo con el programa de trabajo)
- Motoniveladora
- Compactador
- Tanque de agua con aspersores
- Retroexcavador
- Vagonetas (carga y descarga)
- Vagoneta (acarreo)
- 1 Pavimentador Bituminoso (Finisher)
- 1 Distribuidor de Asfalto con aspersores
- 1 Compactador de Vibratorio de rodillos

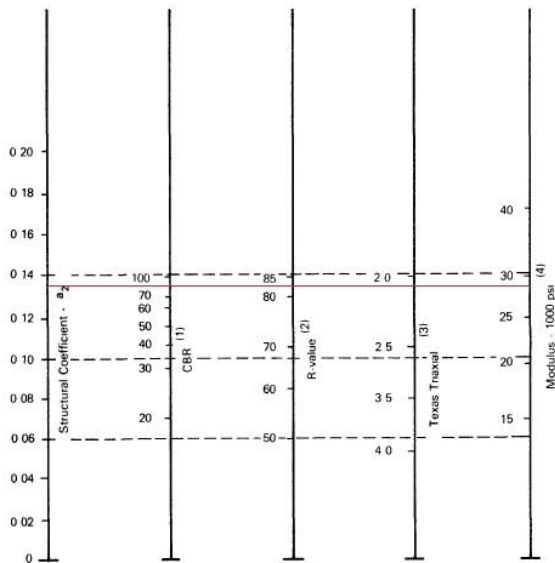


- 1 Compactador de llantas de hule
- 1 Escoba Mecánica
- Equipo para cortar Bordes

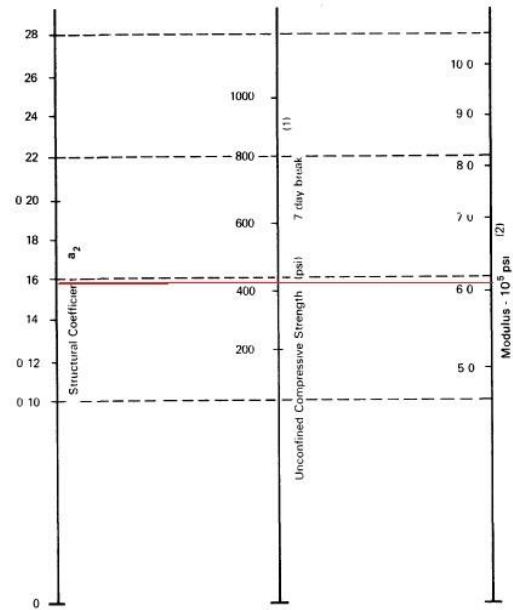
# Anexos



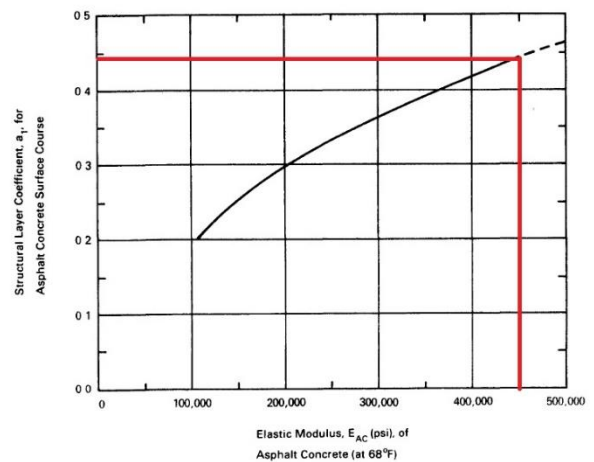
**Figura A-1.** Nomograma para sub-base. Figura 2.7 de AASHTO 93  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.



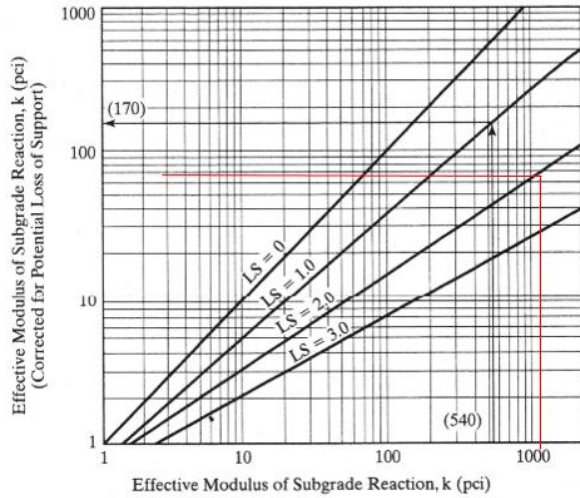
**Figura A-2.** Nomograma para base granular Figura 2.6 de AASHTO 93  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures



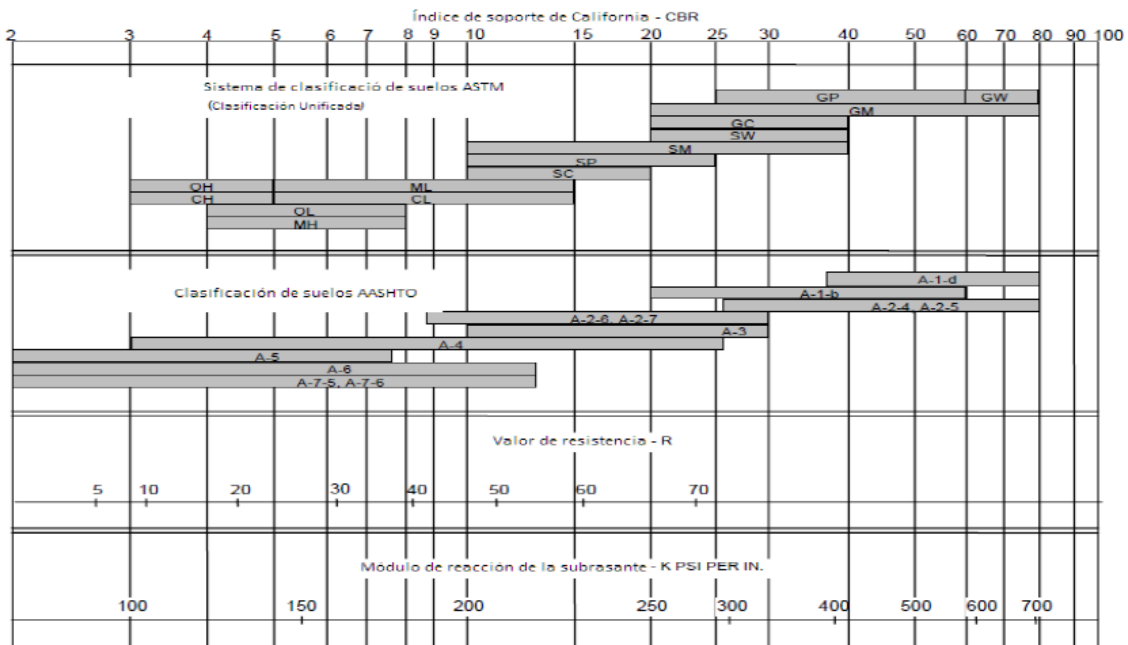
**Figura A-3.** Nomograma para base estabilizada con cemento. Figura 2.8 de AASHTO 93  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures



**Figura A-4.** Nomograma para mezcla asfáltica Figura 2.5 de AASHTO 93  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures



**Figura A-5.** Determinación de módulo de reacción efectivo corregido por pérdida de soporte según nomograma Figura 3.6 de AASHTO 93  
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures



**Figura A-6.** Correlaciones de suelos  
Fuente: PCA 1984, Modificado Vargas, 2016



## Clases Diarias

**ClasDiarias-3**

**Sitio:**

Camino 1-19-126.0.0N

**Descripción:**

Frente al parqueo muni

**Hora del Filtro:**

14:56 lunes, 22 de agosto de 2016 => 15:08 lunes, 29 de agosto de 2016

**Esquema:**

Clasificación Vehicular (ARX)

**Filtro:**

Cls(1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 ) Sentido(NESO) Vel.(10,160) Intervalo Vehicular(>0)

lunes, 22 de agosto de 2016													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
<b>lun*</b>	190	1791	26	42	7	0	0	1	1	1	0	0	2059
(%)	9.2	87.0	1.3	2.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>mar</b>	514	4408	77	172	17	11	1	7	1	3	0	0	5211
(%)	9.9	84.6	1.5	3.3	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	
<b>mié</b>	485	4479	72	161	12	16	4	3	1	0	0	0	5233
(%)	9.3	85.6	1.4	3.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>jue</b>	434	4170	47	155	11	3	2	3	0	1	0	0	4826
(%)	9.0	86.4	1.0	3.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>vie</b>	398	3944	67	156	9	5	1	2	1	4	0	0	4587
(%)	8.7	86.0	1.5	3.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	
<b>sáb</b>	367	3928	49	116	19	10	1	0	1	5	0	0	4496
(%)	8.2	87.4	1.1	2.6	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	
<b>dom</b>	240	2837	7	43	2	6	0	1	0	1	0	0	3137
(%)	7.7	90.4	0.2	1.4	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

**Figura A-8.** Conteo vehicular de la Calle 1, centro de San Isidro, Pérez Zeledón  
Fuente: U.T.C.V. Municipalidad de Pérez Zeledón

**INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMACION**  
**PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS**  
(estaciones mecánicas)

ESTACION : 98 89 COOPEAGRI, EL HOYON, P.Z																Latitud: 09 ° 21 ' N Longitud: 83 ° 43 ' O Altitud. 680 m.s.n.m		
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total		
LLUVIA	1998	2015	17.8	25.9	26.4	104.4	311.3	279.8	256.3	331.2	363.2	434.9	295.8	89.2	211.4	2536.3		
<b>VIENTO DIR. PREDOMINANTE</b>																		
Promedio dias con lluvia >= 0.1 mm.			3	3	4	9	18	17	18	19	19	21	18	8	157.8	Total.		

**Figura A-9.** Promedio mensual histórico de la precipitación en Pérez Zeledón  
Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

## PINDECO

Ubicación: Buenos Aires

Lat: 9° 7' 59" Norte Lon: 83° 19' 59" Oeste Altitud: 397 m.s.n.m.

Tipo: Manual

Período

Lluvia: 1985 - 2013

Temperatura: 1985 - 2013

Humedad: 1998 - 2013

### Promedios mensuales

Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa(%)	Lluvia (mm)	Días con lluvia (mm)
	Max.	Min.	Med.			
ENE	31.9	19.3	25.6	77	33.5	5
FEB	33.1	19.1	26.1	74	26.3	4
MAR	33.5	19.9	26.7	74	79.7	7
ABR	32.4	21.0	26.7	79	214.9	15
MAY	31.0	21.3	26.1	84	428.4	23
JUN	30.4	21.2	25.8	84	401.7	22
JUL	30.2	20.9	25.6	84	364.5	21
AGO	30.5	20.9	25.7	85	452.1	24
SEP	30.4	20.7	25.5	84	508.0	25
OCT	29.8	20.8	25.3	87	527.6	26
NOV	29.8	20.9	25.4	86	310.2	21
DIC	30.7	20.3	25.5	81	69.2	9

**Figura A-10.** Promedio mensual histórico de temperaturas en PINDECO, Buenos Aires  
Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

**Tabla A-1.** Nivel de confianza y PSI final según oficio DVOP-5170-07

Zona	TPD	Nivel de confianza	Índice de servicio terminal PSI
Rutas Primarias	Menor a 500	75	2,0
	Entre 500 y 2000	85	2,5
	Mayor a 2000	90	2,5
Rutas secundarias	Menor a 500	70	2,0
	Entre 500 y 2000	80	2,0
	Mayor a 2000	85	2,5
Rutas terciarias	Menor a 500	70	2,0
	Entre 500 y 2000	75	2,0
	Mayor a 2000	80	2,0

Fuente: Oficio DVOP-5170-07

**Tabla A-2.** Recomendaciones para el periodo de análisis según el tipo de ruta según LanammeUCR

Condiciones de la ruta	Periodo de análisis (años)
Urbana de alto volumen	15 - 20
Rural de alto volumen	10 - 15
Pavimentada de bajo volumen	8 - 12
Superficie de agregados de bajo volumen	5 - 8

Fuente: Publicación Especial LM-PI-GM-INF-22-14

**Tabla A-3.** Datos de Zr según la AASHTO 93

Porcentaje de confiabilidad (R)	Zr
50	-0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.

**Tabla A-4.** Coeficientes de drenaje  $m_2$  y  $m_3$  para base y sub-base

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está sometido a condiciones de humedad			
	menos de 1%	1-5%	5-25%	mayor a 25%
Excelente	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Buena	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Regular	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Pobre	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Muy pobre	1,05-0,95	0,95-0,75	0,60-0,40	0,40

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures

**Tabla A-7.** Longitud de dovela recomendada según su diámetro

Recomendación de Tamaño y Longitud de Dovelas		
Espesor de losa (in)	Diámetro de Dovela (in)	Longitud de Dovela (in)
5	0.625	12
6	0.75	14
7	0.875	14
8	1	14
9	1.125	16
10	1.25	18
11	1.375	18
12	1.5	20

Fuente: PCA

**Tabla A-5.** Coeficientes de drenaje recomendado (Cd) para pavimentos rígidos

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está sometido a condiciones de humedad			
	menos de 1%	1-5%	5-25%	mayor a 25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Regular	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Pobre	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy Pobre	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures

**Tabla A-6.** Espesores mínimos de capas en pavimentos según AASHTO

Espesores Mínimos (in)		
Ejes Equivalentes	Concreto Asfáltico	Agregados Base
Menos de 50,000	1 o tratamiento superficial	4
50,001-150,000	2	4
150,001-500,000	2.5	4
500,001-2,000,000	3	6
2,000,001-7,000,000	3.5	6
Más de 7,000,000	4	6

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structure

**Tabla A-8.** Umbral de falla para porcentaje de área agrietada

Ejes equivalentes período de diseño	Porcentaje de área agrietada antes de la falla
< 3 millones	75 %
3 - 15 millones	50 %
> 15 millones	20 %

Fuente: Publicación especial LM-PI-GM-INF-22-14

**Tabla A-9.** Umbral de falla para deformación permanente

Ejes equivalentes período de diseño	Ahuellamiento permisible máximo
< 3 millones	25 mm
3 - 15 millones	20 mm
> 15 millones	12.7 mm

Fuente: Publicación especial LM-PI-GM-INF-22-14

**Tabla A-10.** Umbral de falla para deformación permanente

CBR (%)	Clasificación general	Clasificación para sub-rasantes utilizadas
0-3	Muy pobre	Mala
3-7	Pobre a regular	Regular
7-20	Regular	Buena
20-50	Bueno	-
>50	Excelente	-

Fuente: Manual de Laboratorio de suelos en Ingeniería Civil

Tránsito promedio diario (TPD)	Rango
Bajo	menor a 5000
Medio	entre 5000 y 15000
Alto	entre 15000 y 40000
Especiales	mayores a 40000

Fuente: Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada

**Tabla A-11.** Clasificación del TPD

**Tabla A-12.** Datos de entrada para modelo RED

Características de la Flota de Vehículos					
	Automóvil Mediano	Vehículo de Carga	Autobús Pesado	Camión Liviano	T3-S2
<b>Costos Económicos Unitarios</b>					
Costo de Vehículo Nuevo (\$/vehículo)	10000	14000	50000	26000	60000
Costo del Combustible (\$/litro para TM, \$/MJ para TNM)	0.30	0.30	0.26	0.26	0.26
Costo del Lubricante (\$/litro)	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
Costo de Neumático Nuevo (\$/neumático)	45.00	75.00	220.00	170.00	255.00
Costo de Labor de Mantenimiento (\$/hora)	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
Costo de la Tripulación (\$/hora)	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50
Tasa de Interés (%)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
<b>Utilización y Carga</b>					
Kilómetros Conducidos por Año (km)	18000	35000	80000	50000	70000
Horas Conducidas por Año (hr)	500	1100	2000	1300	2000
Vida útil (años)	10	9	9	9	10
Porcentaje de Tiempo para Uso Privado (%)	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso Bruto de Vehículo (toneladas)	1.20	2.00	11.00	6.00	20.00

Fuente: U.T.C.V., Municipalidad de Pérez Zeledón



Datos Básicos de Entrada

<b>País/Región</b>	Costa Rica /Pérez Zeledón
<b>Año</b>	2017

<b>Moneda</b>	US\$
<b>Tasa de Cambio a US\$</b>	1.00

Tipos de Terreno

Código	Descripción	Rampas Ascendentes y Descendentes (m/km)	Curvatura Horizontal (grados/km)	N. de Rampas Ascendentes y Descendentes (#)	Peralte (%)
A	Llano	10	50	1	2
B	Ondulado	20	150	1	2
C	Montañoso	40	300	1	2

Características del Camino

<b>Altitud (m)</b>	500.0
<b>% del Tiempo que se Conduce sobre Agua</b>	20.0
<b>% del Tiempo que se Conduce sobre Nieve</b>	0.0
<b>Profundidad de Textura de Caminos Pavimentados (mm)</b>	0.69

Tipos de Camino

Código	Descripción	Superficie 1-Bituminosa 2-Concreto 3-Sin Pavimentar	Ancho del Camino (m)	Límite de Velocidad (km/hora)	Coacción del Límite de Velocidad (#)	Fricción de Actividades Laterales (#)	Fricción del TNM (#)
X	Pavimento	1	8.0	100.0	1.1	1.0	1.0
Y	Ripio	3	6.0	80.0	1.1	1.0	1.0
Z	Tierra	3	5.0	70.0	1.1	1.0	1.0

Tipos de Vehículo

Código	Descripción	Número de Ruedas	Número de Ejes
1	Automóvil Mediano	4	2
2	Vehículo de Carga	4	2
3	No Utilizado	#N/A	#N/A
4	No Utilizado	#N/A	#N/A
5	Autobús Pesado	10	3
6	Camión Liviano	4	2
7	No Utilizado	#N/A	#N/A
8	Camión Pesado	10	3
9	Camión Articulado	18	5

Figura A-11. Modelo Red Hoja HDV IV Datos de Entrada  
Fuente: Modelo RED

Características de la Flota de Vehículos

	Automóvil Mediano	Vehículo de Carga	No Utilizado	No Utilizado	Autobús Pesado	Camión Liviano	Camión No Utilizado	T3-S2	Camión Articulado
<b>Costos Económicos Unitarios</b>									
Costo de Vehículo Nuevo (\$/vehículo)	10000	14000	20000	35000	50000	26000	42000	60000	89000
Costo del Combustible (\$/litro para TM, \$/MJ para TNM)	0.30	0.30	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Costo del Lubricante (\$/litro)	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
Costo de Neumático Nuevo (\$/neumático)	45.00	75.00	220.00	220.00	220.00	170.00	255.00	255.00	320.00
Costo de Labor de Mantenimiento (\$/hora)	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
Costo de la Tripulación (\$/hora)	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Tasa de Interés (%)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
<b>Utilización y Carga</b>									
Kilómetros Conducidos por Año (km)	18000	35000	80000	80000	80000	50000	50000	70000	80000
Horas Conducidas por Año (hr)	500	1100	2000	2000	2000	1300	1800	2000	2000
Vida útil (años)	10	9	9	9	9	9	10	10	10
Porcentaje de Tiempo para Uso Privado (%)	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso Bruto de Vehículo (toneladas)	1.20	2.00	3.00	6.00	11.00	6.00	12.00	20.00	30.00

Vehículo de Referencia Adoptado para estimar la Rugosidad como una Función de la Velocidad del Vehículo de Referencia  
Automóvil Mediano

Figura A-12. Modelo Red Hoja HDV IV Datos de Entrada  
Fuente: Modelo RED

## Datos de Control

Nombre del País	Costa Rica
Nombre del Proyecto	Calle 1
Código de Identificación del Camino	1-19-026
Nómbre del Camino	Calle 1
Moneda	Dólares
Símbolo Monetario	\$

Duración de la Estación Húmeda (días)	120
Fecha de Evaluación	octubre 18, 2017
Factor de Costos Económicos de Agencia	0.85
Tasa de Descuento (%)	12%
Período de Evaluación (años)	20
Año Calendario Inicial	2018
Población Servida (personas)	20932

## Datos de Seteo

	Nombre de Cada tipo de Vehículo (máx. dos palabras)
Tipo de Vehículo 1	Automóvil Mediano
Tipo de Vehículo 2	Vehículo Carga
Tipo de Vehículo 3	Autobús Liviano
Tipo de Vehículo 4	Autobús Mediano
Tipo de Vehículo 5	Autobús Pesado
Tipo de Vehículo 6	Camión Liviano
Tipo de Vehículo 7	Camión Mediano
Tipo de Vehículo 8	Camión Pesado
Tipo de Vehículo 9	Camión Articulado

	Nombre de Cada Tipo de Terreno
Tipo de Terreno A	Llano
Tipo de Terreno B	Ondulado
Tipo de Terreno C	Montañoso

	Nombre de Cada Tipo de Camino
Tipo de Camino X	Pavimento
Tipo de Camino Y	Ripio
Tipo de Camino Z	Tierra

Opción de Indicador de Condición	<input type="radio"/> Rugosidad <input checked="" type="radio"/> Veloc. de un Vehículo de Referencia <input type="radio"/> Rugosidad y Velocidades de Flota de Vehículos
----------------------------------	---

**Figura A-13.** Modelo Red Hoja Principal Control y Seteo  
Fuente: Modelo RED

## Costos de Tiempo de Viaje

	Número de Pasajeros (#)	Costo de Tiempo de Pasajero (\$/pas-hr)	Costo de Tiempo de Retención de Carga (\$/veh-hr)
Automóvil Mediano	3	1.00	0.00
Vehículo Carga	1	0.50	0.00
Autobús Liviano	10	0.50	0.00
Autobús Mediano	20	0.50	0.00
Autobús Pesado	40	0.50	0.00
Camión Liviano	0	0.00	0.00
Camión Mediano	0	0.00	0.00
Camión Pesado	0	0.00	0.00
Camión Articulado	0	0.00	0.00

## Costos de Accidentes

	Costos en Dólares
Costo Medio por Accidente	10000

**Figura A-13.** Modelo Red Hoja Principal Tiempo y Accidentes  
Fuente: Modelo RED

## Tránsito Normal

### Estación Seca

	Tránsito Diario 2018 (veh/día)	Composición 2018 (%)	Tránsito Diario 2037 (veh/día)	Composición 2037 (%)
Automóvil Mediano	4479	94%	7854	94%
Vehículo Carga	72	2%	126	2%
Autobús Liviano	0	0%	0	0%
Autobús Mediano	0	0%	0	0%
Autobús Pesado	6	0%	11	0%
Camión Liviano	161	3%	282	3%
Camión Mediano	6	0%	11	0%
Camión Pesado	16	0%	28	0%
Camión Articulado	8	0%	14	0%
<b>Total</b>	<b>4748</b>	<b>100%</b>	<b>8326</b>	<b>100%</b>
Media Ponderada				

**Figura A-14** Modelo Red Hoja Principal Tránsito  
Fuente: Modelo RED

Alternativas de Proyecto - Principales Características

Descripción de la Alternativa	Sin Alternativa de Proyecto	Alternativas de Proyecto		
	Alternativa 0	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	SIN INVERSION	Nuevo Pavimento Flexible	Nuevo Pavimento Semi-Rígido	Nuevo Pavimento Rígido
Tipo de Terreno (A/B/C) A: Llano B: Ondulado C: Montañoso	A	A	A	A
Tipo de Camino (X/Y/Z) X: Pavimento Y: Ripio Z: Tierra	X	X	X	X
Estación Seca				
Longitud del Camino (km)	0.785	0.785	0.785	0.785
N.A.				
Velocidad de Automovil Mediano (km/hr)	20.0	30.0	30.0	30.0
Duración de la Inversión en Años (0/1/2/3)	0	1	1	1
Porcentaje de Costos de Inversión en el Año 1 (%)	0%	100%	100%	100%
Porcentaje de Costos de Inversión en el Año 2 (%)	0%	0%	0%	0%
Porcentaje de Costos de Inversión en el Año 3 (%)	0%	0%	0%	0%
Costos Financieros de Inversión (000\$/m)	0.00	486.81	571.55	783.46
Costos Financieros Fijos de Mantenimiento (000\$/km/year)	11.06	5.39	4.79	2.09
Costos Financieros Variables de Mantenimiento (000\$/km/year/TDA)	0.002	0.001	0.001	0.000
Tasa de Accidentes (Accidentes por 100 millones de vehiculos-km) Y Opcionalmente	1.0	1.0	1.0	1.0
Porcentaje con Muertes (%)	1%	0%	0%	0%
Porcentaje con Lesiones (%)	2%	1%	1%	1%
Porcentaje con Daños Materiales Solamente (%)	4%	3%	3%	3%
Características del Camino Alternativo: Tipo de Terreno del Camino (A/B/C) Tipo de Camino (X/Y/Z) Longitud del Camino (km) Rugosidad del Camino (IRI)		A X 1.0 7.0	A X 1.0 7.0	A X 1.0 7.0
<b>Sumario de la Solución</b>				
Valor Actual Neto (millones de \$) a una Tasa de Descuento del 12%		0.024	-0.007	-0.099
Tasa Interna de Retorno (%)		13%	12%	9%

Figura A-15 Modelo Red Hoja Principal Alter. Proyectos,P. Ppales. Caract  
Fuente: Modelo RED

	Alternativa Sin Proyecto	Posibles Alternativas de Proyecto		
	Alternativa 0	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	SIN INVERSION	Nuevo Pavimento Flexible	Nuevo Pavimento Semi-Rígido	Nuevo Pavimento Rígido
Valor Actual Neto (millones de \$) a una Tasa de Descuento del 12%	0.000	0.024	-0.007	-0.009
Tasa Interna de Retorno (%)	#N/A	13%	12%	9%
Beneficios Netos Anuales Equivalentes (\$/km) a una Tasa de Descuento del 12%	0	3721	-1090	-15066
Tasa de Retorno Modificada a una Tasa de Reinversión del 12% (%)	#N/A	12%	12%	11%
Valor Actual Neto por Costos Financieros de Inversión (proporción)	0.00	0.08	-0.02	-0.02
Valor Actual Neto por VA de Costos Económicos de Agencia (proporción)	0.00	0.07	-0.02	-0.02
Beneficios del Primer Año por Costos Económicos de Inversión (proporción)	0.00	0.11	0.09	0.07
Costos Financieros de Inversión (millones de \$)	0.00	0.38	0.45	0.57
VA de Costos Económicos de Agencia (millones de \$)	0.10	0.37	0.40	0.50
VA de Costos Económicos de Usuario de Tránsito Normal (millones de \$)	5.34	2.64	2.64	2.64
VA de Costos Económicos de Usuario de Tránsito Generado (millones de \$)	0.00	0.27	0.27	0.27
VA de Costos Económicos de la Sociedad (millones de \$)	5.43	3.28	3.31	3.41
Número de Muertes por km-año Después de la Inversión	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Inversión por Población Servida (\$/persona)	0	18.25637405	21.43445019	27.33740167
Población Servida por Inversión (personas/1000\$)	0.0	54.8	46.7	36.6

Figura A-16 Modelo Red Hoja Principal Alter. Proyectos Solución  
Fuente: Modelo RED

Dimensionamiento de la estructura de pavimento en la Calle 1 de San Isidro, Pérez Zeledón, utilizando la metodología mecanística empírica para diseño de pavimentos y creación de un plan de mantenimiento.

# Referencias Bibliográficas

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice*. Washington D.C.
- American Society for Testing and Materials. (2011). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys D6433-11*. West Conshohocken, PA.
- Archondo, R. (2004). *Guía de Usuario, RED Modelo de Evaluación Económica*. Obtenido de [http://www.ssatp.org/sites/ssatp/files/publications/HTML/Models/RED\\_3.2/RED%20-%20Modelo%20RED%20Versi%C3%B3n%203.2/RED%20-%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Usuario%20+%20Casos%20de%20estudio%20\(versi%C3%B3n%203.2\).pdf](http://www.ssatp.org/sites/ssatp/files/publications/HTML/Models/RED_3.2/RED%20-%20Modelo%20RED%20Versi%C3%B3n%203.2/RED%20-%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Usuario%20+%20Casos%20de%20estudio%20(versi%C3%B3n%203.2).pdf)
- Arguedas, C. (2011). *Fundamentos para la Evaluación Económica de Caminos y Guía Simplificada para el Manejo del Modelo RED*. Ministerio de Obras Publicas y Transportes , Dirección de Planificación Sectorial.
- Arriaga, M. G. (1998). *Índice Internacional de Rugosidad en la Red Carreteras de México*. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE , Sanfandila, Qro.
- Badilla, A. (s.f.). *Determinación de la Regularidad Superficial de Pavimentos Mediante el Cálculo de el Índice de Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y Consideraciones Importantes*. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Badilla, G. E. (2007). *Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak*. LanammeUCR, San José.
- Barahona, A. (2016). *Descripción del Modelo Básico de Gestión de Proyectos. Unidad Técnica de Gestión Vial, Municipalidad de Pérez Zeledón*.
- Bowles, J. (1981). *Manual de Laboratorio de suelos en Ingeniería Civil*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Castro, P. (2017). *Material de Clase "Diseño Estructural AASHTO"*. Tecnológico de Costa Rica, Construcción de Estructuras de Pavimentos, Cartago.
- Castro, P. (2017). *Material de Clase "Diseño Estructural de Pavimentos Rígidos"*. Tecnológico de Costa Rica, Construcción de Estructuras de Pavimentos, Cartago.
- Castro, P. (2017). *Material de Clase "Introducción a Pavimentos v4", Construcción de Pavimentos*. Tecnológico de Costa Rica, Construcción de Estructuras de Pavimentos, Cartago.
- Castro, P. (2017). *Material del curso Construcción de Pavimentos*. Cartago.
- Coronado, J. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, Secretaría Centroamericana de Integración Económica*.
- Corporacion Adina de Fomento. (2010). *Mantenimiento Vial. Informe Sectorial*. Obtenido de [http://publicaciones.caf.com/media/1133/IS\\_Mantenimiento\\_vial.pdf](http://publicaciones.caf.com/media/1133/IS_Mantenimiento_vial.pdf)
- Corredor, G. (2008). *Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHTO*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Duravia. (2012). *AASHTO 93*. Obtenido de <http://www.duravia.com.pe/wp-content/uploads/COLECCIONABLE-DURAVIA-VII.2.pdf>
- Dynatest. (s.f.). *Deflectómetro de Impacto, Dynatest HWD 8081*. USA.
- Fernández, S. (2010). *Los proyectos de inversión, evaluación financiera (2da ed. ed.)*.

- Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Higuera, C. N. (2011). Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 20, 41-54. Obtenido de <http://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1412>
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Jiménez, N. (2013). *Guía y herramienta computacional para el diseño de pavimentos flexibles dirigida al Programa de Fortalecimiento Municipal MOPT-BID Cantonal*. Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Jugo, A. (2005). *Manual de Mantenimiento Y Rehabilitación de Pavimentos*. Obtenido de [http://vialidad21.galeon.com/manual\\_mrvi\\_al.pdf](http://vialidad21.galeon.com/manual_mrvi_al.pdf)
- LanammeUCR. (2015). *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica*. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional, San José, Costa Rica.
- Loría, G. (2013). *Desarrollo de la guía de diseño de pavimentos de Costa Rica: CR\_ME*. San Pedro.
- MatrizFODA. (21 de Abril de 2017). *¿Qué es la Matriz FODA?* Obtenido de <http://www.matrizfoda.com/dafo/>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes*. San José.
- Moreno, S. L., Canessa, M. F., Mattar, C., & Orrego, R. y. (2006). Caracterización y zonificación edáfica de la región de Conquimbo. *J. Soil Sci. Plant. Nutr.*, 6, 52-74.
- Neida et all. (2011). Caracterización climática de la microcuenca del Río Monaquito, subcuenca del Río Motatán-Carache. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 765-771. Obtenido de <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2078/lib/itcrsp/reader.action?docID=10637270>
- Padilla, A. (2014). *Capítulo 4. Deformaciones Plásticas en la Capa de Rodadura de Pavimentos Asfálticos*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru.
- Quirós, R. (2015). *Desarrollo de modelos estadísticos para la determinación de respuestas mecánicas críticas en pavimentos rígidos*. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Sotil, A. (2014). *Pavimentos, Introducción a la Ingeniería de Pavimentos*. Universidad Continental, Perú.
- Terán, R. (s.f). *Evaluación de Oxidación del Asfalto Mexicano*. Mexico.
- Unidad de Gestión Municipal, LanammeUCR. (2014). *Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos*. San Pedro.
- Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR. (2012). *Manual de Diseño Simplificado de Pavimentos de Bajo Volumen*. San José.
- Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR. (2016). *Manual de Usuario CR-ME versión beta*. San José.
- Universidad Mayor de San Simón. (2004). *Facultad de Ciencias y Tecnología Pavimentos "Texto Guía"*. Cochabamba, Bolivia.
- Vargas, F. (2016). *Herramienta de Cálculo Complementaria a la Nueva Metodología de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos Rígidos de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Vásquez, R. (2015). *Procedimiento de inspección y calificación del pavimento. Parte 1. Pavimentos Asfálticos*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Vásquez, R. (2015). *Procedimientos de inspección y calificación del pavimento. Parte 2. Pavimento de concreto*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Viscarra, F. (2006). *El cono dinámico de penetración y su aplicación en la evaluación de suelos*. Universidad Privada Boliviana, Bolivia.