

Guía y herramienta computacional para el diseño de pavimentos flexibles dirigida al Programa de Fortalecimiento Municipal MOPT-BID Cantonal



CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Milton Sandoval Quirós, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Alejandro Medina Angulo, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



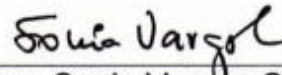
Ing. Milton Sandoval Quirós.
Representante del Director



Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Guía



Ing. Alejandro Medina Angulo.
Profesor Lector



Ing. Sonia Vargas C.alderón.
Profesora Observadora

Abstract

This project is about the development of a guide and a computational tool for the design of flexible pavements, which will be useful for municipal units road management techniques as well as the Ministry of Public Works and Transport.

The execution of this work seeks to develop a guide that includes steps and the different values of the parameters to be considered to create a structural design for a flexible pavement. Also want to study the value of truck factors for different types of vehicles and with it a comparison with currently used by the sub Geotechnical and Materials.

For development of project were used different literary sources to define the variables in a design of a pavement, and the use of computer packages for the spreadsheet.

This gave a guide and calculation tool for pavement design and rehabilitation, as well as to analyze the performance of a pavement fatigue and permanent deformation.

In conclusion it can be mentioned that the use of the guide and spreadsheet will expedite and facilitate the design of the pavement structure and with it benefit the institution in charge of the project.

Keywords: Design of flexible pavements, equivalent axle load, factor truck, flexible pavement rehabilitation.

Resumen

Este proyecto consiste en la elaboración de una guía y herramienta computacional para el diseño de pavimentos flexibles, la cual será de utilidad para las unidades técnicas de gestión vial municipal, así como para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

La ejecución de este trabajo busca desarrollar una guía donde se incluye los pasos a seguir y los diferentes valores de los parámetros a considerar para realizar un diseño estructural para un pavimento flexible. También, se desea estudiar el valor de los factores camión para los diferentes tipos de vehículos y con ello, realizar una comparación con los utilizados actualmente por la subdirección de geotecnia y materiales.

Para el desarrollo del trabajo, se utilizó diferentes fuentes literarias para definir las variables presentes en un diseño de un pavimento, así como el uso de paquetes computacionales para realizar la hoja de cálculo.

Con esto, se obtuvo una guía y herramienta de cálculo para el diseño de pavimentos y su rehabilitación, así como para el análisis del desempeño de un pavimento por fatiga y deformación permanente.

Como conclusión, se puede mencionar que con el uso de la guía y hoja de cálculo se podrá agilizar y facilitar el diseño de la estructura de pavimento y con ello, la institución a cargo del proyecto se beneficiará.

Palabras clave: Diseño de pavimentos flexibles, ejes equivalentes de carga, factor camión, rehabilitación para pavimentos flexibles.

Guía y herramienta computacional para el diseño de pavimentos flexibles dirigida al Programa de Fortalecimiento Municipal MOPT-BID Cantonal

NICOLÁS JIMÉNEZ CECILIANO

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

Diciembre del 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco teórico	6
Metodología	19
Resultados	21
Análisis de los resultados	43
Conclusiones.....	47
Recomendaciones	49
Apéndices	50
Anexos	89
Referencias	113

Prefacio

Actualmente existe un convenio entre Costa Rica y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el cual consiste en financiamiento para el desarrollo e intervención de proyectos viales nuevos y existentes. Parte de este financiamiento está dirigido a fortalecer las unidades técnicas de gestión vial municipal en temas relacionados con la capacitación de dichos departamentos así como mejorar los procesos de planificación, ejecución, supervisión y gestión de las obras municipales.

Sobre lo anterior, se han presentado deficiencias en la ejecución presupuestaria de dicho préstamo, ya que las municipalidades han tenido dificultades a la hora de desarrollar el diseño estructural de los pavimentos, por lo cual no se puede realizar el giro correspondiente del dinero. Por esta problemática, los proyectos de las unidades técnicas de gestión vial experimentan retrasos en su respectiva ejecución.

Es por ello que surge la propuesta en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de realizar un guía y herramienta computacional para el diseño estructural de pavimentos flexibles, que permita a las unidades de gestión vial ejecutar estudios de factibilidad apropiados desde el punto de vista técnico, y diseñar una estructura de pavimento, o bien, una estrategia de intervención con base en estudios básicos atinentes.

Por lo cual, mediante el desarrollo de esta guía se logrará que las municipalidades puedan mejorar los diseños estructurales de pavimentos de una forma válida, rápida y ajustada a sus necesidades, logrando así la aprobación de sus proyectos por parte del BID.

Dada la importancia y la influencia que presentan el factor camión en el diseño de los pavimentos, se realiza un análisis de los valores utilizados actualmente en el diseño. Donde por medio de los datos obtenidos de diferentes estaciones de pesaje, se realiza el cálculo del factor camión representativo para cada vehículo,

logrando realizar una comparación con los factores que utiliza el MOPT en el diseño.

Como objetivo principal será la elaboración de una guía y herramienta computacional para el diseño de pavimentos, de manera que se logra un beneficio para las instituciones respectivas.

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto es debido y gracias a Dios por todas las bendiciones dadas, por iluminar mi camino y darme fuerzas para seguir adelante.

Además, mi familia por prestar especial ayuda y apoyo incondicional, especialmente, a mis padres Ruperto Jiménez Leiva y Norma Ceciliano Ceciliano.

Agradezco al profesor guía Ing. Sergio Fernández por la ayuda brindada y el tiempo prestado.

Al Ministerio de Obras Públicas y Transportes por la idea del proyecto y al Ing. Juan Carlos Elizondo, quien es parte de este.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería en Construcción por la formación académica.

Resumen ejecutivo

El diseño de pavimentos flexibles constituye uno de los principales componentes de una vía y su importancia es fundamental para la circulación de personas. Es por ello que siempre se debe asegurar estructuras que satisfagan las necesidades de las instituciones y de los usuarios presentando condiciones seguras y económicas para la circulación.

Por lo cual, el desarrollo de este proyecto, que consiste en la elaboración de una guía y herramienta computacional para el diseño de pavimentos, pretende ser de ayuda para las unidades técnicas de gestión vial municipal en el diseño de las estructuras de pavimentos flexibles; en donde con la ayuda de la guía para el diseño, se pueda seguir un procedimiento y asignar los valores a las diferentes variables dependiendo de las necesidades. Además, busca poner a disposición una herramienta de cálculo que contribuya a agilizar el proceso de diseño en donde se obtenga de manera oportuna las respuestas.

Con esto, se logrará que las municipalidades puedan generar los diseños estructurales de pavimentos de una forma válida, rápida y ajustada a sus necesidades, logrando así la aprobación de sus proyectos por parte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Donde podrán obtener los préstamos necesarios y ejecutar las obras en cada municipio y así mejorar su infraestructura, con lo cual se obtendrá diferentes beneficios para sus habitantes.

Los objetivos de este proyecto consisten en realizar una guía para el diseño, así como una herramienta de cálculo para su ejecución. Además de elaborar un manual para dicha hoja de cálculo para su buen manejo.

Asimismo, se realiza un estudio sobre el factor camión utilizado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes para el cálculo de los ejes

equivalentes de carga. Con esto, se logra conocer si los factores utilizados se encuentran sub o sobre estimados y con ello, se determina si el valor de los ejes equivalentes de carga representa la realidad de acuerdo con los datos de las estaciones de pesaje.

Para el desarrollo del trabajo, se utilizó la guía de diseño empírica de la AASHTO 93, así como otras fuentes bibliográficas para confeccionar la guía en donde se exponen las variables de diseño como son el periodo de diseño, los índices de servicio, los valores de confiabilidad, los coeficientes estructurales y de drenaje, entre otros parámetros.

Para que el diseño se realice de una forma más rápida y no depender de los nomogramas para la obtención del módulo resiliente (cuando se tenga solo datos de CBR) o de los coeficientes estructurales, se realizó una tabulación de los valores de tales nomogramas, los cuales se utilizaron para generar las curvas de mejor ajuste y encontrar sus ecuaciones por medio del programa Matlab.

En el desarrollo de la herramienta de cálculo, se utilizó el programa Visual Basic para aplicaciones por medio de Excel en donde, por medio de diferentes formularios, se podrá realizar los cálculos necesarios.

En el cálculo del factor camión, se utilizó los datos de los pesos de los vehículos tomados en cinco diferentes estaciones de pesaje ubicadas en diferentes zonas del país.

Para lo cual, se calculó el factor camión para diferentes números estructurales e índices de servicio. A partir de estos valores, se realizó una comparación con los factores suministrados por el MOPT.

También, con los datos de las estaciones de pesaje, se tabuló la cantidad de vehículos con sobrepeso, según los pesos máximos permisibles

publicados en el diario oficial La Gaceta el 19 de enero de 2005.

Además, se comparó el daño que producen los vehículos en circulación con el daño producido a partir del peso máximo permisible.

La guía presenta los parámetros necesarios para el diseño de pavimentos nuevos, y los diferentes métodos para realizar una rehabilitación, ya sea que se necesite una sobre capa o recarpeteo.

En cuanto a la herramienta de cálculo, está presenta diferentes funciones como son el cálculo de los ejes equivalentes de carga por medio de la totalidad de los ejes (simples, dobles o trídem) o por la cantidad de vehículos (C2, C3, C4, C2-R2, T3-S2). Asimismo, la determinación de los espesores de las capas que componen el pavimento, así como el espesor de la capa necesaria para la rehabilitación. Por último, se podrá generar un informe que es de utilidad para respaldar los datos ingresados y las respuestas obtenidas, y para realizar comparaciones entre los diferentes diseños que se generen.

Entre las conclusiones obtenidas, se puede mencionar que con ayuda de la guía, ya sea para el diseño de un pavimento nuevo así como para la rehabilitación de una carretera, se podrá obtener los parámetros necesarios apegados a las necesidades y al tipo de proyecto de cada institución. Además con la herramienta electrónica, se realizará los cálculos de una manera acertada y rápida.

En cuanto a los datos referentes a las estaciones de pesaje, se observó que el mayor porcentaje de vehículos con sobrepeso es del 5,13% para la estación 3 y el menor porcentaje corresponde a la estación 5 con un valor del 1,91%.

Por último, se concluye que es importante considerar todos los vehículos de circulación, ya que estos siempre causarán, en mayor o menor medida, un deterioro sobre el pavimento; el cual está condicionado a la magnitud del factor camión y de la cantidad de vehículos de circulación.

Introducción

Para el desarrollo en diferentes campos de un país, zona o región, las condiciones de las carreteras son un aspecto de gran relevancia. Por ello, es de gran importancia poseer pavimentos que logren que la circulación para las personas y mercancías se presente de forma segura, rápida, ágil y cómoda, y así lograr la satisfacción de los usuarios.

Todo esto se puede lograr mediante un diseño apropiado apegado a las características propias de la zona, considerando todas las variables que afecten la vida útil de la estructura de pavimento.

Para el diseño exitoso de una estructura de pavimento, se debe estudiar cuidadosamente el tránsito que circulará por dicha vía. Convirtiendo el peso y configuración del eje en circulación a un tipo de eje equivalente de carga. Donde se pueda caracterizar a los tipos de vehículos por medio de un factor camión o considerando individualmente cada pasada de eje.

También, se debe considerar o definir el periodo de diseño de la vía, así como el índice de servicio. Igualmente, considerar la zona donde se ubicará, ya que las condiciones climatológicas son determinantes en el comportamiento adecuado del pavimento. Además de considerar la existencia y calidad de los drenajes y la permanencia del agua sobre el pavimento ya que esto influye directamente en los espesores del pavimento. Todos estos parámetros de diseño están basados en la guía de diseño AASHTO 93.

Este proyecto se enfocará en confeccionar una guía donde se siga una serie de pasos para obtener, según las necesidades de cada diseñador, los espesores que satisfagan las demandas impuestas. Además de contar con una metodología que ayude a realizar una adecuada rehabilitación del pavimento ya sea por medio de sobre-capas o recarpeteo.

Igualmente se confecciona una herramienta electrónica en la cual se puede realizar el cálculo de los ejes equivalentes de carga para el carril de diseño, el cálculo de los espesores para un pavimento nuevo así como el espesor de la carpeta ya sea para una sobre-capa o recarpeteo, y la determinación de la cantidad de ejes para que se dé la falla por fatiga o por deformación permanente del pavimento utilizando diferentes metodologías.

Además se realiza un estudio partir de cinco estaciones de pesaje ubicadas en diferentes zonas del país. Aplicando las ecuaciones necesarias se obtiene el factor camión representativo para cada tipo de vehículo. A partir de estos valores se realiza una comparación con los utilizados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y por los dictaminados por la directriz DVOP-5170-07, llegando a observarse ciertas variaciones entre los valores comparados.

Objetivo general

- Objetivo general: Elaborar una guía y herramienta para el diseño estructural de pavimentos con el fin de fortalecer las actividades de planificación, formulación y diseño propias de las unidades técnicas de gestión vial municipal.

Objetivos específicos

- Investigar sobre la aplicación actual de la metodología de diseño de pavimentos flexibles con la guía AASHTO 93 en Costa Rica para identificar mejoras potenciales que puedan ser derivadas del proyecto.
- Identificar los factores que intervienen en el diseño de nuevas estructuras de

- pavimentos flexibles y en el diseño de estrategias de intervención, tales como sobre-capas y recarpeteos.
- Establecer un mecanismo para el cálculo del factor camión para las configuraciones de ejes y magnitudes de cargas apropiadas de Costa Rica, con el fin de predecir de manera más precisa las cargas transmitidas a la estructura de pavimento.
 - Comparar los datos obtenidos de factor camión con los usados actualmente por el Departamento de Geotecnia y Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
 - Comparar los pesos de los vehículos de las estaciones de pesaje con los pesos máximos permisibles publicados en la Gaceta el 19 de enero de 2005 y con esto, establecer en qué medida se respeta o irrespeta la legislación.
 - Confeccionar un manual de procedimientos para la realización del diseño estructural de pavimentos y estrategias de intervención.
 - Elaborar una herramienta de cálculo que determine el factor camión, así como el dimensionamiento del paquete estructural del pavimento que mejor responda a las necesidades de carga y a las condiciones ambientales propias de su ubicación durante su vida de servicio.
 - Comprobar la eficiencia de la herramienta por medio de bases de datos derivadas de diseños previos realizados por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
 - Elaborar un manual de uso para la herramienta electrónica.

Marco teórico

Pavimentos

Los pavimentos son estructuras formadas por diferentes capas con características particulares que las distinguen. Estas diferentes capas que constituyen el pavimento son llamadas carpeta, base y subbase (Fig. 1), apoyadas sobre el terreno natural el cual se denomina subrasante.

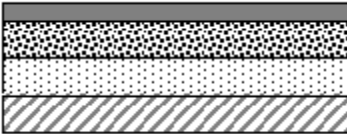


Figura 1. Estructura de pavimento

Una estructura de pavimento ayuda a transmitir los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito al suelo existente de manera que no se sobrepase su capacidad soportante.

Los pavimentos se clasifican en tres clases:

- Pavimentos rígidos: Presentan como característica principal una capa de ruedo formada por una losa de concreto hidráulico; una base, ya sea granular o estabilizada con cemento; y opcionalmente una subbase.
- Pavimentos semirígidos: Para que un pavimento esté dentro de esta categoría debe poseer una superficie de ruedo de concreto asfáltico y una base estabilizada con cemento, además de la subbase correspondiente.
- Pavimentos flexibles: Esta clase de estructuras están constituidas por una capa de ruedo de concreto asfáltico, una base granular o una base asfáltica y una capa de subbase.

Pavimentos flexibles

Como se mencionó, son estructuras formadas por diferentes capas: carpeta, base y subbase, donde las características de los materiales influirán directamente en su comportamiento y durante su vida útil.

Este tipo de pavimento presenta diversas características y facilidades en comparación con los pavimentos rígidos que hace que se dé la escogencia para la construcción. Las cuales se mencionan a continuación:

- Presentan mayor facilidad de construcción.
- Inversión inicial menor.
- Factibles para tránsitos pequeños.
- Facilidad para trabajos de mantenimiento y rehabilitación.
- Periodos de diseño relativamente cortos, con ello costos de inversión más bajos.

También se presentan algunos inconvenientes a los cuales se debe prestar importancia.

- Usualmente los espesores de las capas de base y subbase son mayores que los de los pavimentos rígidos.
- Las deflexiones son mayores.
- Se debe realizar un mantenimiento adecuado para impedir el deterioro acelerado, lo cual conlleva a costos considerables.

Caracterización de capas

Capa de ruedo

Consiste de un material llamado concreto asfáltico compuesto por agregado y un ligante asfáltico. Usualmente, la capa asfáltica presenta un módulo de rigidez entre los 300000 psi y 500000 psi.

El agregado utilizado debe cumplir con las siguientes características:

Agregado grueso (material retenido en la malla de 4,75 mm): este consiste en material compuesto de piedra o grava, algunos de los requisitos que debe cumplir son:

- Abrasión 40% máximo
- Caras fracturadas 75% mínimo
- Disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio (5 ciclos) 12% máximo.
- Índice de durabilidad 35% mínimo.

Agregado fino (material que pasa la malla de 4,75 mm): constituido por arenas naturales, arena de piedra o arena de piedra quebrada; los requisitos que debe cumplir son:

- Índice de durabilidad 35 mínimo
- Equivalente de arena 45 mínimo

El ligante asfáltico es una sustancia proveniente del petróleo; que, después de pasar por el proceso de destilación en uno de sus niveles o columnas, es contenido y extraído.

El asfalto es constituido por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio, níquel, hierro y magnesio.¹

En el asfalto, se distinguen dos grupos, los asfaltenos y los máltenos. Los máltenos se dividen en saturados, aromáticos y resinas, y los asfaltenos se encuentran formados por compuestos aromáticos. Estos compuestos son muy importantes, ya que brindan ciertas características a la mezcla como son:

- Los saturados, resistencia al agrietamiento térmico.
- Los aromáticos y asfaltenos, resistencia a la fatiga y a la deformación.
- Las resinas, resistencia al agrietamiento térmico y al daño por humedad.

El ligante asfáltico cumple la función en la mezcla de aglutinar el agregado, dar trabazón e impermeabilizar la mezcla, además de proveer durabilidad.

El concreto asfáltico es clasificado por medio de pruebas de penetración y viscosidad.

La mezcla asfáltica se puede dar a través de dos procesos, mezcla en caliente y en frío. En las dos mezclas, se utiliza ligante asfáltico, con la diferencia que es llamado

¹http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/

cemento asfáltico y emulsión asfáltica para la mezcla en caliente y en frío respectivamente. Usualmente, las mezclas en caliente se utilizan para la construcción de pavimentos nuevos y las mezclas en frío para el mantenimiento de las vías, por ejemplo para el bacheo.

El cemento asfáltico es un 100% de ligante, su consistencia es semisólida a temperatura ambiente y para realizar la mezcla con el agregado se debe calentar a una cierta temperatura hasta que alcance el estado líquido. Este tipo de cemento es de fraguado lento y por esto es que se tiene la posibilidad de trasladar la mezcla de un lugar a otro en un cierto periodo de tiempo sin que se solidifique.

La emulsión asfáltica está compuesta entre un 60-70% de ligante, 30-40% de agua y 2-4% de diluyente. El cemento asfáltico y el agua se mezclan por medio de un emulsificante, el cual tiene como función unirlos y después de un periodo perder su acción; entonces, el agua es evaporada o drenada y queda únicamente el asfalto.

En el diseño de la mezcla, es muy importante mantener un control estricto sobre las características del agregado, de la cantidad de aire y del asfalto, ya que esto influirá en la vida útil del pavimento. Donde el volumen total de la mezcla, se distribuye entre un 80-85% de agregado, 8-12 % de asfalto y 3-9% de aire.²

En cuanto al agregado, se debe realizar una adecuada caracterización mediante ensayos de laboratorio como son abrasión, cantidad de caras fracturadas, sanidad e índice de durabilidad, entre otras, para así conocer la calidad del agregado. Además, se deberá conocer la cantidad de poros del agregado, su densidad y gravedad entre otras variables para realizar un adecuado diseño de la mezcla.

El contenido de aire en la mezcla se encontrará en un intervalo del 3% al 9%. Es importante hacer cumplir y no sobrepasar este rango, ya que el contenido de aire se encuentra ligado con la resistencia a la deformación plástica y a la deformación por flujo plástico. En donde a un menor contenido de aire, mayor resistencia a la deformación plástica por compresibilidad; y a un mayor contenido de aire, se tiene una mayor resistencia a la deformación por flujo plástico. Es por tal motivo que se debe realizar una adecuada nivelación de los porcentajes, además que a un

² Curso Construcción de Pavimentos, 2013

mayor porcentaje de aire se presentará mayores problemas en cuanto al agrietamiento, agravándose en zona lluviosas.

El contenido de asfalto es también un factor de gran importancia en donde su cantidad dependerá de la cantidad de tránsito y su peso, y de la cantidad de lluvia en el lugar de uso. Esto porque a una mayor cantidad de asfalto se tendrá mayor durabilidad pero con el inconveniente de que la resistencia a la deformación disminuye.

Base

Capa sobre la cual se encuentra apoyada la capa de concreto asfáltico, constituida ya sea por agregado granular (piedras o gravas trituradas), agregado asfáltico, o de una mezcla asfáltica compuesta por agregado más grueso y menos contenido de asfalto.

En la capa de base granular, los espesores típicos rondan entre los 10 cm y 40 cm y un módulo de resiliente entre 18000 psi y 35000 psi.

Para la base asfáltica, su módulo de rigidez se encuentra entre los 150000 psi a los 350000 psi; y para la mezcla asfáltica utilizada como base, su módulo se encuentra entre 200000 psi a 400000 psi.

Cabe mencionar que para una base estabilizada con cemento el módulo resiliente es de 300000 psi a 1000000 psi.

El material utilizado como base debe cumplir con los siguientes requisitos:

- CBR mínimo = 80
- índice de plasticidad entre 4 y 9
- Límite líquido máximo 25
- Compactación 95% proctor modificado
- Abrasión 50% máximo
- Caras fracturadas 50% mínimo
- Índice de durabilidad 35 mínimo

Subbase

Capa que conforma el pavimento flexible, constituida por lastre, piedras, gravas o tobas graduadas adecuadamente. Su módulo resiliente característico es de 8 000 psi a 20 000 psi y con espesores usuales de 15 cm a 100 cm.

La subbase debe cumplir con los siguientes requisitos:

- CBR mínimo = 30
- Índice de plasticidad entre 4 y 10.
- Límite líquido máximo 25.
- Compactación 95 % del proctor modificado.
- Abrasión 50% máximo,
- Caras fracturas 50% mínimo.
- Índice de durabilidad 35% mínimo.

Para la base y subbases, los materiales deben presentar una buena calidad; ser durables; duros y libres de materia orgánica, así como de cantidades de arcilla.

Para la compactación del material, no se debe sobrepasar los 150mm de espesor, si el espesor de la capa es mayor se debe realizar por etapas.

Los materiales de subbase y base deben ser sometidos a diferentes pruebas para valorar sus características y poder compararlas con los requisitos antes mencionados, estas pruebas deben estar basadas en las diferentes normas que se mencionan:

- Límite líquido: AASHTO T 89
- Abrasión: AASHTO T 96
- Caras fracturadas: ASTM D 5821
- Índice de durabilidad: AASHTO T 210

Subrasante

Suelo existente en el lugar del proyecto, el cual soporta la estructura de pavimento y presenta la sección transversal de la vía que se va a construir. Es considerada una capa con espesor infinito, su módulo de rigidez depende de la época del año en que se esté, es mayor en la época seca o verano y disminuye en la estación lluviosa.

La subrasante es un elemento de gran importancia que afecta directamente los espesores del pavimento debido a sus características, por lo cual es de suma importancia controlar la calidad del terreno presente y, si es necesario se debe realizar un remplazo de materiales y recurrir a bancos de préstamo o realizar algún tipo de estabilización o mejoramiento del terreno.

Mejoramiento de materiales

Como se mencionó cuando las subrasantes o cualquier otro material que constituya el pavimento, como las bases granulares, presenten condiciones pobres, baja resistencia y estabilidad se hace necesario realizar algún tipo de estabilización o mejoramiento según sea el caso.

La estabilización o mejoramiento consiste en la incorporación y mezcla de cemento o cal al suelo, con la diferencia en los porcentajes utilizados.

Para el mejoramiento, se utilizará menos del 3% de cal o cemento y para la estabilización más del 6%. También, se puede hacer uso de cementos asfálticos donde el porcentaje a utilizar se encuentra entre un 4% al 8% del peso del material. Además, se puede utilizar agentes químicos u orgánicos como resinas sintéticas.³

Cabe mencionar que la mezcla de cemento es usualmente utilizada con suelos granulares y la cal con suelos arcillosos. Asimismo, el mejoramiento es utilizado en subrasantes y subbases y la estabilización en bases. Se debe siempre realizar pruebas de laboratorio para conocer la cantidad indicada de cemento o cal que se empleará para mejorar las características del material; además de mantener el cuidado de controlar la cantidad de cemento, ya que una cantidad excesiva puede provocar agrietamiento por el aumento de rigidez.

Los beneficios que se obtienen con la estabilización y mejoramiento son variados, entre los que se pueden mencionar, la disminución del índice plástico, aumento de la rigidez, aumento de la estabilidad, control del polvo, y control de la humedad.

Falla de los pavimentos flexibles

Las fallas en los pavimentos se pueden clasificar en dos tipos: funcional y estructural.

Falla funcional

Se presenta o se dice que existe cuando la circulación ya no es segura ni cómoda para los

³ Manual Centroamericano para diseño de pavimentos, 2002

usuarios. Además, se reportan molestias por parte de las personas en el momento de transitar por dicha vía. La circulación es muy costosa en términos monetarios y se presenta grandes retrasos para los conductores.

Falla estructural

Cuando se sobrepasan los esfuerzos permisibles del terreno sobre el cual se apoya el pavimento, se dice que se presenta la falla estructural, con la evidencia de grandes deterioros del pavimento.

Deterioro del pavimento

Por la acción de diferentes factores como las cargas impuestas y la influencia del clima sobre el pavimento, se da el comienzo significativo del deterioro de la estructura, esto se evidencia sobre la superficie de ruedo.

Estos deterioros se pueden clasificar en agrietamiento por fatiga y deformación permanente.

Fatiga

El agrietamiento por fatiga se presenta cuando se sobrepasa el esfuerzo horizontal en tensión de la última fibra del concreto asfáltico.

Por medio de diferentes fórmulas, se puede determinar la cantidad de ejes, equivalente de carga que debe transitar para que se dé la falla por fatiga. Existen diferentes metodologías para su cálculo, aunque lo importante es poder calibrarlas a la zona en estudio. A continuación, se presenta las ecuaciones reportadas en la literatura.

Finn 45% de agrietamiento:

$$\log N_f = 16,086 - 3,291 * \log \left(\frac{\epsilon_t}{10^{-6}} \right) - 0,854 \\ * \log \left(\frac{MR1}{1000} \right)$$

Finn 10% de agrietamiento:

$$\log N_f = 15,947 - 3,291 * \log \left(\frac{\epsilon_t}{10^{-6}} \right) - 0,854 \\ * \log \left(\frac{MR1}{1000} \right)$$

Instituto del asfalto 20% de agrietamiento:

$$N_f = 0,076 * (\epsilon_t)^{-3,291} * (MR1)^{-0,854}$$

Shell

$$N_f = 0,0685 * (\epsilon_t)^{-5,671} * (MR1)^{-2,363}$$

En donde:

N_f : Cantidad de ejes para la falla

ϵ_t : Deformación unitaria (mm/mm)

$MR1$: Módulo de rigidez del concreto asfáltico (psi)

Deformación permanente

La deformación permanente se da cuando se sobrepasa el esfuerzo vertical en compresión de la subrasante.

Al igual que para el agrietamiento por fatiga, se puede realizar el cálculo para determinar la cantidad de repeticiones para que se presente la deformación permanente por medio de la siguiente ecuación.

Instituto del asfalto:

$$N_f = 1,365 * 10^{-6} * (\epsilon_{vs})^{-4,477}$$

A partir de las fallas anteriores así como por la influencia del clima, método constructivo erróneo y otros factores, se puede clasificar o identificar diferentes deterioros.

Deterioros de la superficie

Desprendimiento del agregado: se evidencia con la exposición de las capas posteriores. Debido a la carencia de asfalto que recubre el agregado, o por contaminación de este, utilizado para la carpeta asfáltica; además este deterioro se puede presentar por la presencia de la lluvia.

Baches superficiales: debido a desprendimientos de la capa asfáltica o de las sobrecapas. Se presenta por la falta o carencia del ligante asfáltico.

Baches profundos: evidencia de las capas siguientes, causado por insuficiencia y mala calidad de drenajes.

Exudación del asfalto: presencia del asfalto en la superficie con carencia de agregado. Este problema se da cuando existe un exceso de ligante o el asfalto utilizado es muy blando.

Desgaste del agregado: se presenta el agregado con caras planas en la superficie, debido al uso de agregados de mala calidad que son fácilmente desgastables.

Agregado expuesto: Se evidencia separación del agregado y el asfalto, debido a la segregación y la utilización errónea de la granulometría del material.

Deterioros en la estructura

Formación de roderas: Se presenta por falta de capacidad estructural, además de presentarse problemas de mala compactación y problemas con la mezcla asfáltica como utilización de ligantes blandos, exceso de asfalto y agregados redondeados.

Ondulaciones: formación de crestas principalmente en las zonas de frenado de los vehículos pesados. Se presenta debido a una mala dosificación de la mezcla, excesiva cantidad de agregado, agregados redondeados y falta de adherencia entre capas.

Agrietamientos

Agrietamiento longitudinal: paralelo al eje de la carretera, son grietas mayores a 3 mm, causadas por fatiga. Se presenta cuando la capa asfáltica es muy rígida y por malos drenajes.

Agrietamiento transversal: se presenta perpendicular al eje de la vía. Se da debido a los cambios de temperatura y al reflejo de las grietas de la base estabilizada con cemento.

Piel de cocodrilo: grietas longitudinales y transversales con una separación menor a los 15 cm.

Diseño de pavimentos flexibles

En el diseño de pavimentos, interviene cuatro factores; los cuales deben ser considerados por su importancia. Estos factores son: tráfico y carga, medio ambiente, los materiales utilizados y los criterios de falla.

Tráfico y carga

Se debe considerar la configuración de los ejes (simples, dobles y triples), el número de repeticiones, el área de contacto de la llanta con el pavimento, y la velocidad con la cual transitan los vehículos.

Medio ambiente

La temperatura y la precipitación son factores que se deben considerar para el diseño de los pavimentos, ya que estos inciden sobre el módulo resiliente de los materiales.

La temperatura incide sobre la carpeta asfáltica, donde a temperaturas elevadas el módulo resiliente disminuye y con ello ocasiona la formación de roderas al paso de vehículos pesados a bajas velocidades; y a temperaturas muy bajas o congelamiento, se puede dar el agrietamiento por el endurecimiento del asfalto.

En cuanto a la precipitación se afecta el módulo resiliente de la subrasante, dado que a mayor presencia de humedad se ocasiona un daño mayor sobre el pavimento al transitar los vehículos, debido a la pérdida de finos y con ello la pérdida de capacidad de la estructura. Además el agua afecta la resistencia de los materiales granulares y, se presenta expansión y contracción del suelo.

Materiales

Se debe conocer a fondo las características de los materiales, esto porque es una medida para el diseño del pavimento e influye directamente en el comportamiento estructural.

Criterios de falla

La fisuración por fatiga, las deflexiones y el agrietamiento por bajas temperaturas son criterios de falla, los cuales se pueden controlar por medio de los parámetros de diseño estableciendo mínimos, además de crear un buen plan de mantenimiento y rehabilitación para evitar el deterioro acelerado y grandes inversiones.

Metodología de diseño empírica AASHTO 93

Existen diversos métodos para el diseño de pavimentos como son AASHTO 62, AASHTO 72, AASHTO 93 y el método del Instituto del Asfalto entre otros, las cuales tienen por objetivo obtener la mejor configuración de espesores del pavimento de acuerdo con las necesidades que se presentan.

En cuanto a la metodología empírica AASHTO 93, es el resultado de diversas mejoras e incorporación de variables a los métodos de diseño anteriores. Sus inicios se remontan en Ottawa, Illinois en los años de 1958-1960 donde se construyeron diversas secciones de pavimentos flexibles y rígidos, los cuales fueron expuestos a cargas de tráfico para conocer y determinar el comportamiento y desarrollar expresiones para el diseño de las estructuras.

La metodología AASHTO 93 se basa en un método empírico lo cual se refiere a que sus soluciones se han encontrado mediante pruebas de campo, además de utilizar la experiencia de personas especialistas en el tema.

Para obtener una estructura de pavimento flexible óptima se debe seguir, revisar y establecer ciertos criterios o variables, con el fin de llegar a obtener los espesores de la subbase, base y capa de ruedo. A continuación se definen tales parámetros.

Cálculo de ejes equivalentes

Se puede realizar de dos diferentes maneras, utilizando el factor camión o por tipo de ejes:

Utilizando factor camión

Se debe obtener la TPD (tránsito promedio diario) con la debida diferenciación del tipo de vehículos (ver apéndice 1) que circule y con ello, asignar el factor camión.

Por tipo de eje

Se debe contabilizar con dispositivos móviles o fijos la cantidad de ejes que circulen por dicha vía, separándolos por tipo de eje (simple, tándem o triple).

Al contar con los datos, ya sea por factor camión o tipo de eje, se debe definir el periodo de diseño, y el factor crecimiento de la flota vehicular; y con ello, poder calcular la cantidad de ejes equivalentes de carga para el periodo de diseño.

Para el cálculo del factor equivalente de carga (LEF), se debe conocer la configuración de los ejes y su peso, PSI final y suponer un número estructural.

En la sección de anexos (cuadros AN1-AN9), se puede observar una serie de cuadros con los factores de carga para diferentes números estructurales e índices de servicio.

Factor camión

El factor camión es el valor numérico que caracteriza a los vehículos según el daño que ocasionen sus ejes sobre el pavimento. Esto se determina por medio de la sumatoria de los factores equivalentes de carga (LEF) de cada eje.

Este factor equivalente de carga consiste en la conversión de cualquier tipo de eje y peso a un eje equivalente estándar de 8200 kg (18000 lb).

La configuración del eje estándar es un eje simple dual como el que se observa en la siguiente figura.

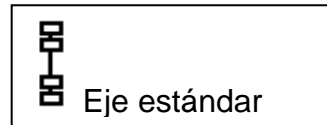


Figura 2. Configuración de eje estándar

El LEF lo que pretende medir es cuántas veces se requiere que un eje de 8200 kg debe circular por cierto punto para que cause el mismo daño y el PSI se vea reducido en la misma magnitud, que un eje de cualquier configuración y peso.

A partir de la conversión de los ejes de cada vehículo a ejes equivalentes, y de la obtención del factor camión, se podrá totalizar los vehículos que circulen por una vía con diferentes configuraciones y pesos, y con ello, determinar los EEQ (ejes equivalentes de carga) para el diseño respectivo del pavimento.

Para el diseño estructural de pavimentos, es de gran importancia conocer este factor o realizar una adecuada determinación de este, ya que es un elemento que influirá de manera directa en los espesores de las capas del pavimento.

Se debe tener presente que el cálculo del factor camión debe ser acorde al tránsito de cada carretera (tipo de eje y peso), ya que un valor adecuado y apegado a la realidad de la vía hará que el diseño y el comportamiento de la estructura sea el apropiado. Sin embargo, si la obtención de dicho factor es menor al que en realidad se presenta se tendrá estructuras que se deteriorarán más rápidamente; o por el contrario, si son factores mayores, la estructura estará sobre diseñada obteniendo al final espesores mayores en las capas del pavimento con el inconveniente que se encarece el proyecto.

El factor equivalente de carga LEF depende de:

- Tipo de eje (Simple, tándem, trídem).
- Peso de eje.
- Tipo de estructura, sea pavimento flexible o rígido.
- Número estructural requerido.
- Índice de servicio final de la estructura (psi final).

Para ejemplificar a lo que se refiere el FC, se presenta la siguiente figura.

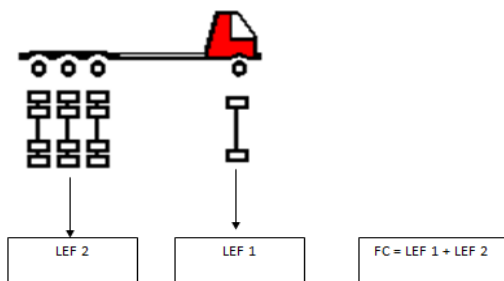


Figura 3. Representación del factor camión.

Tipos de ejes

Ejes simples: es un eje compuesto por una o dos llantas en cada uno de sus extremos.

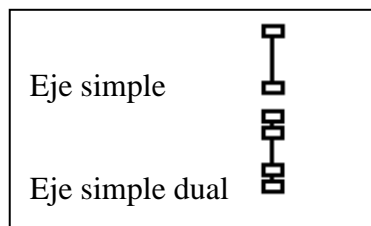


Figura 4. Configuración de eje simple.

Eje doble: También llamado eje tándem. El eje doble puede presentar diferentes composiciones de llantas como:

- Eje doble de llanta simple: Compuesto por dos ejes simples.
- Eje doble de llantas mixtas: Compuesto por un eje simple y un eje dual
- Eje doble de llantas duales: Compuesto por dos ejes duales.

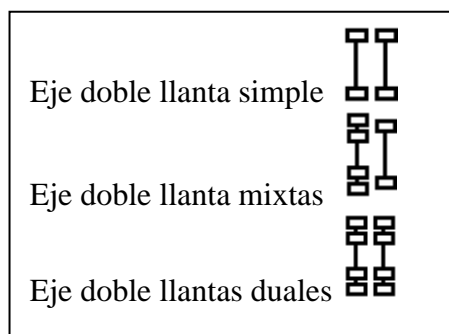


Figura 5. Configuración de eje tándem.

Eje trídem: Este es un eje triple, el cual presenta también diferentes configuraciones.

- Eje triple de llanta simple: Presenta tres ejes simples.
- Eje triple de llantas mixtas: Contiene un eje simple y dos ejes duales.
- Eje triple de llantas duales: Compuesto por tres ejes duales.

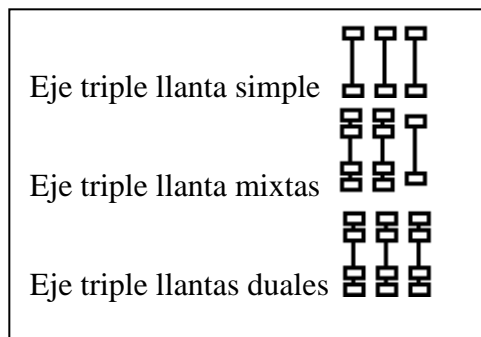


Figura 6. Configuración de eje trídem.

Es importante tener en cuenta que para poder considerar un eje como tándem o trídem, la separación entre los ejes simples debe ser mayor a 1,20 m y menor a 2,40 m de sus centros; si esto no se cumple, se deberá considerar por separado cada uno de los ejes.

Número estructural

Representa la calidad estructural de un pavimento, es decir, la resistencia a la deformación ante la carga.⁴

Confiability (R)

Su valor se designa de acuerdo con la cantidad de tránsito y la importancia de la vía. Mide o evalúa el grado de seguridad al que llegará la estructura al fin del periodo de diseño, sin que se presenten grandes deterioros; es decir, con un índice de servicio final aceptable o el establecido en el diseño.

El valor (Z_r) corresponde al valor desviador en una curva de distribución normal, función de la

⁴ Curso Construcción de Pavimentos, 2013

confiabilidad del diseño (R) o grado de confianza en que las cargas de diseño no serán superadas por las cargas reales aplicadas sobre el pavimento.⁵

Desviación estándar

Toma en cuenta las posibles variaciones en las estimaciones de tránsito (carga y volúmenes) y el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida de servicio.

Índice de servicio

El índice de servicio (PSI) se basa en la condición del pavimento, donde se mide la calidad de la estructura de pavimento y el confort de los conductores. Para ello, se considera la rugosidad de la capa de ruedo, la existencia de grietas, que los baches sean abiertos o cerrados y la deformación plástica superficial o rodera.

Existen ciertos criterios dados por la AASHTO 93 que asigna el valor del PSI de acuerdo con la insatisfacción de las personas.

- PSI=3 cuando halla un 12% de persona insatisfechas.
- PSI=2,5 para un 55% de personas insatisfechas.
- PSI=2 para un 85% de personas insatisfechas.

El PSI se representa en una escala de cero a cinco, el cinco representa teóricamente un pavimento en excelentes condiciones acabado de construir sin presencia de grietas, baches o roderas; y el valor cero, un pavimento en muy malas condiciones que sería intransitable.

Para un pavimento flexible, se asignan valores de PSI dependiendo del año de vida de la estructura y de su importancia.

- PSI inicial: 4,2 para pavimentos flexibles nuevos, año cero.
- PSI final: 3 para vías de alta importancia.
- PSI final: 2 para vías menos importantes.
- PSI: 1,5 vías que necesitan ser reconstruidas, ya que su costo de rehabilitación es muy elevado por el alto

⁵

Manual Centroamericano para diseño de pavimentos, 2002

grado de deterioro y presentan una falla estructural.

Cabe mencionar que cuando se presente el PSI final establecido, se debería dar, por parte de la institución encargada, un proceso de rehabilitación.

La siguiente figura presenta el comportamiento de la curva del PSI en un pavimento flexible.

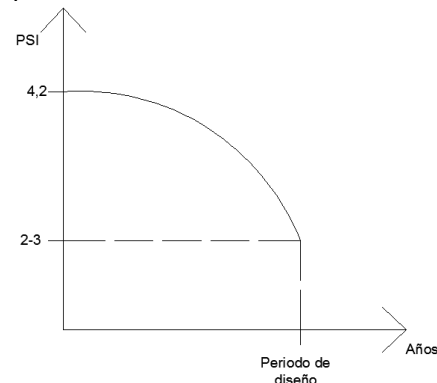


Figura 7. Curva de PSI

Se puede observar en la figura que a mayor cantidad de años transcurridos se presenta la disminución del PSI, por la causa de diferentes factores que causan el deterioro.

También existe por medio de la medición del IRI la posibilidad de determinar el PSI, esto por medio de la siguiente ecuación.

$$PSI = 5 * e^{(-0.0041 * IRI)}$$

En donde:

PSI: Índice de servicio

IRI: Índice Internacional de Rugosidad

e: 2,71828183

El valor de IRI mide las desviaciones presentes o irregularidades en un pavimento en una cierta distancia. Su valor se expresa en *pulg/milla* y es la suma de todas las desviaciones por longitud. Con este valor, se puede determinar la comodidad del usuario.

Índice de soporte de California (CBR)

El ensayo CBR consiste en comparar la resistencia del material en estudio y la

penetración con una muestra de material triturado. Usualmente, el CBR utilizado es el resultante a la penetración de 0.1” aunque se debe realizar el ensayo con otras penetraciones y de ellos escoger el valor mínimo.

Es importante mencionar que el CBR se puede determinar mediante la clasificación del tipo de suelo, por medio de la granulometría y los límites de Atterberg; a partir de la clasificación, encontrar un rango de CBR y con ello, estimar el MR, mediante gráficas y tablas de la AASHTO (ver anexo figura AN2).

Con los valores obtenidos de CBR, se puede evidenciar la calidad de material con que se cuenta; para tal caso, se puede hacer uso de la siguiente tabla.

Cuadro 1. Caracterización del suelo según CBR		
CBR	Clasificación	Usos
0-3	Muy pobre	Sub rasante
3-7	Pobre a regular	Sub rasante
7-20	Regular	Sub base
20-50	Bueno	Base, Sub base
>50	Excelente	Base

Fuente: <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm>

Módulo resiliente

Se define como la razón de esfuerzo aplicado entre la deformación unitaria recuperable.⁶

$$M_R = \frac{\sigma}{\varepsilon_{elastica}}$$

En Donde:

σ : Esfuerzo desviador

$\varepsilon_{elastica}$: Deformación elástica

El módulo resiliente depende del tipo de terreno, granulometría, contenido de humedad, y forma de construcción como es la compactación. Es por este motivo que se debe realizar diferentes tipos de ensayos para poder determinarlo.⁷

Para la determinación del MR, se hace uso de diferentes ensayos de laboratorio como el ensayo en la máquina triaxial. También es posible realizar ensayos de otro tipo como CBR o

⁶ Curso Construcción de Pavimentos, 2013

⁷ Manual Centroamericano para diseño de pavimentos, 2002

caracterización de los materiales y; por medio de correlaciones, determinar su valor.

El módulo resiliente de la subrasante varía según la estación del año; en la estación seca hay una mayor resistencia a la deformación plástica, al contrario de la estación lluviosa cuando disminuye su resistencia.

Debido a esto, el tránsito causará un mayor daño en la época lluviosa que en la época seca. Por ende, se debe promediar el daño causado y así determinar el módulo resiliente promediado, esto realizándose por medio del gráfico de la AASHTO 93 (ver anexo, figura AN1), o por la siguiente ecuación.

$$u_f = 1,18 * 10^8 * [MR_{SR}]^{-2,32}$$

En donde

u_f : Daño Causado

MR_{SR} : Módulo resiliente de la subrasante para un periodo determinado (PSI).

El módulo resiliente para el concreto asfáltico depende de la temperatura del ensayo, así como de la frecuencia de la carga; por lo cual, es importante que se especifiquen las condiciones en que se realice el ensayo.

El MR se puede determinar mediante el ensayo de tensión diametral con carga harvesiana. Además con el uso de diferentes monogramas desarrollados por la Shell, el cual consiste en el cálculo de la rigidez del ligante y en determinar el volumen efectivo del asfalto (porcentaje de ligante efectivo) y el volumen bruto del agregado (agregado y ligante absorbido). Por medio de las figuras respectivas, es posible visualizar el módulo resiliente de la carpeta asfáltica.

Coficiente estructural

Se encuentra en función de la resistencia y rigidez del material. Se refiere a la calidad estructural de un espesor unitario de cierto tipo de material. Se valora la capacidad de preservar la resistencia estructural conforme el pavimento es cargado.⁸

El coeficiente estructural es característico de cada tipo de material y se

⁸ Curso Construcción de Pavimentos, 2013

determina por medio de monogramas o correlaciones, a partir del CBR.

Drenajes

Los drenajes son estructuras que ayudan a evacuar el agua presente en la estructura del pavimento, alguno de estos son:

- Drenaje superficial
- Subdrenajes
- Estructuras de drenaje

La presencia de agua por tiempos prolongados y la presencia del tránsito ocasionan grandes problemas a la estructura, reduciendo así el tiempo previsto de la vida útil del pavimento.

La infiltración del agua causa algunos problemas como son el desprendimiento del ligante, lo que ocasiona la formación de baches, extracción de finos con la pérdida de soporte, además de afectar el MR de la subrasante.

Para el diseño, se utiliza coeficientes de drenaje que dependen de la cantidad y permanencia del agua en el pavimento y de la calidad de los drenajes. Estos factores afectan directamente el espesor de los pavimentos.

Cabe mencionar que el coeficiente de drenaje para la carpeta asfáltica es de 1 así como para las bases tratadas.

Mantenimiento

El mantenimiento consiste en el planeamiento y realización de diferentes actividades periódicas, así como de trabajos de tratamiento sobre la superficie de rueda.

Es importante realizar por un periodo determinado el mantenimiento de la estructura, usualmente entre un 50% a un 60% del periodo de diseño, esto para evitar el deterioro acelerado de la carpeta asfáltica y así mantener la vida útil del pavimento como se planeó.

En caso contrario de no realizar un mantenimiento adecuado en el periodo previsto, la curva del PSI presentará un declive importante, con lo cual disminuirá la vida útil, y se tendrá que realizar una rehabilitación en un tiempo más temprano y con un costo mucho mayor.

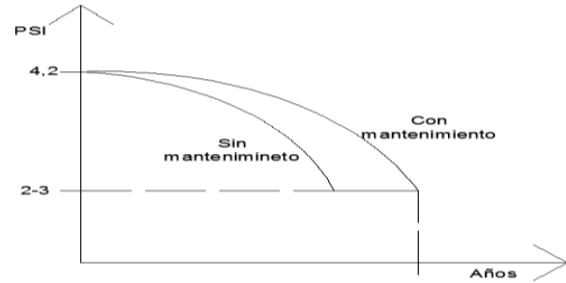


Figura 8. Pavimento con y sin mantenimiento

Con el mantenimiento de la estructura, se evita la pérdida funcional y estructural del pavimento con el tiempo.

Entre las medidas que se mencionan a continuación, se busca evitar deterioros como desprendimientos, fisuras y exudación; igualmente, impermeabilizar la superficie y mejorar su apariencia, todo esto en busca de mejorar la comodidad, la seguridad del usuario, y disminuir los costos de circulación.

Sand seal

Sand seal o sello de arena, el cual consiste en agregar asfalto o emulsión sobre la superficie a tratar y enseguida la colocación de arena. Este tratamiento ayuda sellar la superficie y aumentar la resistencia al deslizamiento.

Sellado de grietas

Para el sellado de grietas, se utiliza usualmente emulsión asfáltica, que evita un deterioro mayor.

Slurry seals

Es la aplicación de mezcla asfáltica con un agregado bien graduado, que ayuda a prolongar la vida de la superficie, además funciona como un sellador de la carpeta.

Fog seal

Consiste en la aplicación de emulsión asfáltica sobre el pavimento.

Chip seal

El *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.

Otras actividades que se deben realizar:

- Limpieza de cunetas
- Limpieza de drenajes
- Chapea de malezas a los alrededores de la vía.
- Demarcación de la vía horizontal y vertical
- Inspección visual de la estructura.
- Bacheo

La planeación adecuada considerando las épocas del año es muy importante, así se evita realizar trabajos después de que ya se ha producido el daño. Por ejemplo, realizar la limpieza de cunetas antes de que se inicie la estación lluviosa, de manera que se previene la permanencia del agua sobre el pavimento por tiempos prolongados. Otro ejemplo es realizar el sellado de grietas y el bacheo superficial sin esperar que se produzcan grandes baches que afecten la estructura o la filtración de agua, el bombeo de finos y la pérdida de estabilidad.

Rehabilitación

Debido a la acción de las cargas del tránsito, las inclemencias del tiempo, deficiencias en los materiales utilizados y errores en los métodos constructivos; y con el transcurso del tiempo, el pavimento comienza a evidenciar diferentes problemas que hacen necesaria la intervención de las autoridades o instituciones respectivas.

Para poder determinar si una estructura de pavimento es candidata a realizar algún tipo de rehabilitación (sobre-capas o re-carpeteo), es necesario conocer la capacidad estructural del pavimento así como las deflexiones presentes.

Para determinar la capacidad estructural de un pavimento, se puede realizar ensayos no destructivos por medio del deflectómetro, donde se mide las deflexiones al someter el pavimento a una carga. También se puede calcular la

capacidad estructural del pavimento por medio de la caracterización de las capas y aplicación de ensayos como el CBR.

Asimismo, se debe conocer el nivel del deterioro del pavimento como las deflexiones determinadas por medio de IRI.

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.

Una sobre-capas se refiere a la utilización de un cierto espesor de concreto asfáltico colocado sobre la superficie de ruedo, debiendo antes haber realizado el bacheo correspondiente y la nivelación necesaria de la superficie.

Para el re-carpeteo es necesario escarificar un cierto espesor de la carpeta eliminando la sección mayormente deteriorada.

Diseño de sobrecapas y del recarpeteo

Este diseño consiste en el cálculo del espesor necesario del concreto asfáltico para satisfacer las demandas futuras y mejorar la condición estructural y funcional del pavimento. Estas capas serán colocadas sobre un pavimento que ha estado un cierto periodo en uso. Para este diseño, se debe conocer las características y propiedades de la estructura de pavimento, así como las de la subrasante.

Se debe establecer las características propias del pavimento, las cuales se mencionan.

Determinar el módulo resiliente de la subrasante, además de calcular el módulo efectivo del pavimento. También se debe conocer el número estructural que se puede determinar a partir de las deflexiones obtenidas con el ensayo del deflectómetro, por medio de la caracterización de las capas, o a través de la vida remanente de la estructura, lo cual consiste en el cálculo de la cantidad de ejes que han transitado así como de la cantidad de ejes para que se presente la falla estructural.

A partir de la obtención de los valores indicados, se debe conocer la cantidad de ejes de diseño, así como los factores de confiabilidad.

Deflectómetro de impacto

Este es un equipo que mediante la aplicación de una carga y la obtención de las deflexiones por medio de sensores se puede determinar la capacidad estructural del pavimento.

La unidad consta de un vehículo automotor y un remolque. El vehículo tiene la función de trasladar el equipo que realiza las mediciones. En el remolque, se encuentra el sistema hidráulico; el cual está destinado a la aplicación de la carga y la obtención de las medidas.

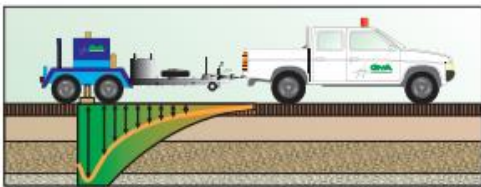


Figura 9. Deflectómetro de impacto.

Fuente:

<http://www.gestionyauscultacion.com/PDF/deflectometro.pdf>

El ensayo de deflectometría consiste en la aplicación de una carga comprendida entre las 4 y 24 ton, que se deja caer desde diferentes alturas, sobre una placa de 30 cm o 45 cm de diámetro. Mediante la colocación de siete sensores, se captan las deflexiones que se producen sobre el pavimento. Los datos obtenidos son almacenados en un ordenador para su eventual uso.

En el transcurso del ensayo, se debe tomar nota de la temperatura, sea del pavimento o del medio ambiente, ya que para los cálculos posteriores es relevante; y si esta es diferente a los 20°C se debe afectar las deflexiones obtenidas en el plato de carga.

La separación de los sensores y la altura a la que se deja caer la masa es variable y dependerá del tipo de proyecto.

En un proyecto lo recomendable es realizar medidas cada 10 o 100 metros dependiendo de las condiciones del pavimento y del área a analizar, además de realizar el ensayo sobre las roderas formadas en la parte interior y exterior del pavimento.⁹

⁹ Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos.

Reconstrucción

Una vez transcurrido el periodo de diseño que se estableció para el proyecto o si no se ha presentado un adecuado mantenimiento y la respectiva rehabilitación, se hace necesario intervenir en la estructura de pavimento con una reconstrucción total, donde se elimina o se recupera los materiales existentes, se realizan los trabajos necesarios sobre la subrasante para un debido comportamiento y se construye un nuevo pavimento de acuerdo con las proyecciones futuras.

Cuando la capacidad estructural se encuentre muy cercana al 0% y se presente un altísimo deterioro donde la circulación es muy difícil con altos costo para el usuario, es requerida una reconstrucción del pavimento.

Metodología

Investigación bibliográfica

El desarrollo de este proyecto inicia con el estudio de diferentes referencias bibliográficas con el fin de recabar información importante que se debe considerar en el diseño estructural de pavimentos flexibles, así como poder distinguir los diferentes factores que influyen directamente sobre las vías y que causan un deterioro importante sobre estos. Además de estudiar los parámetros que componen las diferentes ecuaciones utilizadas para el diseño, con la finalidad de obtener los espesores adecuados a las demandas impuestas.

Se investiga sobre los tipos de deterioros, las estructuras de pavimentos flexibles así como las obras a realizar en el mantenimiento usual de la vía. En cuanto a la rehabilitación/mantenimiento, se estudia el procedimiento para obtener el espesor necesario, ya sea de sobre-capas o de re-carpeteo según sea el estado del pavimento y de las solicitudes futuras sobre la carretera en estudio.

Determinación de los factores camión

Se realiza un estudio de las estaciones de pesaje existentes actualmente en Costa Rica, propiamente de cinco estaciones ubicadas en la ruta 1, ruta 2 y ruta 32 con datos de los pesos de los vehículos de los años 2009, 2010 y 2011. A partir de esta base de datos, se procede a realizar una agrupación según el tipo de vehículo (ver apéndice 1) y el tipo de eje, obteniendo un peso representativo para cada eje mediante la aplicación del percentil 95 a los datos. Una vez obtenido este dato, se realizan los cálculos

necesarios para obtener el factor camión representativo para diferentes números estructurales e índice de servicio final, esto para los diferentes vehículos evaluados por las estaciones de pesaje.

La aplicación del percentil 95 a los datos se debe a que se consideró que este el valor abarca la mayor cantidad de datos, dejando por fuera los pesos que se encuentran más dispersos y que no son los usuales para tales vehículos.

Consecuentemente, se realiza una comparación entre los factores camión calculados con los utilizados para el diseño en el Departamento de Geotecnia y materiales, y los emitidos en la directriz DVOP-5170-07.

Además, se estudia los pesos máximos permisibles publicados en el Diario Oficial La Gaceta el 19 de enero del 2005, en donde se comparan con los pesos presentados de las estaciones de pesaje, se logra visualizar cuál es la cantidad de vehículos con sobrepeso que circula sobre las diferentes vías.

Creación de la guía y herramienta de cálculo

A partir de las actividades anteriores referentes a revisión bibliográfica, se realiza una guía donde el usuario puede determinar el valor de cada variable necesaria para la aplicación de la ecuación de la AASHTO 93 para el diseño de pavimentos flexibles. Obteniendo los espesores necesarios para un pavimento nuevo o para la rehabilitación de un pavimento existente.

También esta guía contiene la información necesaria para el cálculo de los ejes equivalentes de carga y el análisis para la falla del pavimento por fatiga y deformación permanente.

Haciendo uso de los nomogramas de la AASHTO 93 para determinar, ya sea el módulo de rigidez o

los coeficientes estructurales, se tabulan sus datos y por medio del programa Matlab se obtienen las curvas de mejor ajuste y con esto las ecuaciones. Esto para agilizar el cálculo de estos valores en la herramienta de cálculo y para no depender de estos nomogramas cada vez que se realice un diseño.

Para agilizar la obtención de resultados, se realiza una herramienta electrónica de cálculo, utilizando Visual Basic para aplicaciones de Excel, en donde se presenta una interfaz en la cual se ingresan los datos necesarios, determinados con ayuda de la guía, y mediante un código de programación se realiza el cálculo correspondiente y se presenta al usuario el resultado.

Validación de la herramienta

Para conocer la precisión de la hoja de cálculo, se procede a compararla con el diseño estructural de un pavimento flexible proporcionado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Para tal efecto, se contrastan los valores de los módulos resilientes de los materiales utilizados, los números y coeficientes estructurales así como los espesores del paquete estructural.

Manual de uso para la herramienta

Para que el usuario pueda de una manera más acertada usar la herramienta electrónica de cálculo, se confecciona un manual para su uso. En donde por medio de diferentes figuras que muestran los formularios, se explican los pasos a seguir y las consideraciones que se deben tomar para evitar errores.

Resultados

Análisis del factor camión

Por la importancia que representa el factor camión en el diseño de los pavimentos por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, se procede a realizar un cálculo de tal valor a partir de los datos de las estaciones de pesaje; y con ello, poder asignárselo a cada tipo de vehículo.

Estas estaciones de pesaje tienen como función controlar los pesos de los vehículos y hacer que se respete lo establecido en la legislación, en cuanto a los pesos y dimensiones según su configuración. Dichas estaciones se encuentran localizadas en:

- Estación 1: Sentido San José – Limón
- Estación 2: Sentido Limón – San José.
- Estación 3: Villa Briceño
- Estación 4: Sentido San José – Cartago.
- Estación 5: Sentido Cartago – San José.

En el cuadro 2, se presenta la cantidad de vehículos revisados en los años 2009, 2010 y parte del 2011.

En la siguiente figura, se muestra los vehículos mayormente analizados.

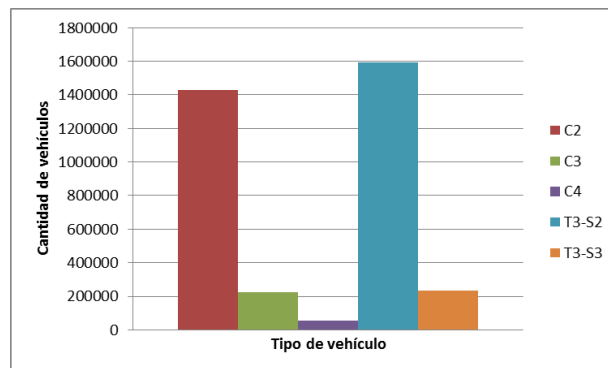


Figura 10. Cantidades de vehículos

A partir de la base de datos de cada una de las estaciones, se procede a juntar los valores por tipo de vehículo, los cuales son analizados y se determina que el percentil 95 es el mejor parámetro para obtener un valor representativo para los pesos de cada eje, ya sean simple, tándem, o trídem.

Una vez obtenido el valor representativo para los pesos de los ejes, según el tipo de vehículo y aplicando la fórmula para el cálculo de los factores equivalentes de carga, se procede a la obtención del factor camión (observar apéndice 3).

En el cuadro 3, se presenta los factores camión para un número estructural igual a 5 e índice de servicio de 2.5. En las figuras 11,12, 13,14, se muestra gráficamente el valor numérico de cada vehículo; de manera que se puede visualizar cuál es el automotor que ocasiona un mayor daño.

Además, se realiza una comparación entre los factores utilizados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, los que propone LANAMME y los obtenidos en este proyecto (ver cuadro 4).

Sobre-peso de vehículos

A partir de la base de datos correspondiente a las estaciones de pesaje, se procedió a realizar el conteo de los vehículos que sobrepasan los pesos máximos, establecidos por la Gaceta publicado el 19 de enero del 2005 (ver anexos cuadros AN12 - AN16).

La asignación de estos pesos depende del tipo de vehículo y de la configuración de los ejes.

En el cuadro 2, se indica la cantidad y porcentaje de vehículos con sobrepeso; en donde se consideró que si un vehículo sobrepasa tan solo el peso en un único eje, este ya se encuentra irrespetando la legislación.

También, se realiza el cálculo del factor camión para los pesos máximos permisibles; esto para conocer el daño máximo que puede ocasionar en conjunto un vehículo (todos los grupos de ejes) sobre el pavimento; y con ello, realizar una comparación con el daño que ocasionan los vehículos que circulan por las diferentes rutas estudiadas. Con esto, se podrá establecer de una manera más precisa si el daño máximo permisible es superado por los pesos de los vehículos en estudio.

En el cuadro 5, se observa el resumen de los factores camión ($SN=5$ y $pt=2,5$); calculados a partir de los pesos publicados en La Gaceta. En la sección de apéndices (ver apéndice 4), se pueden visualizar los demás cuadros con los diferentes números estructurales e índices de servicio finales.

En el cuadro 6, se realiza una comparación entre los factores camión obtenidos a través de las estaciones de pesaje y de los pesos máximos permisibles.

el contrario, si circula con sobre peso como el que se observa en el cuadro 19, presenta un fc de 16,172.

Efecto del sobrepeso de los vehículos

Un mayor peso de los vehículos al estipulado, afectará directamente la vida del pavimento, esto por que aumentará el factor camión y, por tanto, el número de los ejes equivalentes de carga. Para ejemplificar lo dicho, se tiene un camión T3-S2 que sí cumple con lo establecido; en cuanto a su peso, presenta un factor camión de 3,151. Por

Cuadro 2. Cantidad de vehículos en estaciones de pesaje										
Tipo de vehículo		Total de vehículos	Estación 1		Estación 2			Estación 3		
			Vehículos con sobrepeso	% de vehículos con sobre-peso	Total de vehículos	Vehículos con sobrepeso	% de vehículos con sobre-peso	Total de vehículos	Vehículos con sobrepeso	% de vehículos con sobre-peso
C2	200	105396	303	0,29	102424	241	0,24	49207	241	0,49
C2 (bus)	210	35	3	8,57	24	0	0,00	11	0	0,00
C3	310	19898	252	1,27	23287	243	1,04	9996	329	3,29
C3	311	24	0	0,00	14	0	0,00	40	0	0,00
C3 (bus)	320	96	2	2,08	108	1	0,93	18	2	11,11
C4	450	3	0	0,00	4	1	25,00	1	0	0,00
C4 (bus)	460	29	18	62,07	39	5	12,82	1	0	0,00
C4	470	22172	601	2,71	917	28	3,05	300	21	7,00
C4	477	179	56	31,28	21	8	38,10	10	1	10,00
C2-R2	400	34	0	0,00	23	0	0,00	12	1	8,33
C3-R2	520	62	6	9,68	106	2	1,89	99	4	4,04
C3-R3	630	359	62	17,27	108	16	14,81	10	5	50,00
C4-R2	660	1	0	0,00	-	-	-	-	0	-
C4-R2	670	3	1	33,33	4	0	0,00	3	0	0,00
C4-R3	770	1	0	0,00	6	1	16,67	-	0	-
C4-R3	780	8	3	37,50	13	2	15,38	1	1	100,00
T2-S1	300	92	4	4,35	95	3	3,16	37	3	8,11
T2-S2	410	180	8	4,44	225	7	3,11	99	7	7,07
T2-S3	570	7	0	0,00	16	1	6,25	6	0	0,00
T3-S1	420	279	5	1,79	477	4	0,84	118	5	4,24
T3-S2	530	545020	7752	1,42	577352	15518	2,69	81111	5591	6,89
T3-S3	690	81442	6728	8,26	65794	7137	10,85	9086	1494	16,44
T3-S1-2	610	22	3	13,64	38	0	0,00	5	2	40,00
T2-S1-S1	430	1	0	0,00	5	0	0,00	5	1	20,00
T2-S2-S2	640	1	0	0,00	-	-	-	2	0	0,00
T3-S2-S2	750	142	33	23,24	154	2	1,30	12	4	33,33
Total		775486	15840	2,04	771254	23220	3,01	150190	7712	5,13

Cuadro 2. Cantidad de vehículos en estaciones de pesaje							
Tipo de vehículo		Estación 4			Estación 5		
		Total de vehículos	Vehículos con sobrepeso	% de vehículos con sobre-peso	Total de vehículos	Vehículos con sobrepeso	% de vehículos con sobre-peso
C2	200	616131	1024	0,17	555580	730	0,13
C2 (bus)	210	118	0	0,00	100	2	2,00
C3	310	84026	2983	3,55	87700	3485	3,97
C3	311	93	10	10,75	93	0	0,00
C3 (bus)	320	369	4	1,08	377	0	0,00
C4	450	8	1	12,50	5	1	20,00
C4 (bus)	460	9	2	22,22	10	3	30,00
C4	470	8660	652	7,53	22494	557	2,48
C4	477	1565	122	7,80	2365	150	6,34
C2-R2	400	86	0	0,00	136	32	23,53
C3-R2	520	153	14	9,15	213	3	1,41
C3-R3	630	154	70	45,45	140	30	21,43
C4-R2	660	-	-	-	-	0	-
C4-R2	670	4	0	0,00	3	1	33,33
C4-R3	770	2	0	0,00	7	3	42,86
C4-R3	780	27	4	14,81	135	125	92,59
T2-S1	300	719	6	0,83	808	44	5,45
T2-S2	410	505	14	2,77	660	12	1,82
T2-S3	570	10	0	0,00	14	1	7,14
T3-S1	420	877	54	6,16	641	28	4,37
T3-S2	530	187191	8136	4,35	203938	8124	3,98
T3-S3	690	37350	5371	14,38	40527	3528	8,71
T3-S1-2	610	281	165	58,72	96	58	60,42
T2-S1-S1	430	5	0	0,00	9	2	22,22
T2-S2-S2	640	-	-	-	-	-	-
T3-S2-S2	750	359	88	24,51	4755	694	14,60
Total		938702	18720	1,99	920806	17613	1,91

Cuadro 3. Resumen de factor camión para un SN= 5 y Pt=2,5	
Tipo de vehículo	Factor camión
C2	0,955
C2 (Buses)	1,346
C3	1,413
C3 (Buses)	0,962
C4	1,377
C4 (Buses)	1,651
C2-R2	4,519
C2-R3	2,289
C3-R2	3,482
C3-R3	5,680
C4-R2	4,947
C4-R3	5,120
T2-S1	4,771
T2-S2	3,422
T2-S3	2,345
T3-S1	3,624
T3-S2	2,665
T3-S3	2,519
T3-S1-2	4,954
T4-S2	1,651
T2-S1-S1	5,545
T2-S2-S2	3,851
T3-S2-S2	3,994

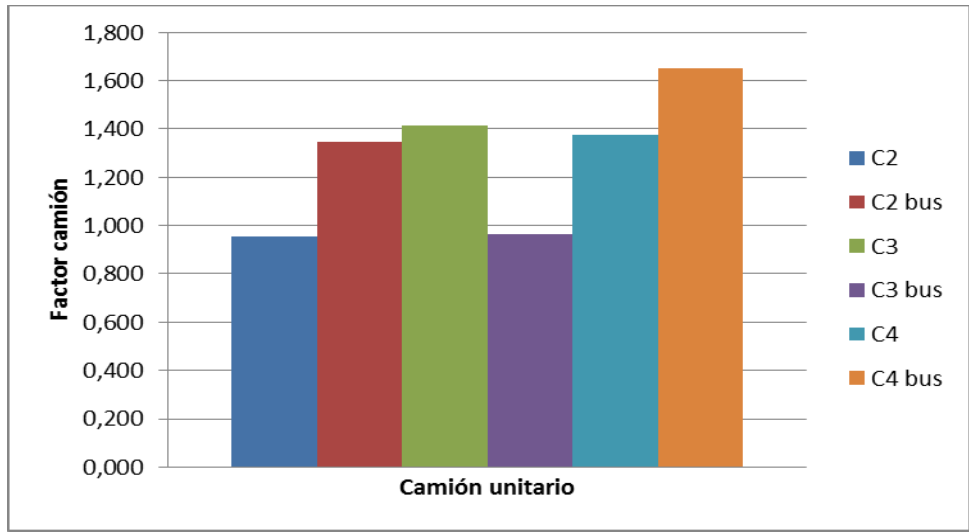


Figura 11. Factor camión de camión unitario

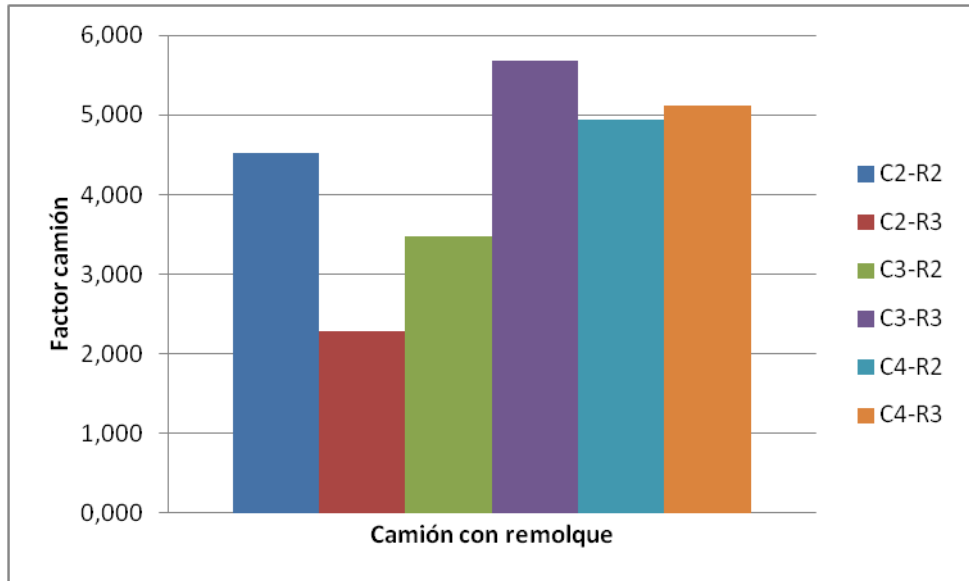


Figura 12. Factor camión para camión con remolque

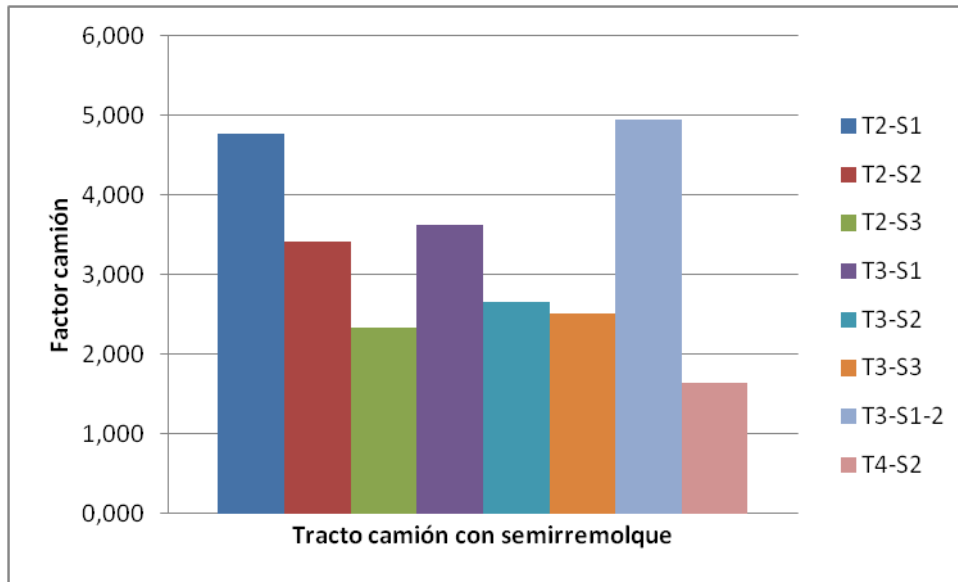


Figura 13. Factor camión para tracto camión con semirremolque

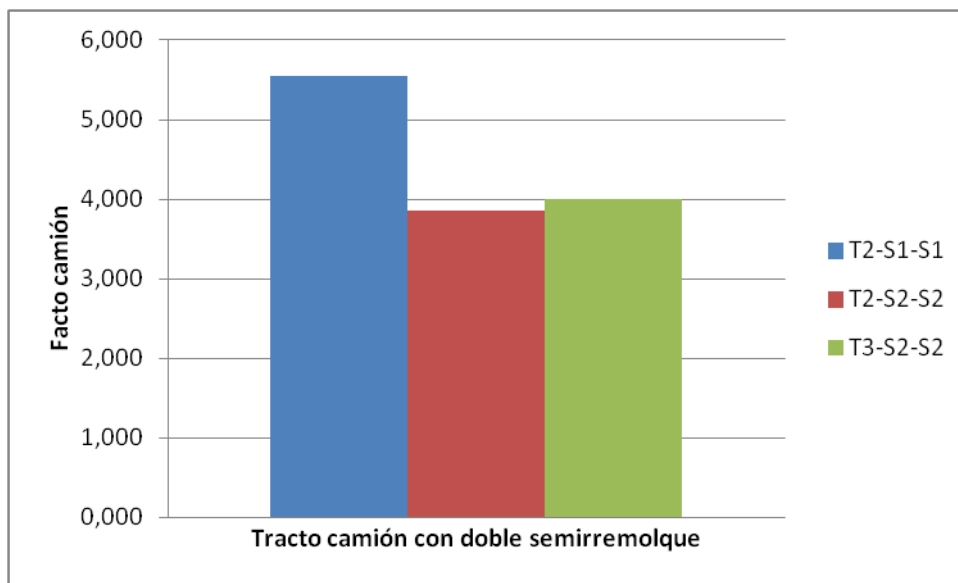


Figura 14. Factor camión para tracto camión con doble semirremolque

Cuadro 4. Comparación de factores camión					
Tipo de vehículo	Factor camión				
	MOPT (1)	DVOP-5170-07 promedio (2)	Lanamme 2007 (3)	Estaciones de pesaje (4)	% de diferencia entre el dato (1) y (2)
Liviano	0,0005	0,01-0,02	-	-	-
Carga liviana	0,39		0,005-0,22	-	-
C2	0,95	0,26-0,63	0,300-0,86	0,955	0,53
C2 buses	0,95	1,25-2,29	-	1,346	41,68
C3	1,45	0,99-1,28	1,43-3,08	1,413	0,83
T3-S2	2,7	1,51-2,38	1,52-3,41	2,665	1,29

Cuadro 5. Factores camión según pesos máximos permisibles, SN=5 y Pt=2,5		
Tipo de vehículo		FC
C2	200	2,484
C3	311	1,263
C3	310	1,718
C4	470	1,573
	477	1,014
	450	1,979
C4++	-	2,002
C5	-	1,298
C2-R1	-	4,683
C2-R2	400	6,883
C3-R1	-	3,917
C3-R2	520	6,117
C3-R3	630	5,351
C4-R1	-	4,178
C4-R1	-	3,773
C4-R2	660	6,378
C4-R2	670	5,972
C4-R3	770	5,612
C4-R3	780	5,206
T2-S1	300	4,683
T2-S2	410	4,097
T2-S3	570	3,773
T2-S1-2	-	6,117
T3-S1	420	3,917
T3-S2	530	3,151
T3-S3	690	3,007
T3-S1-2	610	5,351
T2-S1-S1	430	6,883
T2-S2-S2	640	5,351
T3-S2-S2	750	4,585

Cuadro 6. Comparación de factores camión, SN=5 y Pt=2,5

Tipo de vehículo		FC (GACETA)	FC ESTACIONES
C2	200	2,484	0,955
C3	311	1,263	1,413
C3	310	1,718	
C4	470	1,573	1,377
	477	1,014	
	450	1,979	1,717
C4++	-	2,002	-
C5	-	1,298	-
C2-R1	-	4,683	-
C2-R2	400	6,883	4,519
C3-R1	-	3,917	-
C3-R2	520	6,117	3,482
C3-R3	630	5,351	5,680
C4-R1	-	4,178	-
C4-R1	-	3,773	-
C4-R2	660	6,378	1,728
C4-R2	670	5,972	4,947
C4-R3	770	5,612	4,758
C4-R3	780	5,206	5,120
T2-S1	300	4,683	4,771
T2-S2	410	4,097	3,422
T2-S3	570	3,773	2,345
T2-S1-2	-	6,117	-
T3-S1	420	3,917	3,624
T3-S2	530	3,151	2,665
T3-S3	690	3,007	2,519
T3-S1-2	610	5,351	4,954
T2-S1-S1	430	6,883	5,545
T2-S2-S2	640	5,351	3,851
T3-S2-S2	750	4,585	3,994

Cuadro 7. Factor camión para vehículo tipo T3-S2

Ejes	Camión con peso máximo permisible		Camión con sobre peso	
	Peso (ton)	FC	Peso (ton)	FC
1	6	3,151	10	16,172
2	16,5		25	
3	16,5		25	

Guía para el diseño

En seguida, se presenta los pasos necesarios a seguir para realizar el diseño de un pavimento, ya sea para estructuras nuevas o para su rehabilitación.

A partir de las variables que se mencionan y de los valores de cada parámetro, se podrá alimentar la herramienta computacional de cálculo y obtener un diseño apegado a las necesidades del usuario y proyecto.

Pavimentos nuevos

Para el diseño de un pavimento flexible, se debe seguir una serie de pasos o procedimientos con el fin de establecer ciertos parámetros de acuerdo con la importancia y la demanda del proyecto. Por lo cual, a continuación, se establece el orden a seguir y los criterios a considerar para establecer los valores de cada variable; esto para determinar el espesor necesario de cada capa.

Procedimiento para el diseño de pavimentos flexibles.

1. Asumir o determinar el periodo de diseño: Este depende de cuántos años la administración requiere y desea que la obra esté en servicio, así como del tipo de ruta. Para tal caso, se puede hacer uso de alguno de los siguientes cuadros.

Tipo de carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20-40 años
Troncales suburbanas	15-30 años
Troncales Rurales	
Colectras Suburbanas	10-20 años
Colectores Rurales	

Fuente: SIECA, 2001

Tipo de carretera	Período de diseño (años)
Urbana de alto volumen de tráfico	30-50
Rural de alto volumen de tráfico	20-50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15-25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10-20

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

2. Determinar el número de ejes equivalentes de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Obtener el tránsito promedio diario (TPD). El TPD; para tal caso, se puede conseguir por medio del conteo de los ejes agrupándolos de acuerdo con su configuración (simple, doble y triple) y su peso por medio de estaciones móviles o fijas. También, se puede obtener el TPD por medio del conteo de los vehículos clasificándolos según la configuración de los vehículos (ver apéndice 1).

Se debe tener en cuenta que la cantidad de tránsito varía muchas veces según el horario, el día de la semana o época del año; por lo cual, se debe considerar estas variaciones y realizar los conteos respectivos en diferentes temporadas, contemplando estas variaciones para contar con una mejor perspectiva y, por ende, datos más confiables.

Si la vía no ha sido aún construida y por lo tanto, no existe tránsito; se debería realizar conteos en otras vías donde es potencialmente posible que esos vehículos puedan utilizar la carretera que se pretende construir.

- Una vez que se realiza el conteo de vehículos o ejes y se ejecuta la clasificación y diferenciación respectiva por tipo y peso, se procede a convertir todas las pasadas de vehículos a una única pasada de eje equivalente de 8200 kg. (Ver procedimiento del cálculo de eeq diarios en el siguiente apartado).
- Se debe convertir la cantidad de ejes equivalente diarios a la cantidad de ejes equivalentes para el periodo de diseño, además de considerar un crecimiento anual de la flota vehicular. Para realizar dichos cálculos, se puede utilizar las siguientes fórmulas:

$$EEQ_{\text{primer año}} = EEQ / \text{dianos} * 365 \text{ días}$$

$$EEQ_{\text{para el periodo de diseño}} = EEQ_{\text{primer año}} * \text{factor de crecimiento}$$

Este factor de crecimiento depende del periodo de diseño de la estructura a diseñar y de la tasa de crecimiento prevista de los vehículos. El valor del factor de crecimiento se puede obtener de una tabulación de datos (ver anexos cuadro AN10) o haciendo uso de la siguiente fórmula.

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

En donde:

g: Tasa de crecimiento %

n: Cantidad de años

- Para el diseño del pavimento se debe contar con datos de EEQ por sentido, donde los datos obtenidos deben diferenciar la trayectoria seguida por los vehículos.

Si por el contrario se obtuvieron datos en conjunto de todo el tránsito en ambas direcciones se debe calcular los EEQ por sentido mediante la siguiente ecuación.

$$EEQ_{\text{periodo diseño por sentido}} = EEQ_{\text{para el periodo de diseño}} * \text{factor direccional}$$

El factor direccional corresponde a un porcentaje de la cantidad de vehículos que circulan por dirección, si se desconoce el porcentaje se puede considerar un 50% para ambas direcciones.

- Finalmente se debe calcular la cantidad de EEQ para el carril de diseño, se debe considerar la cantidad de carriles por sentido, en donde el carril crítico se presenta por donde circulen la mayor cantidad de vehículos pesados, siendo usualmente el carril izquierdo.

$$EEQ_{\text{periodo de diseño para carril de diseño}} = EEQ_{\text{periodo diseño por sentido}} * \% \text{ de EEQ en carril de diseño.}$$

Para obtener el porcentaje de EEQ en el carril de diseño, se hace uso del siguiente cuadro.

Número de carriles por sentido	% de EEQ en carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

3. Determinar la confiabilidad del diseño y así la obtención del Z_R .

Se debe establecer el nivel de confianza de acuerdo con lo establecido en alguno de los siguientes cuadros.

Tipo de carretera	% Nivel de confianza	
	Urbano	Rural
autopistas	85-99,9	80-99,9
Principales arterias	80-99	75-95
Coletores	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

Zona	TPD	Confianza
Rutas primarias	Menor a 500	75
	Entre 500 y 2000	85
	Mayor a 2000	90
Rutas secundarias	Menor a 500	70
	Entre 500 y 2000	80
Rutas terciarias	Mayor a 2000	85
	Menor a 500	70
	Entre 500 y 2000	75
	Mayor a 2000	80

Fuente: DVOP-6152-07

Una vez asignado el nivel de confianza, se debe escoger el valor de Z_R , de acuerdo con el siguiente cuadro.

% de nivel de confianza	Desviación estandar normal (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
99,9	-3,090
99,99	-3,750

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

4. Seguidamente, se establece el valor de la desviación estándar de desempeño S_o . Para pavimentos flexibles, adquiere valores entre 0,40 y 0,50.

5. Determinación del índice de servicio. El valor del PSI inicial para pavimentos flexibles nuevos es de 4,2 y el PSI final toma valores entre 2 y 3 según la importancia de la vía, siendo 3 para vías con estándares más demandantes. Para tal caso, se puede utilizar el siguiente cuadro.

Zona	TPD	PSI final
Rutas primarias	Menor a 500	2
	Entre 500 y 2000	2,5
	Mayor a 2000	2,5
Rutas secundarias	Menor a 500	2
	Entre 500 y 2000	2
	Mayor a 2000	2,5
Rutas terciarias	Menor a 500	2
	Entre 500 y 2000	2
	Mayor a 2000	2

Fuente: DVOP-6152-07

6. Una vez establecido el PSI inicial y final, se realiza el cálculo del ΔPSI siendo la diferencia de psi inicial y final.

$$\Delta PSI = PSI_{inicial} - PSI_{final}$$

7. Asignación del módulo resiliente de la subrasante, subbase, base y concreto asfáltico, mediante pruebas de laboratorio a través de correlaciones.

Las siguientes ecuaciones son obtenidas por medio de la tabulación de datos de los nomogramas de la AASHTO 93 y por medio del programa Matlab se obtienen las ecuaciones (ver apéndice 2).

• Subrasante

Para el cálculo del MR de la subrasante, se puede realizar pruebas de laboratorio para la obtención de su valor, o mediante el uso de la siguiente fórmula, partiendo del CBR de la sub-rasante.

$$MR_{SR} = (p1 * CBR^6) + (p2 * CBR^5) + (p3 * CBR^4) + (p4 * CBR^3) + (p5 * CBR^2) + (p6 * CBR) + p7$$

En donde:

MR_{SR} : Módulo resiliente de subrasante (psi)

CBR : Índice de soporte de California de la subrasante

$$p1 = 7,587 * 10^{-8}$$

$$p2 = -3,249 * 10^{-6}$$

$$p3 = -0,003089$$

$$p4 = 0,4657$$

$$p5 = -26,45$$

$$p6 = 1074$$

$$p7 = 990,7$$

Es importante mencionar que se debe calcular el MR de la subrasante en diferentes épocas del año ya que este varía según la estación. Esto porque el daño varía si se está en época lluviosa o seca, por lo cual se hace uso la ecuación mencionada en el marco teórico o a través del monograma respectivo (ver anexos figura AN1). Donde los valores del daños de los diferentes meses se promedian y a partir de este se calculó el MR.

- **Subbase**

El MR se obtendrá por medio del laboratorio o mediante la siguiente ecuación.

$$MR_{Sb} = (p1 * a^3) + (p2 * a^2) + (p3 * a) + p4$$

En donde:

MR_{Sb} : Módulo resiliente de subbase (psi).

a : Coeficiente estructural de subbase

$$p1 = 1,671 * 10^7$$

$$p2 = -4,982 * 10^6$$

$$p3 = 6,443 * 10^5$$

$$p4 = -1,773 * 10^4$$

- **Base**

Al igual que la subbase, se debe realizar el cálculo del MR a través de ensayos de laboratorio o con las siguientes ecuaciones diferenciando entre bases asfálticas, granulares y estabilizadas con cemento.

Base granular

$$MR_b = (p1 * a^4) + (p2 * a^3) + (p3 * a^2) + (p4 * a) + p5$$

En donde:

MR_b : Módulo resiliente de base granular (psi).

a : Coeficiente estructural de base granular

$$p1 = 1,956 * 10^8$$

$$p2 = -9,041 * 10^7$$

$$p3 = 1,585 * 10^7$$

$$p4 = -1,02 * 10^6$$

$$p5 = 3,512 * 10^4$$

Base estabilizada con cemento

$$MR_b = (p1 * a^4) + (p2 * a^3) + (p3 * a^2) + (p4 * a) + p5$$

En donde:

MR_b : Módulo resiliente de base estabilizada con cemento (psi).

a : Coeficiente estructural de base estabilizada con cemento

$$p1 = -1,108 * 10^9$$

$$p2 = 8,396 * 10^8$$

$$p3 = -2,243 * 10^8$$

$$p4 = 2,809 * 10^7$$

$$p5 = -8,494 * 10^5$$

Base asfáltica

$$MR_b = (p1 * a^4) + (p2 * a^3) + (p3 * a^2) + (p4 * a) + p5$$

En donde:

MR_b : Módulo resiliente de base asfáltica (psi).

a : Coeficiente estructural de base asfáltica

$$p1 = -5,703 * 10^7$$

$$p2 = 3,025 * 10^7$$

$$p3 = 2,032 * 10^6$$

$$p4 = -1,187 * 10^6$$

$$p5 = 1,719 * 10^5$$

El módulo resiliente para las bases y subbases también se puede calcular mediante la clasificación del material, conociendo su granulometría y los límites de Atterberg. A partir de la clasificación, se puede obtener el CBR y así y el módulo resiliente (ver anexos figuras AN2, AN4, AN5, AN6, AN7).

8. Con la obtención de los datos numerados anteriormente, se procede al cálculo del número estructural. Para tal caso, se puede hacer uso del monograma de la AASHTO 93 (ver anexos figura AN8) para el cálculo del número estructural o de manera iterativa haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$\log W_{18} = Z_R * S_o + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log(MR) - 8,07$$

Es importante destacar que para el cálculo del número estructural de la carpeta asfáltica, se utiliza el MR de la base; para determinar el SN de la base se emplea el MR de la subbase y para el cálculo del SN de la subbase el MR de la subrasante. Mediante la siguiente figura, se ejemplifica lo dicho.

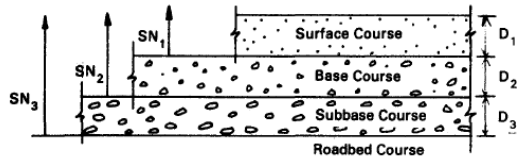


Figura 15. Números estructurales
Fuente: AASHTO 93

9. Coeficiente estructural: Cada capa, según sus materiales, presenta coeficientes estructurales característicos; dependiendo del dato con que se cuente, se realiza su cálculo.

Las siguientes ecuaciones son obtenidas por medio de la tabulación de los datos de los monogramas de la AASHTO 93 y el uso de Matlab para la obtención de la ecuación respectiva (ver apéndice 2).

- Sub base

Si se cuenta con datos de MR directamente de laboratorio se hace uso del monograma para el cálculo del coeficiente estructural de la sub base (ver anexos figura AN7) o por medio de la siguiente ecuación.

$$a_{sb} = (p1 * MR^3) + (p2 * MR^2) + (p3 * MR) + p4$$

En donde

a_{sb} : Coeficiente estructural de la subbase.

MR: Módulo resiliente de la subbase (psi).

$$p1 = -2,478 * 10^{-14}$$

$$p2 = 1,025 * 10^{-9}$$

$$p3 = -7,428 * 10^{-6}$$

$$p4 = 0,07381$$

Si por el contrario se cuenta con datos de CBR, se utiliza la siguiente ecuación o, igualmente, se aplica el monograma para su cálculo ubicado en anexos figura AN7.

$$a_{sb} = (p1 * CBR^4) + (p2 * CBR^3) + (p3 * CBR^2) + (p4 * CBR) + p5$$

En donde

a_{sb} : Coeficiente estructural de la subbase.

CBR: Índice de soporte de California de la subrasante

$$p1 = -5,491 * 10^{-9}$$

$$p2 = 1,334 * 10^{-6}$$

$$p3 = -0,0001187$$

$$p4 = 0,005077$$

$$p5 = 0,03378$$

- Base

Al igual que la subbase, si se presentan datos de MR directamente obtenidos de laboratorio, se utilizan los monogramas para su cálculo (ver anexos figuras AN4, AN5, AN6), o las siguientes ecuaciones.

Base granular

$$a_b = (p1 * MR^4) + (p2 * MR^3) + (p3 * MR^2) + (p4 * MR) + p5$$

En donde

a_b : Coeficiente estructural de la base granular.

MR: Módulo resiliente de la base granular (psi)

$$p1 = -2,74 * 10^{-19}$$

$$p2 = 2,947 * 10^{-14}$$

$$p3 = -1,199 * 10^{-9}$$

$$p4 = 2,61 * 10^{-5}$$

$$p5 = -0,138$$

Base estabilizada con cemento

$$a_b = (p1 * MR^4) + (p2 * MR^3) + (p3 * MR^2) + (p4 * MR) + p5$$

En donde

a_b : Coeficiente estructural de la base estabilizada con cemento.

MR: Módulo resiliente de la base estabilizada con cemento (psi).

$$p1 = 1,583 * 10^{-24}$$

$$p2 = -4,42 * 10^{-18}$$

$$p3 = 4,3 * 10^{-12}$$

$$p4 = -1,386 * 10^{-6}$$

$$p5 = -0,1871$$

Base asfáltica

$$a_b = (p1 * MR^4) + (p2 * MR^3) + (p3 * MR^2) + (p4 * MR) + p5$$

En donde

a_b : Coeficiente estructural de la base asfáltica.

MR : Módulo resiliente de la base asfáltica (psi).

$$p1 = -5,694 * 10^{-23}$$

$$p2 = 6,44 * 10^{-17}$$

$$p3 = -2,676 * 10^{-11}$$

$$p4 = 5,362 * 10^{-6}$$

$$p5 = -0,2036$$

Si se cuentan con datos del CBR se puede hacer uso igualmente de los monogramas, dependiendo del tipo de base o utilizar las siguientes ecuaciones.

Base granular

$$a_b = (p1 * CBR^3) + (p2 * CBR^2) + (p3 * CBR) + p4$$

En donde

a_b : Coeficiente estructural de la base granular.

CBR : Índice de soporte de California de base.

$$p1 = 2,011 * 10^{-7}$$

$$p2 = -4,743 * 10^{-5}$$

$$p3 = 0,004053$$

$$p4 = 0,00797$$

Base estabilizada con cemento

$$a_b = (p1 * f'c^3) + (p2 * f'c^2) + (p3 * f'c) + p4$$

En donde

a_b : Coeficiente estructural de la base estabilizada con cemento.

$f'c$: Resistencia a la compresión a los 7 días ($lb/pulg^2$).

$$p1 = -5,28 * 10^{-11}$$

$$p2 = -9,196 * 10^{-8}$$

$$p3 = 0,0001105$$

$$p4 = 0,0996$$

Base asfáltica

$$a_b = (p1 * E^6) + (p2 * E^5) + (p3 * E^4) + (p4 * E^3) + (p5 * E^2) + (p6 * E) + p7$$

En donde

a_b : Coeficiente estructural de la base asfáltica.

E : Estabilidad Marshall (lb).

$$p1 = -9,333 * 10^{-20}$$

$$p2 = 6,094 * 10^{-16}$$

$$p3 = -1,585 * 10^{-12}$$

$$p4 = 2,086 * 10^{-9}$$

$$p5 = -1,45 * 10^{-6}$$

$$p6 = 0,0006142$$

$$p7 = 0,04495$$

• Carpeta

Para el cálculo del coeficiente estructural para el concreto asfáltico, se utiliza el correspondiente monograma de la AASHTO (ver anexos figura AN3) o mediante el uso de la siguiente ecuación.

$$a_{carpeta} = (p1 + MR^5) + (p2 + MR^4) + (p3 * MR^3) + (p4 * MR^2) + (p5 * MR) + p6$$

En donde:

$a_{carpeta}$: Coeficiente estructural correspondiente a la carpeta.

MR : Módulo de rigidez de carpeta (psi).

$$p1 = 7,035 * 10^{-29}$$

$$p2 = -1,19 * 10^{-22}$$

$$p3 = 7,813 * 10^{-17}$$

$$p4 = -2,545 * 10^{-11}$$

$$p5 = 4,806 * 10^{-6}$$

$$p6 = -0,1045$$

10. Asignación del coeficiente de drenaje: De acuerdo con el tiempo de permanencia del agua en el pavimento y de la calidad de los drenajes, se fijan diferentes valores, determinados con el siguiente cuadro. Se recomienda hacer uso de los valores ubicados en la columna "más que el 25%".

Cuadro 15. Coeficientes de drenaje				
Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo que la estructura permanece en niveles de saturación.			
	Menos que 1%	1-5%	5-25%	Más que el 25%
Excelente	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Bueno	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Razonable	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	0,75-0,40	0,40

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

Una vez obtenido el número estructural, coeficiente estructural y definido el coeficiente de drenaje correspondiente a cada capa, se aplicarán las siguientes ecuaciones para determinar el espesor de cada una.

Suponiendo que se deben diseñar tres capas subbase, base y carpeta se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$h_1 = \frac{SN_1}{a_1} * 2,54$$

$$h_2 = \frac{SN_2 - a_1 * h_1}{a_2 * m_2} * 2,54$$

$$h_3 = \frac{SN_3 - a_1 * h_1 - a_2 * m_2 * h_2}{a_3 * m_3} * 2,54$$

En donde

h_1 : Espesor de la capa de concreto asfáltico (cm)

h_2 : Espesor de la base (cm).

h_3 : Espesor de la subbase (cm).

SN_1 : Número estructural de la capa de concreto asfáltico.

SN_2 : Número estructural de la capa de base.

SN_3 : Número estructural de la capa de subbase.

a_1 : Coeficiente estructural de la capa de concreto asfáltico.

a_2 : Coeficiente estructural de la capa de base.

a_3 : Coeficiente estructural de la capa de subbase.

m_2 : Coeficiente de drenaje de la base.

m_3 : Coeficiente de drenaje de la subbase.

Es importante mencionar que se puede aumentar los espesores de las capas superiores y con ello, la disminución de las capas inferiores, pero no se permite de forma contraria, es decir, por ejemplo aumentar el espesor de la subbase y disminuir el de la base.

11. Finalmente, se debe comparar los espesores obtenidos con los mínimos establecidos por la AASHTO, esto para asegurar una mayor estabilidad de la estructura.

Cuadro 16. Espesores mínimos de acuerdo a las ejes de diseño.		
EEQ	Capa asfáltica (pulg)	Base granular (pulg)
Menor a 50000	1,0	4,0
50000-150000	2,0	4,0
150000-500000	2,5	4,0
500000-2000000	3,0	6,0
2000000-7000000	3,5	6,0
Mayor a 7000000	4,0	6,0

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

Cálculo de EEQ diarios

Para el cálculo de los ejes equivalentes de carga, como se mencionó, se debe haber realizado un conteo; ya sea por tipo de eje o por tipo de vehículo, diferenciando en sus pesos.

Para ambas formas de cálculo, lo primero que debe de calcularse es el factor de carga equivalente (LEF); el cual se obtiene con las siguientes fórmulas.

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4,79 * \log(18 + 1) - 4,79$$

$$* \log(L_x + L_2) + 4,33 * \log(L_2)$$

$$+ \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4,2 - P_t}{4,2 - 1,5}\right)$$

$$\beta_x = 0,40 + \frac{0,081 * (L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} * (L_2)^{3,23}}$$

$$\beta_{18} = 0,40 + \frac{0,081 * (L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} * (L_2)^{3,23}}$$

$$LEF = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

En donde:

W_{tx} : Número de aplicaciones del eje de una carga x.

W_{t18} : Número de aplicaciones del eje simple estándar de 8200 kg.

L_x : Carga del eje x, ya sea simple, tándem o trídem (kips).

L_2 : Código del eje, (1 para eje simple, 2 para eje tándem, 3 para eje trídem).

SN : Número estructural supuesto.

P_t : Índice de servicio final.

G_t : Variable que depende del P_t , (factor de pérdida de serviciabilidad).

Para el cálculo de β_{18} , el valor de L_2 es el de un eje simple.

Por tipo de eje

Si se cuenta con cantidad de ejes, se debe calcular el LEF para el tipo de eje y para un intervalo de peso. Una vez obtenido el LEF para un intervalo de peso y tipo de eje, se utiliza la siguiente fórmula para el cálculo de los ejes equivalentes diarios.

$$EEQ_{diarios} = \sum [(LEF_{intervalo\ peso} * cantidad\ de\ ejes\ simples) + (LEF_{intervalo\ peso} * cantidad\ de\ ejes\ tándem) + (LEF_{intervalo\ peso} * cantidad\ de\ ejes\ trídem)]$$

Por factor camión

Si por el contrario los datos que se tienen es el número de vehículos, lo que se debe de hacerse es el cálculo del factor camión para cada tipo de vehículo según la clasificación respectiva.

Para el cálculo del factor camión se debe conocer el peso de cada eje y su configuración. Se debe calcular el LEF para cada eje y luego realizar la sumatoria.

$$FC = \sum LEF_1 + LEF_2 + \dots + LEF_n$$

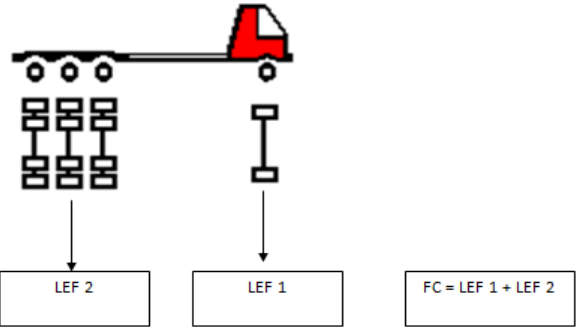


Figura 16. Cálculo del factor camión

$$EEQ_{diarios} = \sum FC * TPD$$

Falla de pavimentos

Para determinar la cantidad de ejes necesarios para que se presente la falla de los pavimentos, ya sea por fatiga de la capa asfáltica o por deformación plástica de la subrasante, se puede utilizar diferentes ecuaciones dadas en la literatura (ver marco teórico). También y lo más recomendable es realizar la calibración de estas ecuaciones al sitio del proyecto, para así obtener datos según la zona en estudio.

Para la obtención de la deformación radial por tensión o la deformación vertical por compresión, se puede hacer uso de diferentes paquetes computacionales como Ever-stress o Circly. En donde se debe considerar entre otros factores la presión de inflado de las llantas, el área de contacto entre la llanta y el pavimento, la separación entre ejes y su configuración.

Rehabilitación

Cuando ya se halla cumplido cierto periodo de vida del pavimento y presente algún deterioro importante la estructura, se hace necesaria una intervención.

La rehabilitación puede consistir en una sobrecapa o en un recarpeteo estructural que debe seguir un procedimiento para obtener un espesor de capa que satisfaga las necesidades de acuerdo con el tránsito y a los años de diseño.

Sobrecapas

Si es necesaria la intervención de la vía y con ello colocar una sobre capa sobre el pavimento existente, se debe seguir una serie de pasos para lograr obtener el espesor de la carpeta asfáltica que se colocará.

Antes de todo, se debe de definir si esta capa que se colocará cumplirá con fines estructurales o simplemente es para mejorar el índice de servicio. Si la capa va cumplir una función estructural, se debe revisar que la subbase y base no presenten deterioros graves que influyan en la capacidad estructural.

Por lo tanto, para la determinación del espesor de la sobrecapa, se puede seguir el siguiente procedimiento.

1. Determinar las características de las capas del pavimento existente así como de la subrasante. También conocer el espesor de las capas que componen la estructura.
2. Realizar un análisis del tráfico que circulará sobre la estructura que se rehabilitará, como se explicó en los apartados anteriores, y realizar el cálculo de los ejes equivalentes de carga para el periodo de diseño.
3. Calcular el módulo resiliente de la subrasante, siguiendo alguno de los siguientes procedimientos.
 - Mediante ensayos de laboratorio. Se debe tomar muestras del sitio y con el ensayo de cámara triaxial obtener el MR.
 - Mediante la obtención del CBR y con la correlación correspondiente obtener el MR de la sub rasante. Esto utilizando la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
 MR_{SR} &= (p1 * CBR^6) \\
 &+ (p2 * CBR^5) \\
 &+ (p3 * CBR^4) \\
 &+ (p4 * CBR^3) \\
 &+ (p5 * CBR^2) \\
 &+ (p6 * CBR) + p7
 \end{aligned}$$

En donde:

MR_{SR} : Módulo resiliente de subrasante (psi).

CBR : Índice de soporte de California de la sub rasante

$$p1 = 7,587 * 10^{-8}$$

$$p2 = -3,249 * 10^{-6}$$

$$p3 = -0,003089$$

$$p4 = 0,4657$$

$$p5 = -26,45$$

$$p6 = 1074$$

$$p7 = 990,7$$

- Con la clasificación del tipo de suelo granulometría y límites obtener por correlaciones el MR.
- Con el ensayo de deflectómetro de impacto (FWD) y utilizando las siguientes ecuaciones:

$$MR_{sr} = \frac{0,24 * P}{d_r * r}$$

$$MR_{sr \text{ diseño}} = 0,33 * MR_{sub \text{ rasante}}$$

En donde:

MR_{sr} : Módulo resiliente de la subrasante (psi).

$MR_{sr \text{ diseño}}$: Módulo resiliente de la subrasante para el diseño. (psi).

P : Carga aplicada en el ensayo de deflectómetro (lb).

d_r : Deflexión a una distancia r del punto de aplicación de la carga (pulg).

r : Distancia del punto de aplicación de la carga al punto de toma de datos de la deflexión.

Al realizar el ensayo, se debe estimar la distancia mínima entre el plato de carga y el lugar donde se realiza la medición, la cual se verifica con la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
 r &\geq 0,7 * a_e \\
 a_e &= \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{E_p}{MR_{sr}}} \right)^2}
 \end{aligned}$$

En donde:

r : Distancia al centro de carga (pulg)
 a_e : Radio del bulbo de esfuerzos en la interface del pavimento y la subrasante.
 α : Radio del plato de carga (pulg).
 D : Espesor del pavimento (pulg).
 E_p : Módulo promedio de las capas que componen el pavimento (psi).

Si no se cumpliera con el mínimo se pasa con la siguiente medida y se realizan los cálculos respectivos.

Como se evidencia no se conoce el módulo promedio de las capas, por ende se, debe utilizar la siguiente ecuación, que de manera iterativa se puede encontrar su valor. También se puede hacer uso de la figura que determina el $\frac{E_p}{MR}$ (ver anexos figura AN11).

$$do = 1,5 * p * a \left\{ \frac{1}{MR_{sr} * \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} * \sqrt[3]{\frac{E_p}{MR_{sr}}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right\}$$

En donde:

do : Deflexión medida en el centro del plato de carga (temperatura 20°C) (pulg).
 p : Presión del plato de carga (psi).
 α : Radio del plato de carga.
 MR_{sr} : Módulo resiliente de la subrasante.
 D : Espesor de las capas del pavimento (pulg).

E_p : Módulo efectivo del pavimento (psi).

Si la temperatura cuando se mide la deflexión do no es de 20°C, esta se debe ajustar por medio del gráfico respectivo (ver anexos figuras AN9 y AN10).

4. Cálculo del número estructural (SN) del pavimento existente. Este número estructural se puede determinar realizando ensayos no destructivos (FWD), y mediante la evaluación o caracterización de los materiales que componen el pavimento.

- Ensayos no destructivos: Se aplica la siguiente ecuación.

$$SN_{efectivo} = 0,0045 * D * \sqrt[3]{E_p}$$

En donde:

$SN_{efectivo}$: Número estructural del pavimento en uso.
 D : Espesor de las capas del pavimento.
 E_p : Módulo efectivo del pavimento (psi).

- Caracterización de los materiales. Se utiliza la siguiente ecuación.

$$SN_{efectivo} = (a_1 * h_1) + (a_2 * h_2 * m_2) + (a_3 * h_3 * m_3)$$

En donde:

$SN_{efectivo}$: Número estructural del pavimento en uso.
 a_i : Coeficientes estructurales
 D_i : Espesor de capas
 m_i : Coeficientes de drenaje.

Los valores de los coeficientes de drenaje se determinan de acuerdo con el cuadro 7 y considerando los criterios ahí mencionados.

Los coeficientes estructurales se determinan de acuerdo con la condición superficial que presente cada capa, utilizando el cuadro

“Coeficientes estructurales para la caracterización de los materiales” (ver anexos cuadro AN11).

5. Cálculo del número estructural necesario para la nueva demanda de ejes equivalentes. Para este caso, se debe seguir los mismo pasos para el diseño de un pavimento mencionados anteriormente, definiendo el índice de servicio, y las variables de confiabilidad, así como los ejes para el carril de diseño y el MR de la subrasante.
6. Al haber realizado los cálculos antes mencionados y poseer los valores del número estructural efectivo del pavimento y el número estructural necesario para el nuevo diseño, se procede al cálculo del espesor de la carpeta asfáltica.

$$SN_{sobrecapa} = SN_{necesario} - SN_{efectivo}$$

$$h_{sobrecapa} = \frac{SN_{sobrecapa}}{a_{sobrecapa}} * 2,54$$

En donde:

$SN_{sobrecapa}$: Número estructural de sobre capa.

$SN_{necesario}$: Número estructural necesario de acuerdo a la nueva demanda.

$SN_{efectivo}$: Número estructural del pavimento existente al momento de la rehabilitación.

$a_{sobrecapa}$: Coeficiente estructural del material que se utilizará (concreto asfáltico).

$h_{sobrecapa}$: Espesor de sobre capa (cm).

Recarpeteo

Para el recarpeteo, se debe seguir el mismo procedimiento para el diseño de las sobre capas; donde se debe calcular el número estructural del pavimento existente y el número estructural requerido.

Además, se debe establecer el espesor de la carpeta que se eliminará, con esto se afectará el número estructural del pavimento existente; por lo tanto, se deben aplicar las siguientes ecuaciones:

$$SN_{perfilado} = h_{perfilado} * a$$

En donde

$SN_{perfilado}$: Número estructural del espesor que se perfiló.

$h_{cortado}$: Espesor de material perfilado (pulg).

a : Coeficiente estructural del pavimento.

Por último, para el cálculo del espesor del recarpeteo, se sigue las siguientes ecuaciones.

$$SN_{del\ recarpeteo} = SN_{necesario} - (SN_{efectivo} - SN_{perfilado})$$

$$h_{del\ recarpeteo} = \frac{SN_{del\ recarpeteo}}{a} * 2,54$$

En donde

$SN_{del\ recarpeteo}$: Número estructural necesario para el recarpeteo.

$SN_{necesario}$: Número estructural necesario de acuerdo con la nueva demanda.

$SN_{efectivo}$: Número estructural del pavimento existente en el momento de la rehabilitación.

$SN_{perfilado}$: Número estructural del espesor que se perfiló.

$h_{del\ recarpeteo}$: Espesor de recarpeteo (cm).

a : Coeficiente estructural del pavimento.

Herramienta para el diseño

Para facilitar el diseño de los pavimentos, ya sea el cálculo de los ejes equivalentes de diseño, el dimensionamiento para pavimentos nuevos o para la rehabilitación y el análisis por fatiga y deformación permanente, se adjunta a este proyecto una hoja de cálculo con el nombre herramienta para el diseño de pavimentos flexibles.

Manual de uso de la herramienta

Para la utilización de la herramienta de cálculo, se presenta un manual de uso (ver apéndice 5), en donde se explica los pasos a seguir y las consideraciones a tomar para su buen uso y la obtención de los resultados.

Validación de la herramienta de cálculo.

Para exponer los resultados que se obtienen por medio de la hoja de cálculo, se realiza las siguientes comparaciones. Los datos de comparación provienen de informes de diseño brindados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Diseño de pavimentos nuevos

A partir de los datos de entrada (cuadro 17), se utiliza la herramienta de cálculo y se obtiene diferentes resultados como son el módulo resiliente, coeficiente y número estructural y espesor de las capas, los cuales son comparados con los valores suministrados por el MOPT.

Cuadro 17. Datos de entrada para el diseño	
EEQ de diseño	322511
Confiabilidad (R)	75%
ZR	-0,674
So	0,45
PSI inicial	4,2
PSI final	2,2
MR carpeta asfáltica	450000 psi
CBR base	80%
CBR material de prestamo	20%
CBR subrasante	6,60%
Coeficiente de drenaje de la base	0,9
Coeficiente de drenaje del relleno	0,9

Cuadro 18. Módulo resiliente			
Capas	Informe de diseño del MOPT	Informe de diseño hoja de cálculo	% de diferencia
Base	30000	28003,55	6,67
Material de préstamo	12750	13236,86	3,82
Sub rasante	9900	9900	0

Cuadro 19. Coeficiente estructural			
Capas	Informe de diseño del MOPT	Informe de diseño hoja de cálculo	% de diferencia
Carpeta asfáltica	0,45	0,443	1,56
Base	0,133	0,132	0,75
Material de préstamo	0,095	0,098	3,16

Cuadro 20. Número estructural			
Capas	Informe de diseño del MOPT	Informe de diseño hoja de cálculo	% de diferencia
Carpeta asfáltica	1,49	1,533	2,89
Base	2,09	2,067	1,10
Material de préstamo	2,3	2,307	0,3

Cuadro 21. Espesor de capas			
Capas	Informe de diseño del MOPT (cm)	Informe de diseño hoja de cálculo (cm)	% de diferencia
Carpeta asfáltica	8,40	8,89	5,83
Base	11,89	11,43	3,87
Material de préstamo	6,22	6,98	12,22

Análisis de los resultados

Este proyecto se presenta por la importancia de las vías y su estructura de pavimento, con el fin de ser de utilidad para las diferentes instituciones como son el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y las municipalidades. Con el propósito de presentar de forma clara los parámetros de diseño, así como los pasos a seguir para la configuración de los espesores de las diferentes capas adecuadas a sus demandas.

La metodología de diseño para pavimentos flexibles se basa en la guía de la AASHTO 93 y, por ende, así mismo el desarrollo de este proyecto.

Por lo cual, los parámetros de diseño fueron determinados en condiciones muy diferentes a las que se presentan en el país, como son cargas, tipo de zona y condiciones climáticas. El tipo de suelo utilizado en la pista de prueba de la AASHTO en Ottawa, Illinois en los años 1958-1960, es muy diferente a los tipos de suelos en Costa Rica. Las diferentes temperaturas así como las condiciones climatológicas presentan grandes variaciones respecto una de la otra.

Con lo mencionado, es importante decir que esta metodología no se ajusta en un 100% a estas condiciones y con ello algunas veces las estructuras diseñadas no presentan el comportamiento deseado en el diseño.

Aunque por lo difícil y costoso que puede ser desarrollar o mejorar un método de diseño apegado a las condiciones de un país, se debe utilizar las metodologías de diseño desarrolladas por otras instituciones u organismos de diferentes regiones, como es este caso. Donde lo importante sería dar un seguimiento a los diseños y construcciones efectuadas y con ello poder ir mejorando en cierto modo el proceso de diseño y ajustando/calibrando los factores en las medidas posibles. Además de crear experiencia por parte de las personas involucradas en estos campos.

Un punto importante en el diseño son las características de los materiales. En donde se debería realizar los ensayos que proporcionen el nivel de confianza más alto, como sería efectuar ensayos de laboratorio directamente para obtener el módulo resiliente de los materiales que es fundamental para el diseño, y no depender de la obtención de su valor por medio de procesos indirectos y correlaciones.

También se debe prestar gran relevancia a los requisitos mínimos que debe cumplir los materiales para el uso en las respectivas capas, así como controlar el método constructivo para asegurar una estructura fiable y que cumpla con las expectativas.

Como se mencionó en las secciones anteriores, la obtención de los ejes equivalentes de cargas se puede conseguir de distintas formas como son, por medio del conteo de ejes y pesos, estaciones móviles o el conteo de vehículos y la asignación del factor camión.

Haciendo uso del conteo de ejes se tiene una perspectiva más amplia del peso y configuración, con lo cual un mejor conocimiento de la magnitud del daño que causará. Con la agrupación de los ejes en distintos intervalos de pesos, se obtendrá un cálculo de los ejes de diseño más preciso y con esto un diseño más cercano a la realidad del tránsito.

Por el contrario, si el conteo es realizado por tipo de vehículo y la asignación de un valor representativo del factor camión, se podría estar sobrediseñando o subdiseñando para ese tipo de vehículo; ya que su peso puede que esté muy por debajo o encima del valor con que fue calculado el factor. Con ello, para una gran cantidad de tránsito, se obtendrá valores de ejes equivalentes con cierto porcentaje de error.

Tal caso se presenta en Costa Rica que carece de las instalaciones de sistemas automáticos de pesaje y conteo de vehículos, por lo cual se debe de utilizar el factor camión para el cálculo de los ejes equivalentes, lo que podría generar cierto error en el cálculo aun

agravándose más por un uso del factor no proporcional al peso del vehículo.

Es importante tener en cuenta que para la obtención de los factores equivalentes de carga se debe suponer inicialmente el número estructural, el cual será comparado con el obtenido en el diseño, y si la diferencia es considerable y así lo considera el diseñador deberá calcular de nuevo los ejes equivalentes realizando una nueva iteración en el diseño. Usualmente el número estructural toma valores entre 5 o 6.

Cuando la subrasante presente pobres condiciones, el número estructural requerido del pavimento presentará un valor alto para así proteger el terreno sobre el que estará apoyada la estructura de pavimento. Además con un número estructural alto el daño producido por las cargas del tránsito será menor, esto se puede evidenciar observando los cuadros con los diferentes valores para los factores equivalentes de carga en la sección de anexos (cuadros AN1-AN9). Por ejemplo para un eje simple con un peso de 44 klb con un número estructural de 1, el daño producido es de 61,8 veces el daño producido por un eje estándar y para un número de 5 el daño es 45,7.

Además a mayor PSI final asignado menor será el daño ya que la estructura se está diseñando con factores que demanda una mayor calidad y un mayor espesor.

También se debe tener en cuenta que los ejes simples son los que producen un mayor daño comparado con los ejes tándem y trídem, debido a que estos distribuyen en una menor área su peso.

Para la rehabilitación, existen diferentes formas de determinar el módulo resiliente de la subrasante y número estructural del pavimento como es la viga Benkelman o la caracterización de los materiales, que presentan datos con ciertas inconsistencias. Por ejemplo, el ensayo de la viga Benkelman no es tan reproducible, obteniendo datos con variaciones cuando se realice el mismo ensayo en el mismo lugar y debiéndose de realizar diferentes correlaciones para la obtención de los valores de diseño, además de que el ensayo solo brinda deflexiones superficiales en el punto de aplicación de la carga más no a varias distancias dificultando la estimación de módulo resiliente de la subrasante; o cuando se realice la caracterización de los

materiales que se depende del criterio de la persona que realice la inspección.

Por lo cual, para determinar si es necesaria la rehabilitación y para la obtención de los valores necesarios para el retro-cálculo, se debería hacer uso del deflectómetro de impacto; ya que es un ensayo no destructivo y presenta un mayor rango de confiabilidad y representatividad.

Este proyecto presenta el desarrollo de una aplicación electrónica para el diseño de pavimentos que ayudará al diseñador o la persona o institución interesada a que realice los cálculos en menor tiempo, sin la necesidad de utilizar en gran medida los monogramas de la AAHSTO ni tener que realizar varias iteraciones para encontrar la respuesta a sus necesidades.

En la sección de resultados (cuadros 18, 19, 20 y 21), se observa la comparación de un diseño realizado por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes y los resultados obtenidos con la herramienta de cálculo. Se aprecia que los porcentajes de diferencia son relativamente bajos. Por ejemplo, un valor de un 0,75% de diferencia en el coeficiente estructural de la base granular. Aunque también se presenta un valor que se puede considerar alto del 12% de diferencia; esto debido a que los coeficientes obtenidos si bien es cierto son bajos, las diferencias con respecto a los valores del MOPT, ocasiona que el espesor del relleno presente una cierta variabilidad con el dato comparado.

Al verificar todos los datos, se puede mencionar que la hoja de cálculo presenta datos fiables y seguros.

Factor camión

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes utiliza en gran medida la obtención de los ejes equivalentes de carga por medio de la asignación de un factor camión a los diferentes tipos de vehículos, con lo cual se realizó un análisis de datos de las estaciones de pesaje existentes en la región.

El cuadro 2 presenta la cantidad de vehículos estudiados para un total de 3559460, diferenciados por su configuración. A partir de los pesos, se procede a determinar los factores camión para cada clase de vehículo en donde se puede observar el cuadro 3 un resumen de estos factores.

Es importante tener en cuenta que estos pesos están basados en el percentil 95.

La decisión por la cual se utiliza el percentil 95 se debe a que una pequeña porción de los datos estudiados presentan valores muy elevados y dispersos, que no es lo usual, ya que si se utilizaran alterarían los valores habituales de los factores camión, lo que haría que el estudio y los valores numéricos pierdan validez.

En el cuadro 4, se presenta la comparación ente los factores camión obtenidos contra los utilizados por el Departamento de Diseño del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, la directriz DVOP-5170-07 y los recomendados por LANAMME.

Se puede observar que para el tipo de vehículo C2 el valor asignado por el MOPT es muy similar o prácticamente igual al obtenido de las estaciones de pesaje con un valor de 0,95, pero el utilizado en la directriz y el recomendado por LANAMME son menores.

En cuanto al valor calculado de las estaciones de pesaje para los buses C2, presenta un valor de 1,346; el cual es mucho mayor al utilizado por el MOPT el cual es 0,95. A diferencia al emitido en la directriz que se encuentra en el intervalo de 1,25-2,29.

Para los camiones tipo C3, se obtiene un valor de 1,413 situándose en el límite inferior recomendado por LANAMME, y siendo similar al utilizado por el MOPT y estando por encima al emitido por la directriz.

Por último para el tipo T3-S2, el factor camión asignado es de 2,665 estando en el intervalo de la directriz y LANAMME. En cuanto al factor camión utilizado por el MOPT, se da una muy baja diferencia.

Además, se puede observar en el mismo cuadro el porcentaje de diferencia entre el valor del MOPT y el calculado en este proyecto, evidenciando porcentajes de diferencia muy bajos para los vehículos C2, C3 Y T3-S2, aunque para C2 bus si se presenta un porcentaje alto con un valor del 41,68%.

A partir de los factores camión brindados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, se aprecia que apenas cuentan con factores para 6 tipos diferentes de vehículos siendo livianos, carga liviana, C2, C2 buses, C3 y T3-S2.

Esto puede provocar un cierto faltante de factores, ya que según el estudio realizado, existen otras configuraciones que usualmente circulan por las diferentes vías en estudio, como

los vehículos tipo C2-R2, T3-S3, T2-S2-S2, entre otros. Lo cual puede ocasionar que el cálculo de los ejes equivalente de diseño presente un porcentaje de error considerable.

En el cuadro 2 así como en apéndices (apéndice 3) se tienen los diferentes factores calculados en la cual se observa valores que van desde 0,899 hasta 6,779.

En el figura 10 se presenta un histograma con las diferentes cantidades de los vehículos que mayormente son pesados en las vías en estudio. Presentado el T3-S2 la mayor cantidad de vehículos estudiados seguido por el vehículo tipo C2.

Mediante las figuras 11, 12, 13 y 14 se presentan la distribución de las magnitudes del factor camión.

Para los vehículos tipo camión unitario el que presenta un factor camión más alto es el C4 (bus) con un valor de 1,651 mientras que el C2 el menor con 0,955.

Para el camión con remolque el que produce un mayor daño C3-R3 tomando un valor de 5,680 y el que produce un menor daño es el tipo C2-R3 con un valor de 2,289.

Para el tracto-camión, el vehículo con un mayor daño es el T3-S1-2 con un valor de 4,954, mientras que el factor más pequeño es presentado por el T4-S2.

Por último los vehículos T2-S1-S1 producen el mayor daño para este grupo y el vehículo T2-S2-S2 y T3-S2-S2 presenta valores similares.

Los vehículos antes mencionados ocasionan un mayor deterioro sobre la estructura de pavimento por que presentan en su mayoría configuraciones de ejes simples, tal es el caso para los vehículos tipo C3-R3, que presenta el siguiente arreglo en sus ejes: 2 ejes simples y 2 tándem. También los pesos, cuando son relativamente altos, ocasionan que el factor camión se acreciente, ya que el deterioro aumenta en forma exponencial al incrementarse el peso en un área menor.

Es de vital importancia considerar todos los tipos de vehículos que circulan por las vías que se diseñarán y no excluir ninguno aunque se presente muy poco tránsito. Esto se puede ejemplificar en el estudio realizado, ya que los vehículos C2 presentan un factor relativamente bajo pero existe gran fluencia de tránsito, mientras que para los vehículos C3-R3 un tránsito pequeño pero evidenciando un daño

considerable. Con lo cual ambos tipos de vehículos contribuyen con cierto valor a la cantidad de ejes equivalentes de carga.

En el cuadro 2, se presenta la cantidad de vehículos que sobrepasan los pesos máximos permisibles. Evidenciándose gran variabilidad (porcentajes altos y bajos) en el porcentaje de vehículos que irrespetan la legislación en pesos, por ejemplo en la estación 1, el porcentaje para los C2 con sobrepeso es de 0,29%; al contrario de los vehículos tipo C4 con un porcentaje del 62,07%.

Al totalizar la cantidad de vehículos por estación y el total de vehículos con sobrepeso, se obtienen los siguientes porcentajes:

- Estación 1: 2,04%
- Estación 2: 3,01%
- Estación 3: 5,13%
- Estación 4: 1,99%
- Estación 5: 1,91%

Como se puede apreciar que el valor más bajo es del 1,99% representado por 15840 vehículos con sobrepeso de un total de 775486, hasta el porcentaje más alto del 5,13%, siendo 18720 vehículos con sobrepeso de un total 938702. Por lo cual analizando los resultados, se puede decir que el porcentaje de vehículos que irrespetan el peso máximo permisible es relativamente bajo, pero no siendo razón para descuidar el control y tratar de bajar a casi cero estos porcentajes, para evitar el deterioro de las vías por causa de pesos excesivos.

Además, se realizó el cálculo del factor camión con los pesos contenidos en el diario oficial La Gaceta (ver cuadro 5 y apéndice 4), para conocer el daño que se produce con estos valores.

Al comparar los factores camión obtenidos de las estaciones con los de los pesos máximos (ver cuadro 6), se observa que estos últimos son mucho mayores a los obtenidos con las estaciones.

Por lo cual, se puede indicar que considerando en conjunto el daño que produce cada vehículo estudiando (estaciones de pesaje) es menor al estipulado como máximo.

En el cuadro 15, se tiene para un tipo de vehículo T3-S3 un factor camión de 3,151 para el peso establecido, al contrario con un sobrepeso (ver cuadro 15), el factor es de 16,17. Siendo 5 veces más el deterioro que se causará. Por tal

motivo, es importante mantener un control estricto en el peso de los vehículos; para así evitar el deterioro acelerado del pavimento y la disminución de la vida en servicio de la estructura.

Es importante destacar que estos factores camión son determinados con base en el tránsito de las rutas establecidas y que su uso sobre otras rutas debe de realizarse manteniendo las previsiones del caso. Donde lo óptimo sería realizar un proceso de pesaje de los vehículos que transiten por esa zona y con ello obtener un diseño más fiable.

Conclusiones

Se investigó la aplicación de la metodología de diseño AASHTO 93 en Costa Rica en donde se mencionan las siguientes mejoras:

- Utilizar el módulo resiliente de los materiales para el diseño ya que brinda un mayor nivel de confianza.
- Utilizar, en la medida de lo posible, el deflectómetro de impacto para realizar el retrocálculo y con ello, determinar el espesor de la sobrecapa o recapa.
- Mantener un control estricto en el mantenimiento de la estructura ya que es un punto importante para evitar el deterioro acelerado y gastos elevados en su reparación y rehabilitación.
- Incluir en el cálculo de los ejes equivalentes de carga todos los vehículos de circulación, ya que estos contribuye en el daño causado sobre el pavimento.

Se identificaron los factores que intervienen en el diseño de las estructuras nuevas y en su rehabilitación los cuales se encuentran materializados en la guía de diseño y en la hoja de cálculo.

Se establece un mecanismo para el cálculo del factor camión el cual se puede visualizar en el manual para el diseño, además de poder realizar su cálculo en la herramienta.

Se realizó la comparación entre los factores camión utilizados por el Departamento de Geotecnia y Materiales y los obtenidos en este proyecto, en donde se encontró que el porcentaje de diferencia es menor al 1% excepto para el dato C2 bus donde la diferencia es del 41,68%.

Al comparar los pesos de los vehículos con los pesos máximos permisibles se obtiene que el porcentaje más alto de los vehículos con sobrepeso representa un 5,13% en la estación 3 y el menor porcentaje se presenta en la estación 5 con un 1,91%.

El daño que causa cada tipo de vehículo estudiado es menor al ocasionado por los vehículos con los pesos máximos permisibles.

Mantener un control estricto en los pesos de los vehículos cerciorándose que no se sobrepase el peso máximo establecido y con ello, evitar la pérdida de vida útil del pavimento en forma acelerada.

Se elaboró una guía para el diseño estructural de pavimentos flexibles, con la cual se podrá obtener los parámetros necesarios para el cálculo de los espesores que componen un pavimento nuevo y, además, las dimensiones para ya sea una sobrecapa o un recarpeteo.

Se realizó la herramienta de cálculo que ayudará al diseñador en la obtención del número de ejes, configuración del paquete estructural del pavimento y el número de pasadas para la falla de la estructura.

La hoja de cálculo contribuirá a disminuir el tiempo dedicado en realizar el diseño ya que entre otras cosas no se deberán utilizar los diferentes monogramas para la obtención de las variables necesarias para el diseño como es el número y coeficiente estructural.

Se comprobó la eficiencia de la herramienta de cálculo por medio de ejemplos y diseños suministrados por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes en donde se observó que las diferencias en los resultados son relativamente bajas.

Se elaboró un manual de uso para la herramienta electrónica que se puede acceder en la sección de apéndices.

Recomendaciones

El cálculo de los ejes equivalentes de carga se debería realizar a partir del conteo de los ejes por medio de estaciones de pesaje (sensores peso-movimiento) donde se contabilice la cantidad, configuración y peso de cada vehículo.

Se debería incluir en los diseños del MOPT más factores camión para abarcar una mayor cantidad de vehículos, y así realizar el cálculo de los ejes equivalentes de carga y hacer que el diseño sea más confiable.

Los factores camión obtenidos representan a los vehículos que transitan por las cinco diferentes estaciones estudiadas, por lo cual para otras rutas se debería realizar los cálculos respectivos o utilizar tales factores con las previsiones del caso.

Prestar especial atención al valor del factor camión para el vehículo C2 bus utilizado por el MOPT en el diseño, ya que este presenta un porcentaje de diferencia relativamente alto.

Realizar un control y seguimiento de los pavimentos construidos y así conocer su comportamiento y el cumplimiento de los parámetros como el periodo de diseño.

El cálculo del número de aplicaciones de ejes para que se presente la falla por fatiga y deformación permanente se debería de utilizar ecuaciones calibradas a la zona en estudio.

Ampliar la herramienta de cálculo en el diseño de mezclas asfálticas así como en la obtención del presupuesto para la estructura de pavimento.

Apéndices

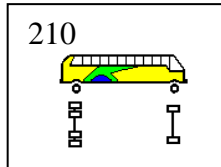
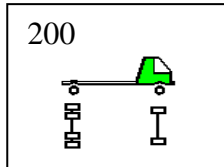
En los apéndices, se incluye lo siguiente:

- La simbología utilizada en la descripción de los vehículos.
- Las tablas y gráficos utilizados para obtener las ecuaciones que determinan el coeficiente estructural y módulo resiliente.
- Los factores camión obtenidos de los pesos de los vehículos correspondientes a las estaciones de pesaje.
- Los factores camión obtenidos de los pesos máximos permisibles correspondientes a los publicados en el diario oficial La Gaceta.
- El manual de uso para la herramienta de cálculo.

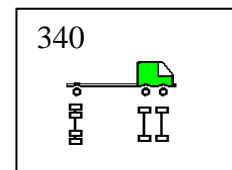
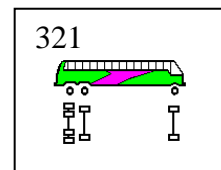
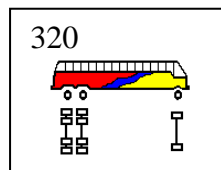
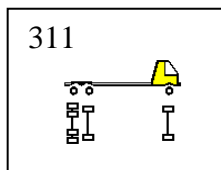
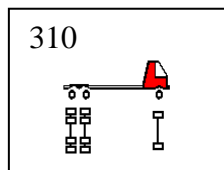
Apéndice 1: Simbología utilizada en los vehículos

Camión unitario

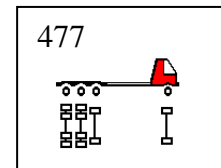
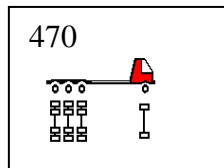
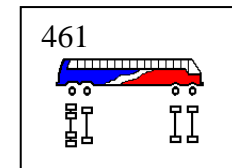
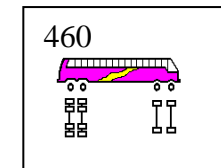
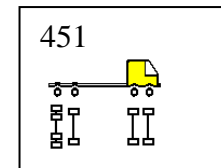
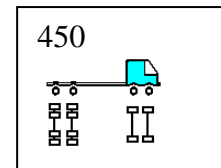
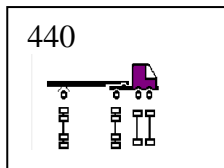
C2



C3

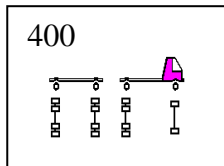


C4

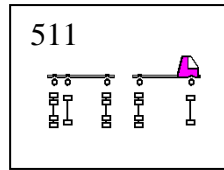
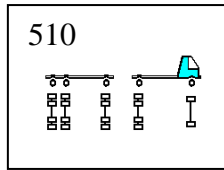


Camión con remolque

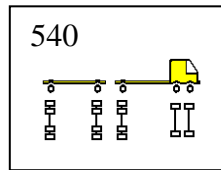
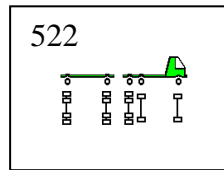
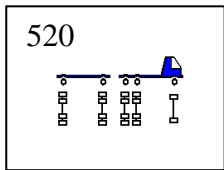
C2-R2



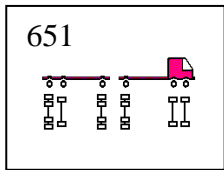
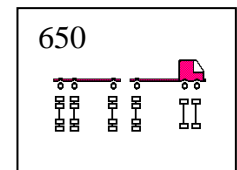
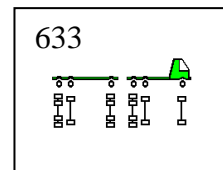
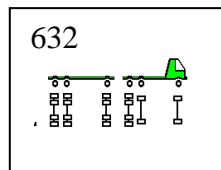
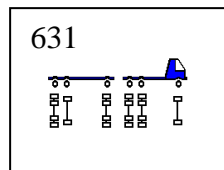
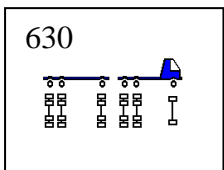
C2-R3



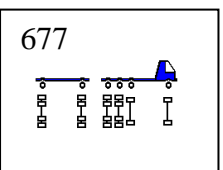
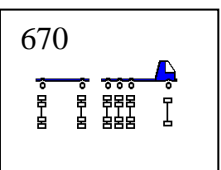
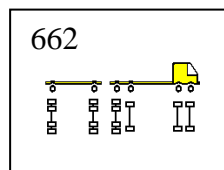
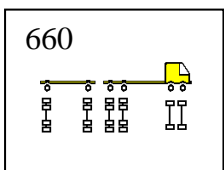
C3-R2



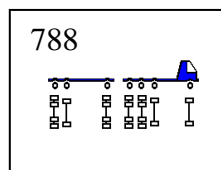
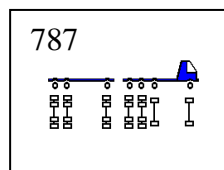
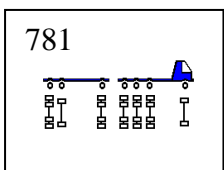
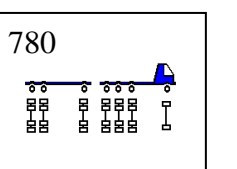
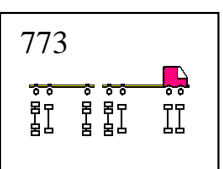
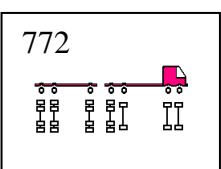
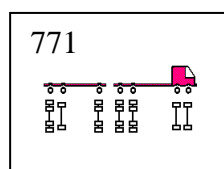
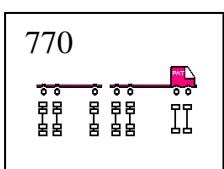
C3-R3



C4-R2

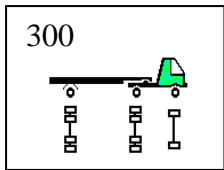


C4-R3

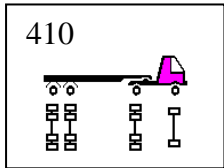


Tractocamión con semirremolque

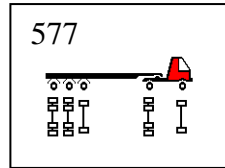
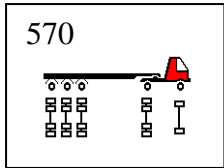
T2-S1



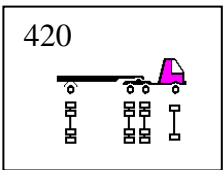
T2-S2



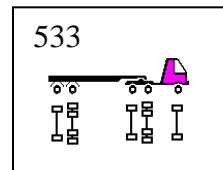
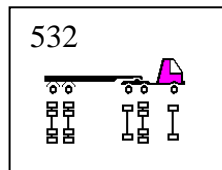
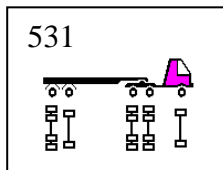
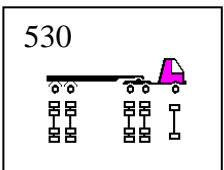
T2-S3



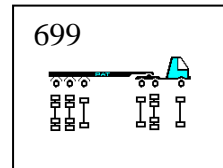
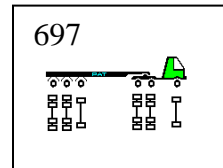
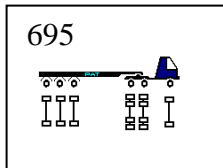
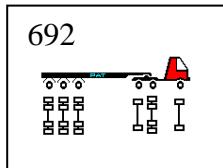
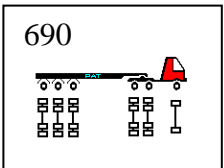
T3-S1



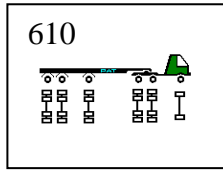
T3-S2



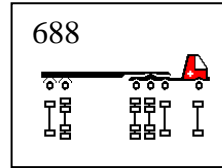
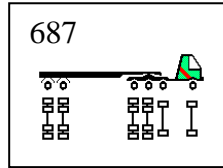
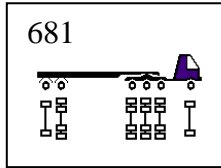
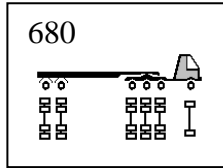
T3-S3



T3-S1-2

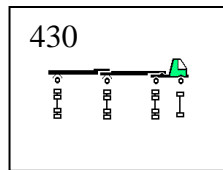


T4-S2

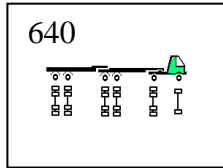


Tracto camión con doble semirremolque

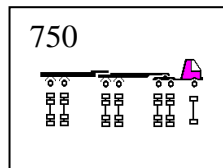
T2-S1-S1



T2-S2-S2



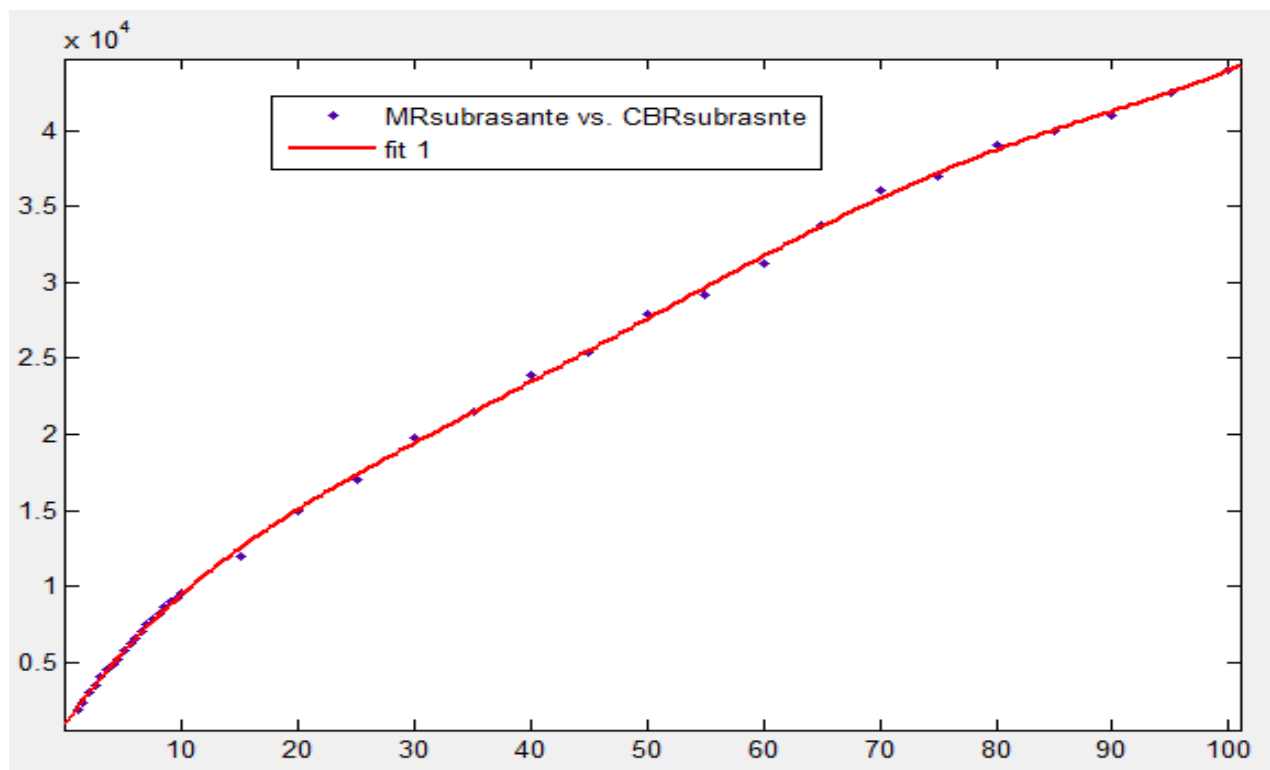
T3-S2-S2



Apéndice 2: Cuadros y figuras obtenidas de Matlab para obtener las ecuaciones para módulo resiliente y coeficiente estructural

Cuadro AP2-1. Datos de CBR y MR de la sub rasante	
CBR	MR (psi)
100,0	44000
95,0	42500
90,0	41000
85,0	40000
80,0	39000
75,0	37000
70,0	36000
65,0	33800
60,0	31200
55,0	29200
50,0	27900
45,0	25400
40,0	23900
35,0	21500
30,0	19800
25,0	17000
20,0	15000
15,0	12000
10,0	9600
9,5	9200
9,0	9000
8,5	8600
8,0	8200
7,5	7800
7,0	7450
6,5	7000
6,0	6600
5,5	6200
5,0	5800
4,5	5200
4,0	4900
3,5	4500
3,0	4100
2,5	3500
2,0	3050
1,5	2400
1,0	1890

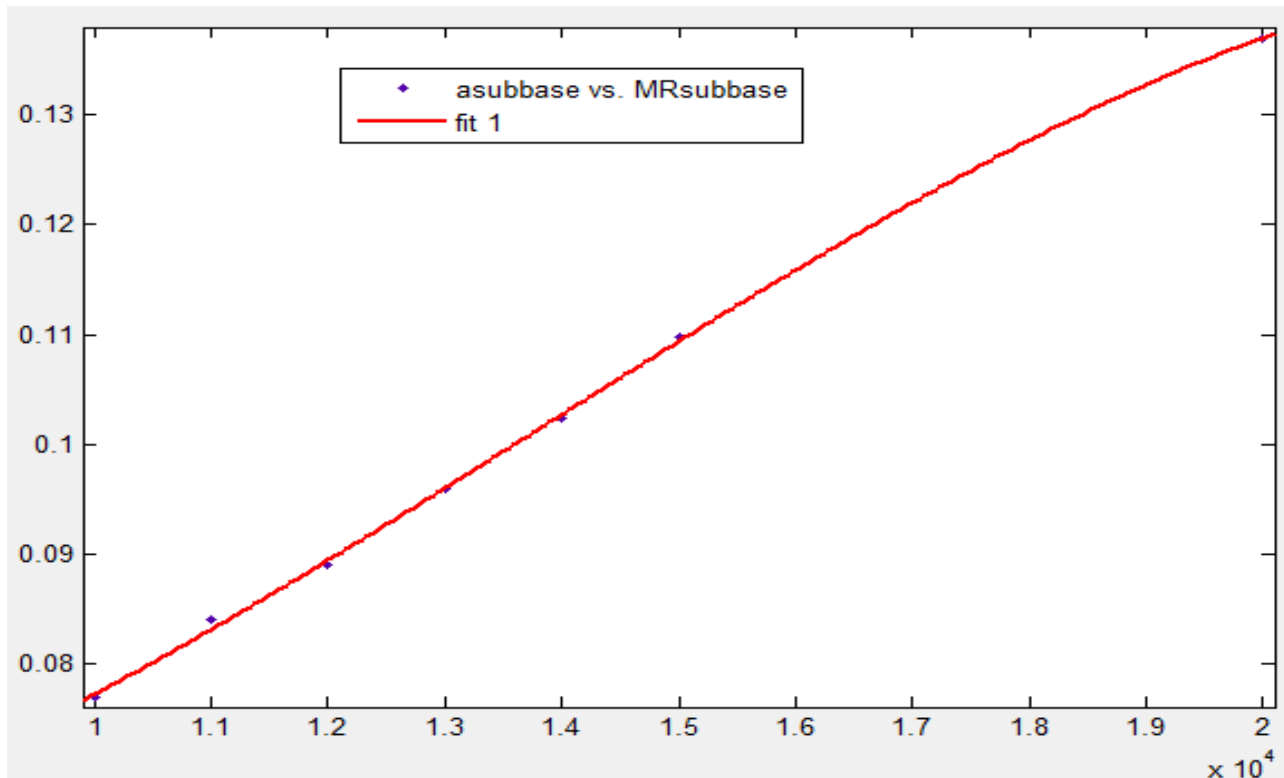
Figura AP2-1. Gráfico MR de subrasante versus CBR subrasante $R^2 = 0,9997$



Cuadro AP2-2. Datos de MR y coeficiente estructural de sub base

Módulo resilente (psi)	Coficiente estructural
20000	0,137
15000	0,110
14000	0,102
13000	0,096
12000	0,089
11000	0,084
10000	0,077

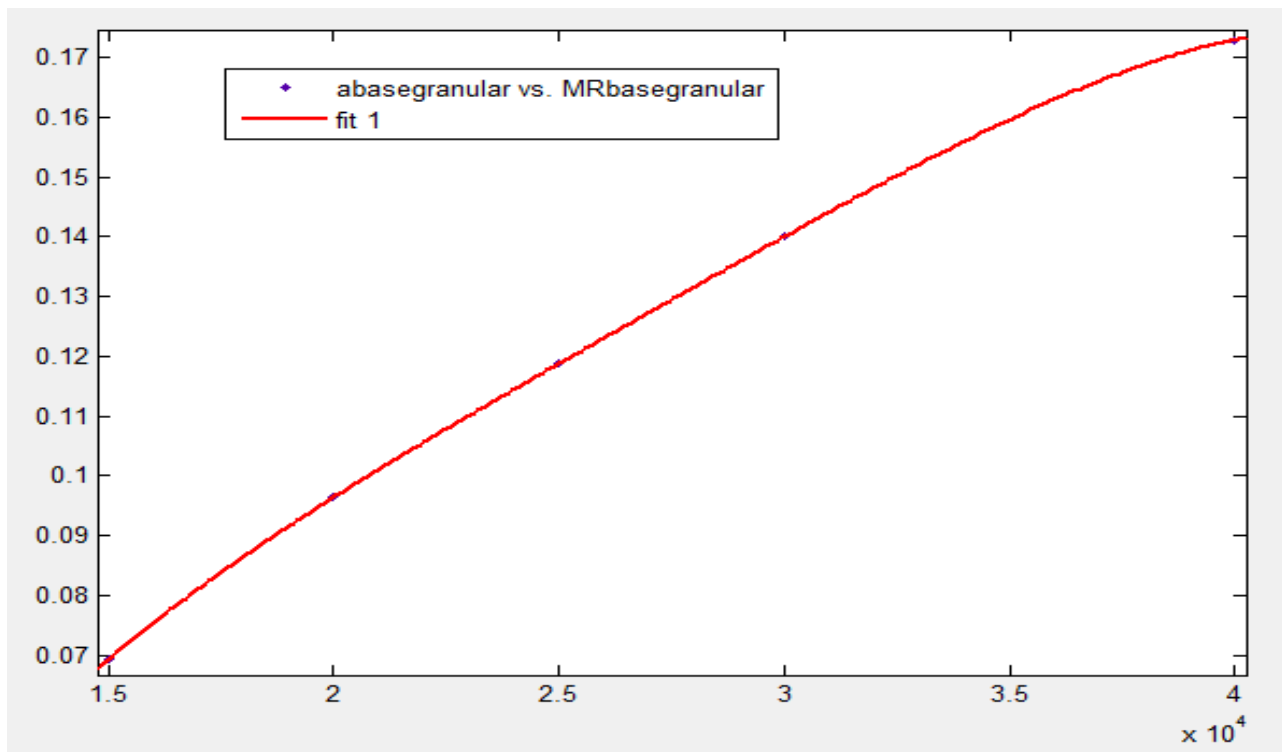
Figura AP2-2. Gráfico de coeficiente estructural versus módulo resiliente de sub base, $R^2 = 0,9995$



Cuadro AP2-3. Datos de MR y coeficiente estructural de base granular

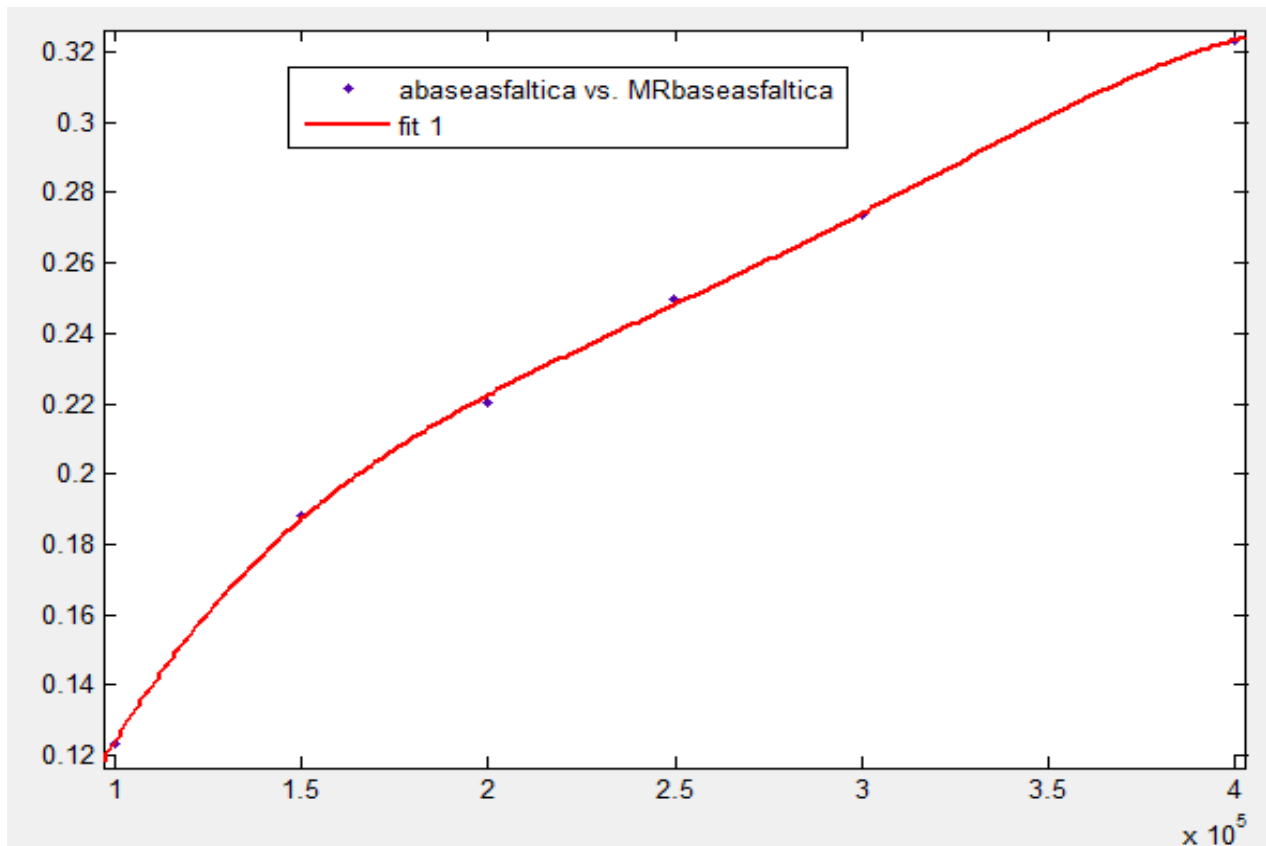
Módulo resiliente (psi)	Coficiente estructural
40000	0,173
30000	0,140
25000	0,119
20000	0,096
15000	0,069

Figura AP2-3. Gráfico de coeficiente estructural versus módulo resiliente de base granular, $R^2 = 1$



Cuadro AP2-4. Datos de MR y coeficiente estructural de base asfáltica	
Módulo resiliente (psi)	Coficiente estructural
400000	0,335
300000	0,275
250000	0,250
200000	0,220
150000	0,190
100000	0,125

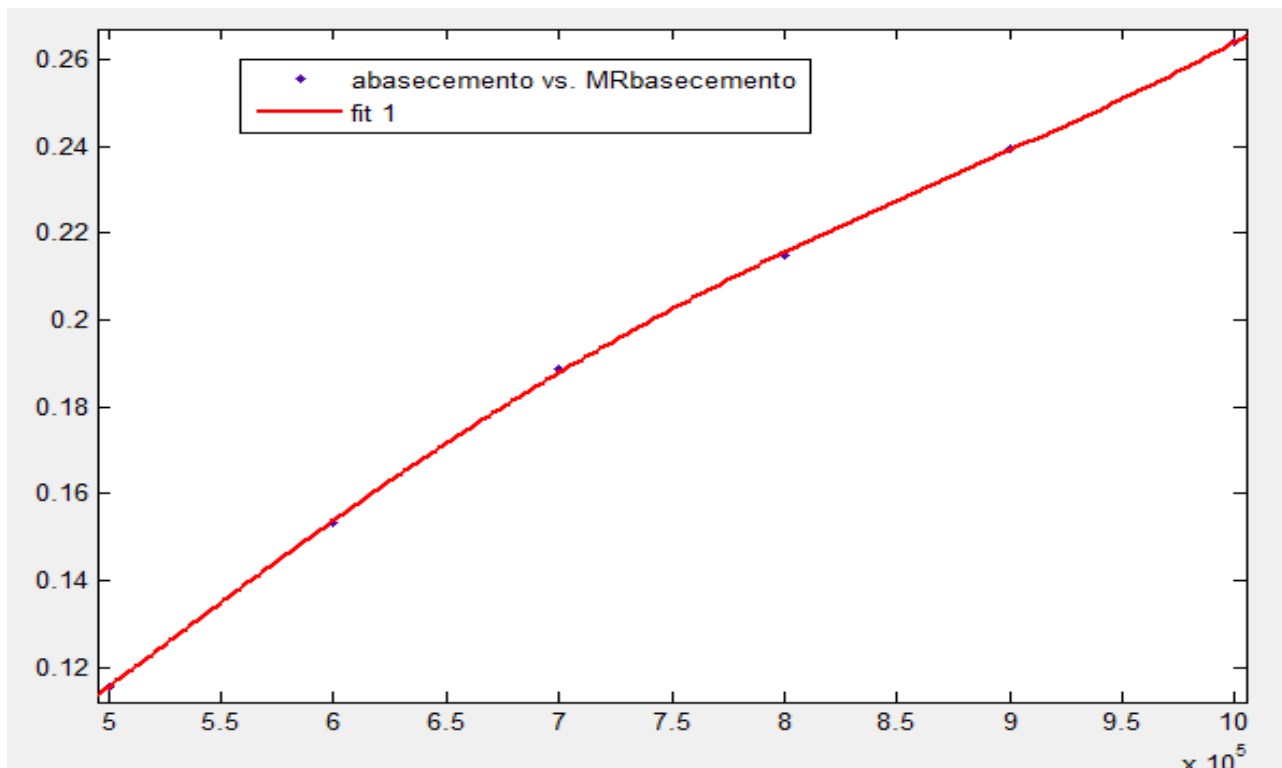
Figura AP2-4. Gráfico de coeficiente estructural versus módulo resiliente de base asfáltica, $R^2 = 0,9996$



Cuadro AP2-5. Datos de MR y coeficiente estructural de base estabilizada con cemento

Módulo resiliente (psi)	Coeficiente estructural
1000000	0,264
900000	0,240
800000	0,215
700000	0,189
600000	0,154
500000	0,116

Figura AP2-5. Gráfico de coeficiente estructural versus módulo resiliente de base estabilizada con cemento, $R^2 = 0,9999$



Cuadro AP2-6. Datos de CBR y coeficiente estructural para sub base

CBR	Coficiente estructural
100,0	0,140
70,0	0,133
50,0	0,125
40,0	0,119
30,0	0,109
20,0	0,095
10,0	0,081
5,0	0,053

Cuadro AP2-7. Datos de coeficiente estructural y MR para sub base	
Coeficiente estructural	Módulo resiliente (psi)
0,137	20000
0,110	15000
0,102	14000
0,096	13000
0,089	12000
0,084	11000
0,077	10000

Figura AP2-6. Gráfico de coeficiente estructural versus CBR de sub base, $R^2 = 0,9878$

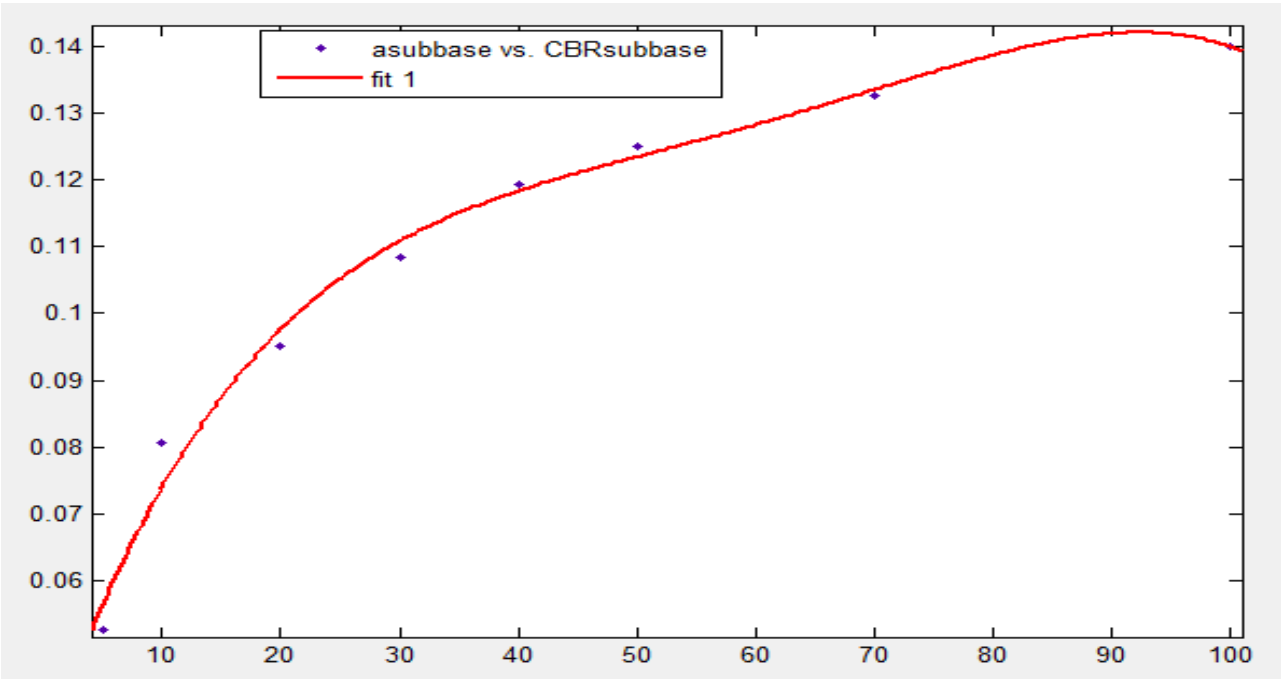
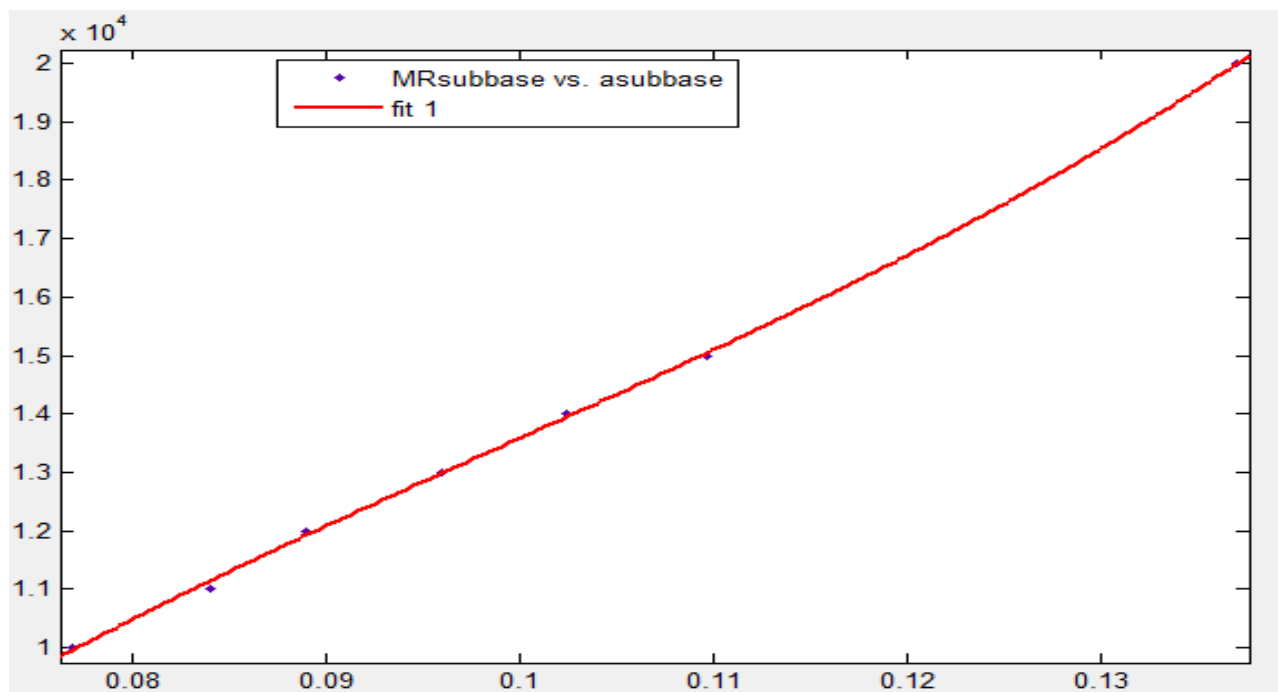


Figura AP2-7. Gráfico de módulo resiliente versus coeficiente estructural de sub base, $R^2 = 0,9999$



Cuadro AP2-8 Datos de CBR y coeficiente estructural para base granular

CBR	Coeficiente estructural
100	0,140
70	0,129
60	0,124
50	0,116
40	0,106
30	0,095
20	0,071

Cuadro AP2-9. Datos de coeficiente estructural y MR para base granular	
Coeficiente estructural	Módulo resiliente (psi)
0,173	40000
0,140	30000
0,119	25000
0,096	20000
0,069	15000

Figura AP2-8. Gráfico de coeficiente estructural versus CBR de base granular, $R^2 = 0,9956$

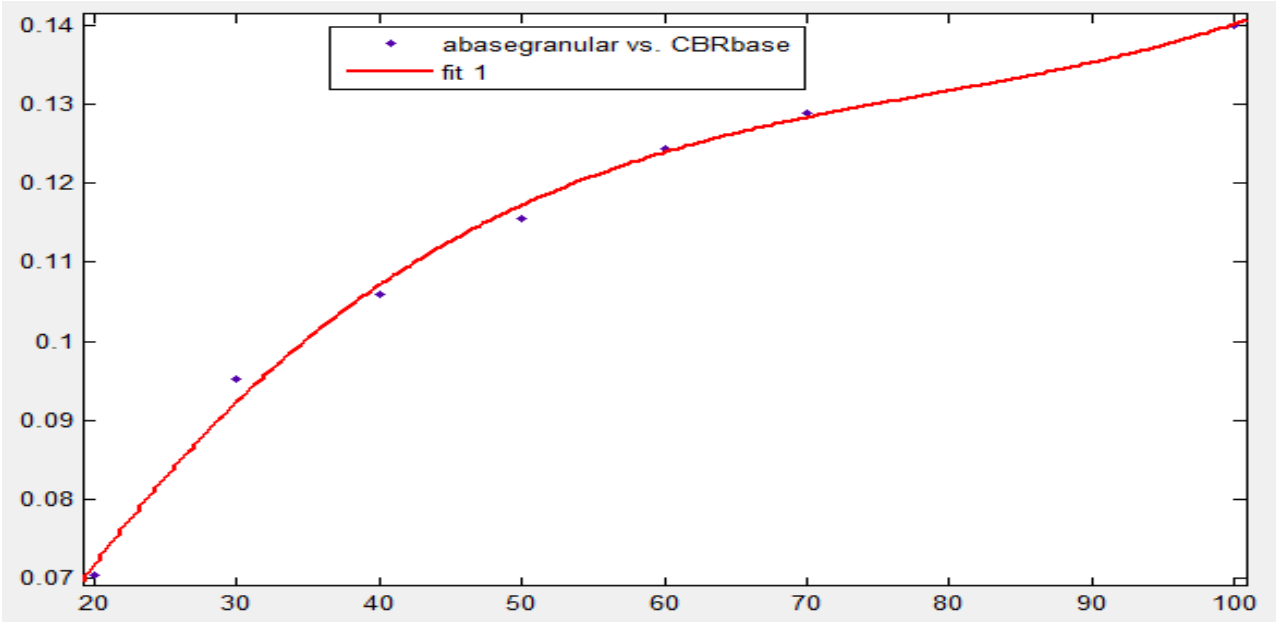
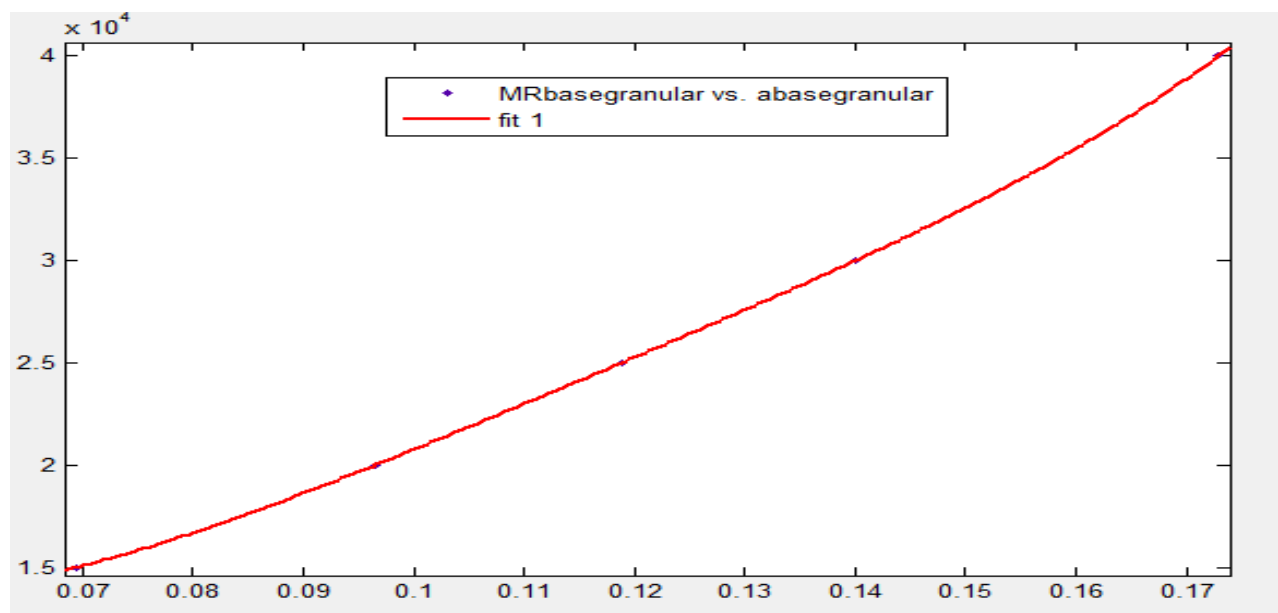


Figura AP2-9. Gráfico de módulo resiliente versus coeficiente estructural para base granular, $R^2 = 0,9995$



Cuadro AP2-10. Datos de estabilidad y coeficiente estructural para base asfáltica	
Estabilidad (lb)	Coeficiente estructural
1900	0,328
1800	0,318
1700	0,309
1600	0,299
1500	0,284
1400	0,274
1300	0,262
1200	0,249
1100	0,235
1000	0,229
900	0,216
800	0,203
700	0,191
600	0,178
500	0,168
400	0,159
300	0,145
200	0,123
100	0,094

Cuadro AP2-11. Datos de coeficiente estructural y MR para base asfáltica

Coeficiente estructural	Módulo resiliente (psi)
0,324	400000
0,274	300000
0,250	250000
0,221	200000
0,188	150000
0,124	100000

Figura AP2-10. Gráfico de coeficiente estructural versus estabilidad para base asfáltica, $R^2 = 0,9995$

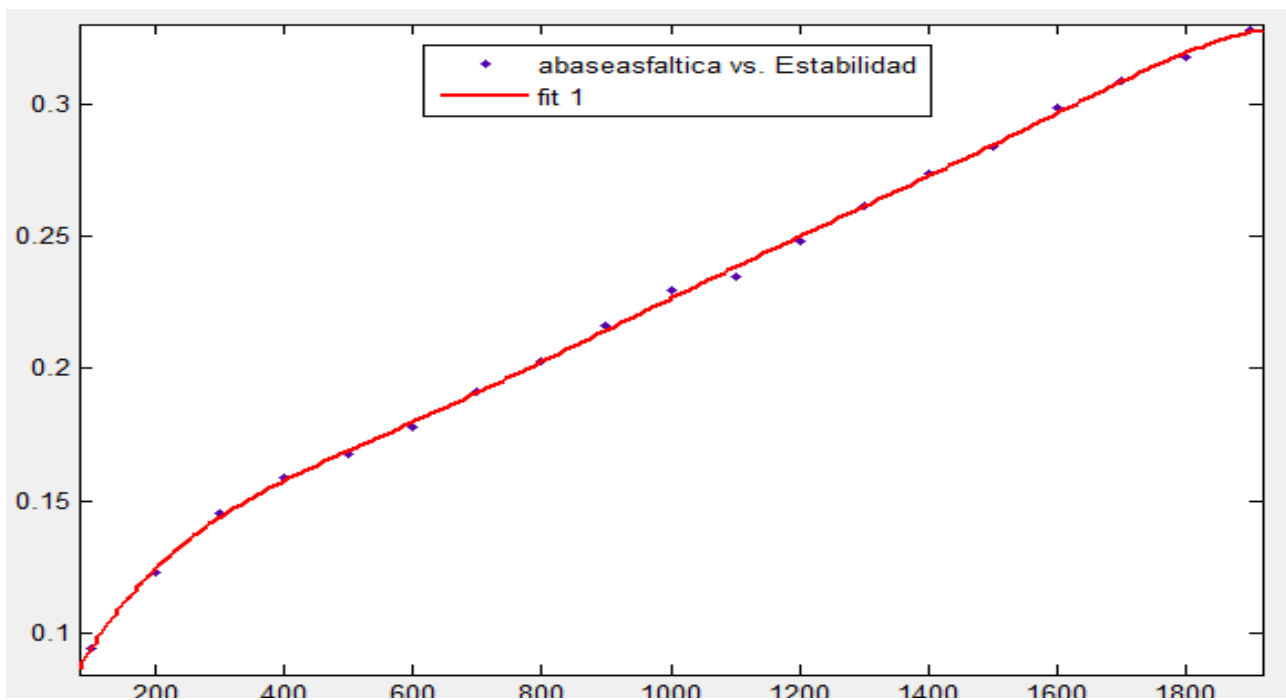
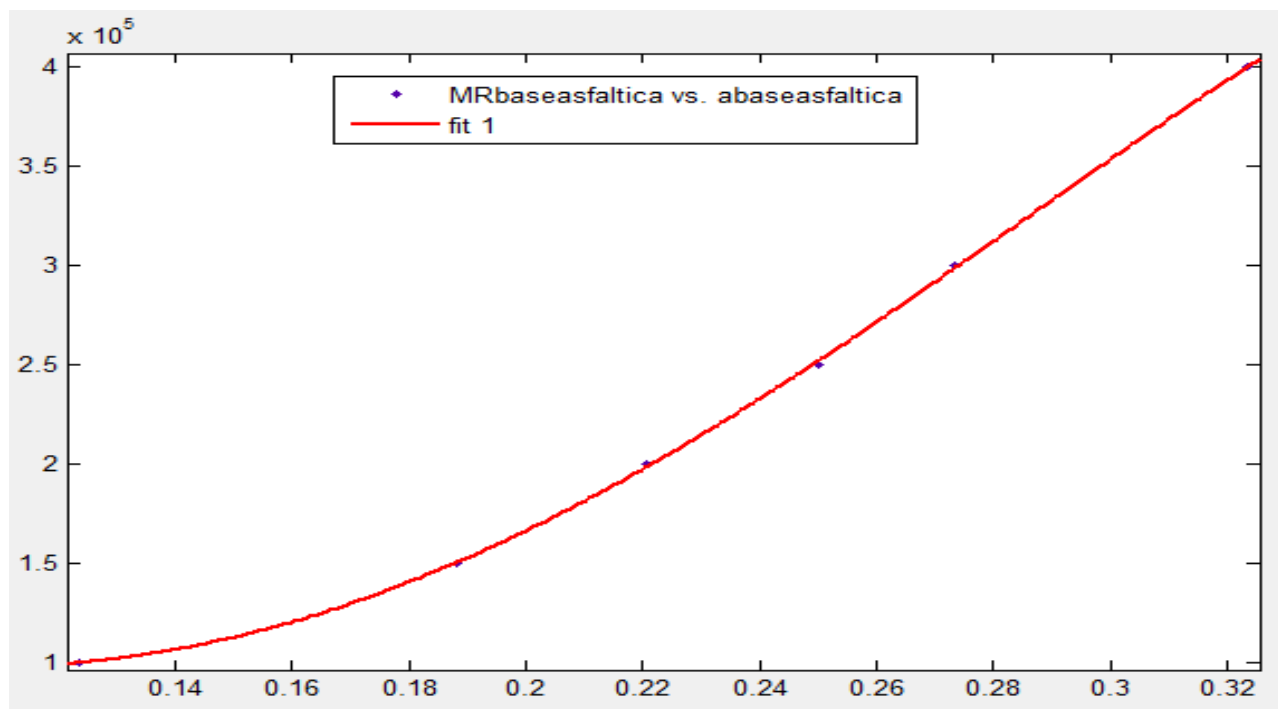


Figura AP2-11. Gráfico de módulo resiliente versus coeficiente estructural para base asfáltica, $R^2 = 0,9999$



Cuadro AP2-12. Datos de resistencia a la compresión y coeficiente estructural para base estabilizada con

F'c 7 días (Psi)	a
1000	0,250
800	0,220
600	0,188
400	0,155
200	0,125

Cuadro AP2-13. Datos de coeficiente estructural y MR para base estabilizada con cemento

Coeficiente estructural	Módulo resiliente (psi)
0,264	1000000
0,240	900000
0,215	800000
0,189	700000
0,154	600000
0,116	500000

Figura AP2-12. Gráfico de coeficiente estructural versus resistencia a la compresión para bases estabilizadas con cemento, $R^2 = 1$

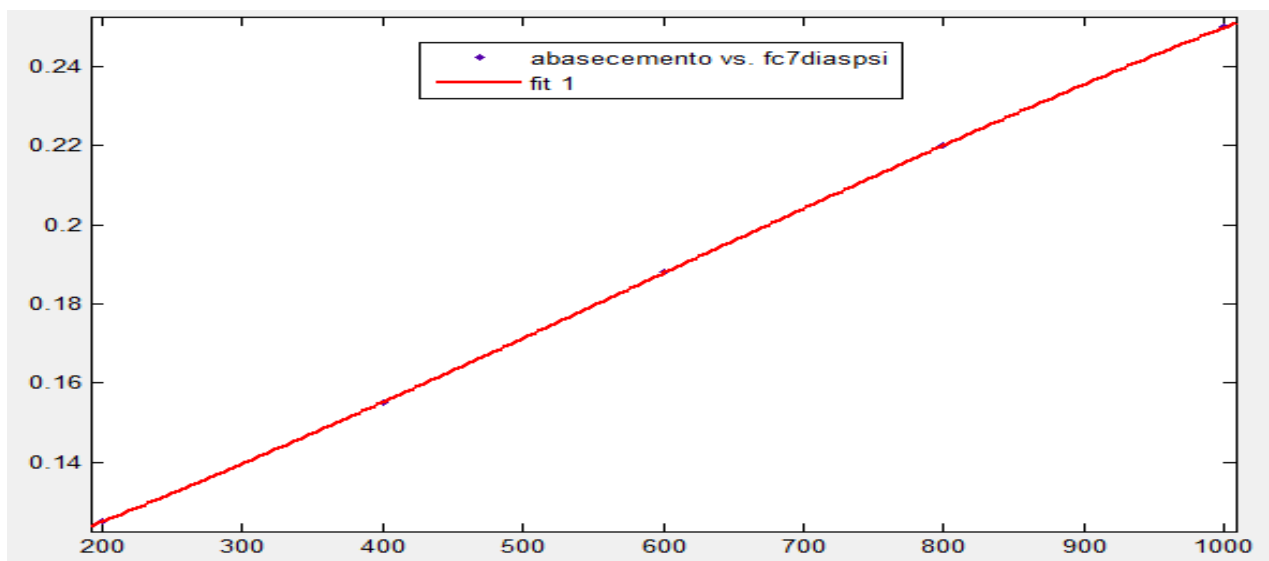
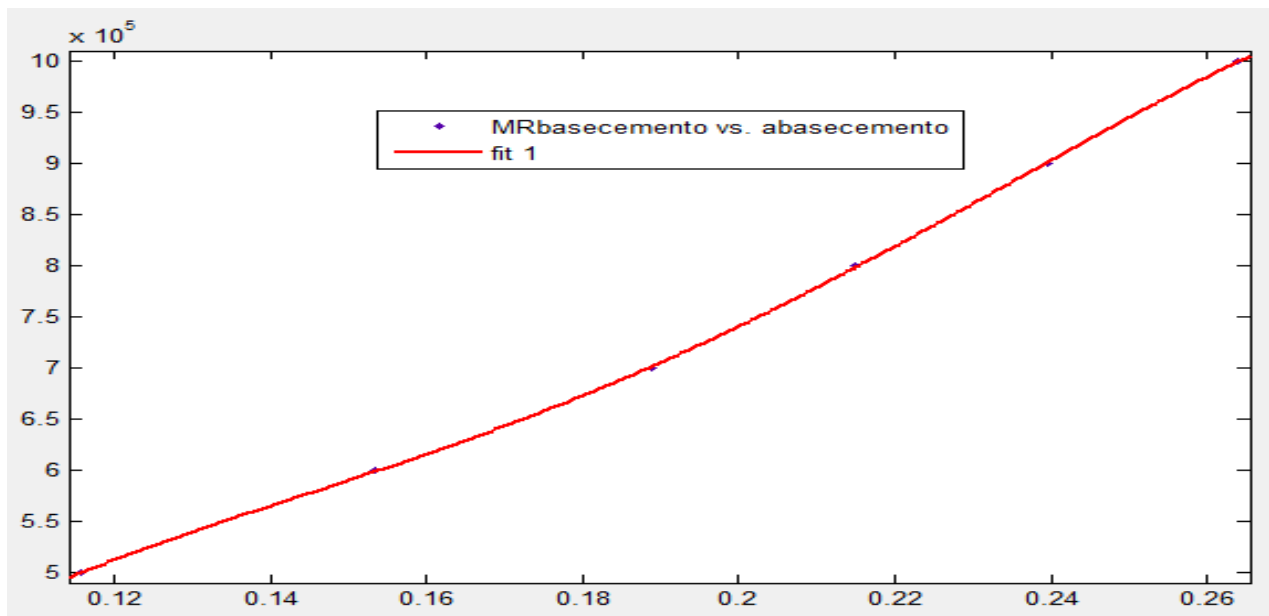


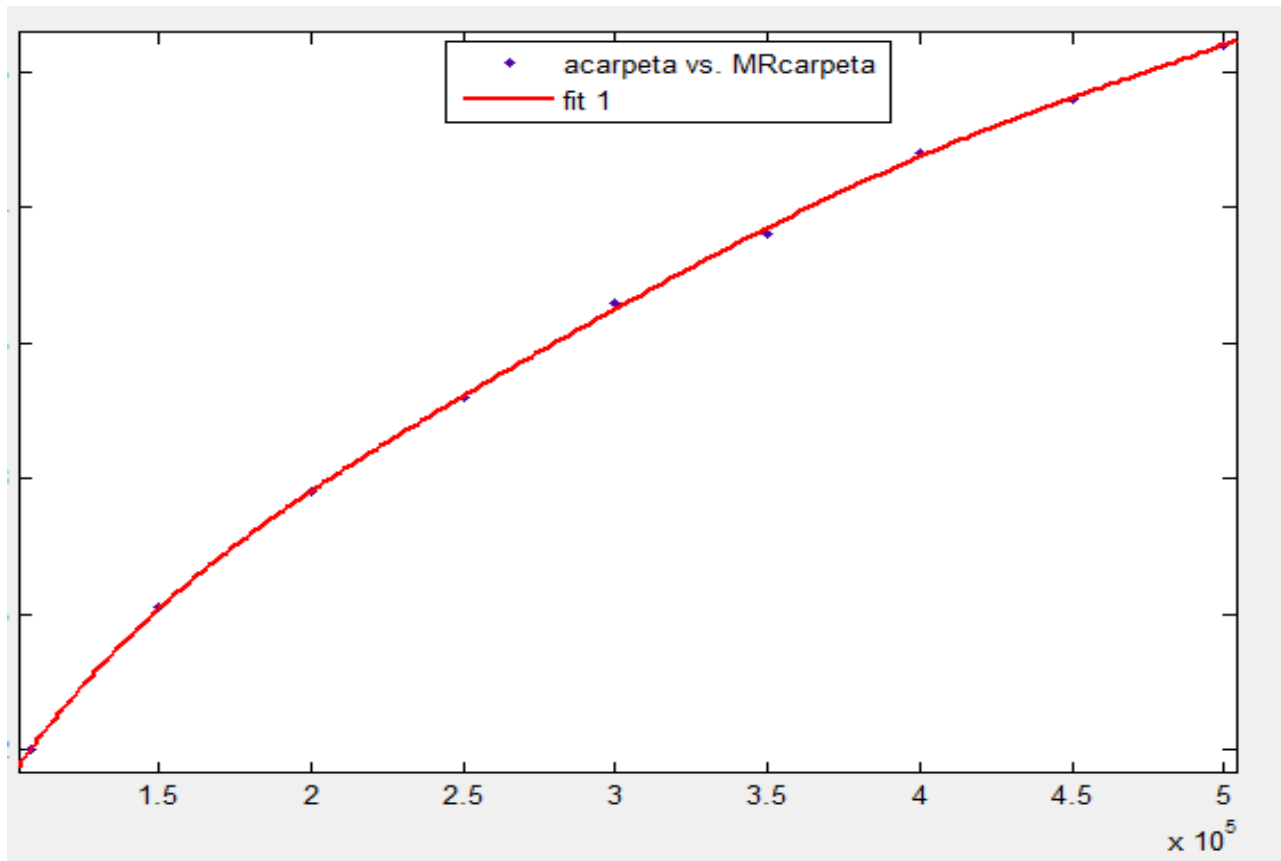
Figura AP2-13. Gráfico de módulo resiliente versus coeficiente estructural para base estabilizada con cemento, $R^2 = 1$



Cuadro AP2-14. Datos de coeficiente estructural y MR para carpeta asfáltica

Coeficiente estructural	Módulo resiliente (psi)
500000	0,460
450000	0,440
400000	0,420
350000	0,390
300000	0,365
250000	0,330
200000	0,295
150000	0,253
107500	0,200

Figura AP2-14. Gráfico de coeficiente estructural versus módulo resiliente para base granular, $R^2 = 0,9995$



Apéndice 3. Factores camión

Cuadro AP3-1. Factor camión para C2, pt= 2						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
200	0,889	0,912	0,941	0,936	0,915	0,901
210	1,343	1,351	1,355	1,348	1,343	1,342

Cuadro AP3-2. Factor camión para C2, pt= 2,5						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
200	0,895	0,946	1,017	1,004	0,955	0,922
210	1,346	1,366	1,379	1,360	1,346	1,342

Cuadro AP3-3. Factor camión para C2, pt= 3						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
200	0,902	0,996	1,134	1,106	1,012	0,952
210	1,349	1,389	1,425	1,384	1,353	1,344

Cuadro AP3-4. Factor camión para C3, pt= 2						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
310 y 311	1,554	1,382	1,352	1,440	1,520	1,567
320 y 321	1,017	0,917	0,913	0,969	1,011	1,033
340	1,170	1,154	1,160	1,170	1,175	1,176

Cuadro AP3-5. Factor camión para C3, pt= 2,5						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
310 y 311	1,480	1,152	1,115	1,264	1,413	1,507
320 y 321	0,971	0,783	0,787	0,884	0,962	1,007
340	1,161	1,129	1,140	1,162	1,172	1,175

Cuadro AP3-6. Factor camión para C3, pt= 3						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
310 y 311	1,386	0,934	0,922	1,095	1,291	1,433
320 y 321	0,915	0,657	0,691	0,804	0,907	0,974
340	1,150	1,100	1,119	1,153	1,168	1,173

Cuadro AP3-7. Factor camión para C4, pt= 2						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
440	0,702	0,674	0,693	0,712	0,717	0,717
450	1,936	1,666	1,615	1,758	1,886	1,958
460	1,849	1,593	1,550	1,687	1,807	1,872
470 y 477	1,378	1,207	1,271	1,389	1,469	1,510

Cuadro AP3-8. Factor camión para C4, pt= 2,5						
	SN					
Tipo de camión	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
440	0,685	0,639	0,689	0,716	0,719	0,718
450	1,821	1,296	1,210	1,464	1,717	1,867
460	1,740	1,243	1,167	1,414	1,651	1,790
470 y 477	1,195	0,920	1,031	1,229	1,377	1,461

Cuadro AP3-9. Factor camión para C4, pt= 3						
Tipo de camión	SN					
	1	2	3	4	5	6
	FC	FC	FC	FC	FC	FC
440	0,664	0,623	0,733	0,744	0,727	0,721
450	1,676	0,924	0,819	1,145	1,512	1,751
460	1,602	0,889	0,796	1,114	1,462	1,684
470 y 477	0,998	0,698	0,851	1,077	1,273	1,400

Cuadro AP3-10. Factor camión para camión con remolque, pt= 2							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
C2-R2	400	5,184	5,119	4,953	4,829	4,872	4,978
C2-R3	510 y 511	2,269	2,220	2,241	2,276	2,289	2,291
C3-R2	520 y 522	3,661	3,469	3,428	3,520	3,613	3,668
	540	2,040	2,036	2,084	2,102	2,085	2,069
C3-R3	630 y 632	6,779	6,064	5,759	6,000	6,384	6,662
	650	3,825	3,623	3,577	3,676	3,774	3,832
C4-R2	670 y 677	5,378	5,146	5,072	5,134	5,276	5,395
	660	1,769	1,654	1,660	1,728	1,772	1,793
C4-R3	780	5,781	5,214	5,136	5,377	5,689	5,911
	770	5,386	4,829	4,661	4,912	5,197	5,374

Cuadro AP3-11. Factor camión para camión con remolque , pt= 2,5							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
C2-R2	400	5,172	5,033	4,699	4,448	4,519	4,728
C2-R3	510 y 511	2,243	2,156	2,209	2,271	2,289	2,292
C3-R2	520 y 522	3,579	3,215	3,156	3,310	3,482	3,595
	540	2,030	2,032	2,142	2,177	2,134	2,096
C3-R3	630 y 632	6,495	5,124	4,596	4,974	5,680	6,243
	650	3,740	3,344	3,254	3,433	3,631	3,755
C4-R2	670 y 677	5,186	4,771	4,587	4,667	4,947	5,197
	660	1,717	1,503	1,536	1,652	1,728	1,769
C4-R3	780	5,338	4,351	4,170	4,538	5,120	5,574
	770	5,157	4,077	3,773	4,206	4,758	5,129

Cuadro AP3-12. Factor camión para camión con remolque, pt= 3							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
C2-R2	400	5,156	4,930	4,438	4,053	4,121	4,426
C2-R3	510 y 511	2,211	2,105	2,213	2,284	2,296	2,295
C3-R2	520 y 522	3,477	2,972	2,931	3,106	3,332	3,504
	540	2,019	2,040	2,242	2,291	2,205	2,134
C3-R3	630 y 632	6,139	4,202	3,547	3,937	4,874	5,725
	650	3,632	3,054	2,924	3,155	3,453	3,654
C4-R2	670 y 677	4,976	4,432	4,100	4,140	4,545	4,944
	660	1,651	1,369	1,466	1,601	1,685	1,741
C4-R3	780	4,851	3,607	3,308	3,670	4,457	5,153
	770	4,869	3,317	2,915	3,442	4,232	4,818

Cuadro AP3-13. Factor camión para tractocamión con semirremolque, pt= 2							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
T2-S1	300	5,496	5,398	5,184	5,080	5,169	5,296
T2-S2	410	3,826	3,641	3,531	3,565	3,670	3,760
T2-S3	570 y 577	2,396	2,241	2,278	2,375	2,453	2,498
T3-S1	420	4,175	3,963	3,811	3,829	3,953	4,069
T3-S2	530, 531, 532, 533	3,103	2,670	2,558	2,761	2,977	3,108
T3-S3	690, 692, 697, 699	2,812	2,396	2,375	2,599	2,806	2,928
T3-S1-2	610	5,970	5,207	4,936	5,227	5,617	5,889
T4-S2	680	1,741	1,517	1,537	1,673	1,774	1,828

Cuadro AP3-14. Factor camión para tractocamión con semirremolque, pt= 2,5							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
T2-S1	300	5,476	5,262	4,810	4,592	4,771	5,038
T2-S2	410	3,755	3,388	3,171	3,217	3,422	3,609
T2-S3	570 y 577	2,236	1,982	2,037	2,194	2,345	2,439
T3-S1	420	4,097	3,676	3,372	3,383	3,624	3,864
T3-S2	530, 531, 532, 533	2,922	2,095	1,917	2,260	2,665	2,933
T3-S3	690, 692, 697, 699	2,537	1,788	1,756	2,131	2,519	2,768
T3-S1-2	610	5,660	4,212	3,787	4,255	4,954	5,493
T4-S2	680	1,584	1,179	1,218	1,454	1,651	1,762

Cuadro AP3-15. Factor camión para tractocamión con semirremolque, pt= 3							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
T2-S1	300	5,451	5,092	4,371	4,023	4,288	4,711
T2-S2	410	3,666	3,124	2,807	2,831	3,121	3,417
T2-S3	570 y 577	2,064	1,777	1,836	2,005	2,215	2,363
T3-S1	420	3,998	3,374	2,923	2,886	3,229	3,606
T3-S2	530, 531, 532, 533	2,695	1,539	1,357	1,754	2,303	2,715
T3-S3	690, 692, 697, 699	2,222	1,249	1,229	1,660	2,187	2,569
T3-S1-2	610	5,272	3,261	2,819	3,331	4,222	5,012
T4-S2	680	1,404	0,875	0,941	1,228	1,505	1,679

Cuadro AP3-16. Factor camión para tractocamión con doble semirremolque, pt= 2							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
TS-S1-S1	430	6,330	6,237	6,027	5,899	5,967	6,096
T2-S2-S2	640	4,173	3,888	3,808	3,936	4,078	4,167
T3-S2-S2	750	4,698	4,021	3,837	4,152	4,492	4,700

Cuadro AP3-17. Factor camión para tractocamión con doble semirremolque, pt= 2,5							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
TS-S1-S1	430	6,311	6,110	5,673	5,415	5,545	5,805
T2-S2-S2	640	4,054	3,499	3,352	3,573	3,851	4,040
T3-S2-S2	750	4,416	3,121	2,822	3,355	3,994	4,421

Cuadro AP3-18. Factor camión para tractocamión con doble semirremolque, pt= 3							
Tipo de camión		SN					
		1	2	3	4	5	6
		FC	FC	FC	FC	FC	FC
TS-S1-S1	430	6,330	5,950	5,272	4,881	5,056	5,449
T2-S2-S2	640	3,904	3,104	2,909	3,176	3,577	3,878
T3-S2-S2	750	4,064	2,245	1,920	2,544	3,417	4,072

Apéndice 4: Factores camión según los pesos máximos permisibles de La Gaceta

Cuadro AP4-1. Factor camión según pesos máximos permisibles para camión unitario, pt=2							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
C2	200	2,766	2,732	2,651	2,606	2,638	2,688
C3	311	1,191	1,215	1,246	1,241	1,220	1,205
C3	310	1,694	1,706	1,718	1,712	1,703	1,698
C4	470	1,501	1,524	1,555	1,551	1,530	1,515
	477	0,921	0,954	0,997	0,987	0,957	0,937
	450	1,937	1,953	1,973	1,967	1,953	1,944
C4++	-	1,947	1,972	1,999	1,988	1,968	1,956
C5	-	1,173	1,220	1,278	1,263	1,222	1,195

Cuadro AP4-2. Factor camión según pesos máximos permisibles para camión unitario, pt=2,5							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
C2	200	2,760	2,685	2,518	2,421	2,484	2,587
C3	311	1,197	1,252	1,328	1,315	1,263	1,228
C3	310	1,697	1,725	1,755	1,741	1,718	1,705
C4	470	1,506	1,561	1,636	1,624	1,573	1,538
	477	0,929	1,007	1,112	1,087	1,014	0,967
	450	1,941	1,978	2,027	2,013	1,979	1,957
C4++	-	1,953	2,012	2,080	2,053	2,002	1,973
C5	-	1,185	1,295	1,437	1,399	1,298	1,234

Cuadro AP4-3. Factor camión según pesos máximos permisibles para camión unitario, pt=3							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
C2	200	2,751	2,628	2,370	2,213	2,298	2,459
C3	311	1,204	1,305	1,452	1,425	1,325	1,260
C3	310	1,701	1,753	1,817	1,788	1,740	1,715
C4	470	1,514	1,613	1,757	1,732	1,635	1,570
	477	0,939	1,084	1,290	1,239	1,096	1,008
	450	1,946	2,014	2,111	2,084	2,016	1,976
C4++	-	1,962	2,071	2,213	2,155	2,053	1,997
C5	-	1,200	1,403	1,686	1,606	1,409	1,290

Cuadro AP4-4. Factor camión según pesos máximos permisibles para camión con remolque, pt=2							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
C2-R1	-	5,280	5,198	5,022	4,936	5,012	5,117
C2-R2	400	7,793	7,664	7,392	7,266	7,385	7,547
C3-R1	-	4,208	4,172	4,088	4,042	4,076	4,127
C3-R2	520	6,721	6,638	6,459	6,372	6,450	6,557
C3-R3	630	5,650	5,612	5,525	5,479	5,515	5,567
C4-R1	-	4,450	4,419	4,343	4,297	4,327	4,374
C4-R1	-	4,014	3,990	3,926	3,881	3,903	3,944
C4-R2	660	6,964	6,885	6,713	6,627	6,700	6,803
C4-R2	670	6,528	6,456	6,296	6,211	6,277	6,374
C4-R3	770	5,892	5,859	5,780	5,734	5,765	5,814
C4-R3	780	5,456	5,430	5,363	5,318	5,341	5,384

Cuadro AP4-5. Factor camión según pesos máximos permisibles para camión con remolque, pt=2,5							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
C2-R1	-	5,263	5,084	4,711	4,531	4,683	4,906
C2-R2	400	7,767	7,482	6,904	6,641	6,883	7,225
C3-R1	-	4,201	4,123	3,949	3,851	3,917	4,024
C3-R2	520	6,705	6,521	6,142	5,961	6,117	6,343
C3-R3	630	5,642	5,560	5,379	5,280	5,351	5,461
C4-R1	-	4,444	4,376	4,220	4,123	4,178	4,276
C4-R1	-	4,010	3,959	3,829	3,734	3,773	3,857
C4-R2	660	6,948	6,774	6,413	6,233	6,378	6,595
C4-R2	670	6,514	6,357	6,022	5,844	5,972	6,176
C4-R3	770	5,886	5,813	5,650	5,553	5,612	5,713
C4-R3	780	5,451	5,396	5,260	5,163	5,206	5,294

Cuadro AP4-6. Factor camión según pesos máximos permisibles para camión con remolque, pt=3							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
C2-R1	-	5,241	4,938	4,345	4,058	4,282	4,637
C2-R2	440	7,732	7,247	6,320	5,903	6,267	6,814
C3-R1	-	4,192	4,062	3,792	3,633	3,725	3,893
C3-R2	520	6,682	6,372	5,767	5,478	5,709	6,070
C3-R3	630	5,633	5,496	5,214	5,053	5,152	5,326
C4-R1	-	4,436	4,323	4,085	3,929	4,001	4,153
C4-R1	-	4,004	3,922	3,732	3,577	3,619	3,747
C4-R2	660	6,927	6,633	6,060	5,774	5,985	6,331
C4-R2	670	6,495	6,232	5,707	5,422	5,604	5,925
C4-R3	770	5,877	5,757	5,507	5,349	5,428	5,587
C4-R3	780	5,445	5,356	5,154	4,997	5,047	5,181

Cuadro AP4-7. Factor camión según pesos máximos para tractocamión con semirremolque, pt=2							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
T2-S1	300	5,280	5,198	5,022	4,936	5,012	5,117
T2-S2	410	4,416	4,375	4,280	4,232	4,272	4,329
T2-S3	570	4,014	3,990	3,926	3,881	3,903	3,944
T2-S1-2	-	6,721	6,638	6,459	6,372	6,450	6,557
T3-S1	420	4,208	4,172	4,088	4,042	4,076	4,127
T3-S2	530	3,136	3,146	3,155	3,149	3,141	3,138
T3-S3	690	2,943	2,964	2,992	2,987	2,968	2,954
T3-S1-2	610	5,650	5,612	5,525	5,479	5,515	5,567

Cuadro AP4-8. Factor camión según pesos máximos para tractocamión con semiremolque, pt=2,5							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
T2-S1	300	5,263	5,084	4,711	4,531	4,683	4,906
T2-S2	410	4,408	4,317	4,120	4,017	4,097	4,216
T2-S3	570	4,010	3,959	3,829	3,734	3,773	3,857
T2-S1-2	-	6,705	6,521	6,142	5,961	6,117	6,343
T3-S1	420	4,201	4,123	3,949	3,851	3,917	4,024
T3-S2	530	3,139	3,162	3,186	3,170	3,151	3,142
T3-S3	690	2,948	2,998	3,066	3,054	3,007	2,975
T3-S1-2	610	5,642	5,560	5,379	5,280	5,351	5,461

Cuadro AP4-9. Factor camión según pesos máximos para tractocamión con semiremolque, pt=3							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
T2-S1	300	5,241	4,938	4,345	4,058	4,282	4,637
T2-S2	410	4,397	4,245	3,935	3,768	3,882	4,072
T2-S3	570	4,004	3,922	3,732	3,577	3,619	3,747
T2-S1-2	-	6,682	6,372	5,767	5,478	5,709	6,070
T3-S1	420	4,192	4,062	3,792	3,633	3,725	3,893
T3-S2	530	3,142	3,186	3,239	3,208	3,167	3,149
T3-S3	690	2,955	3,046	3,179	3,152	3,062	3,003
T3-S1-2	610	5,633	5,496	5,214	5,053	5,152	5,326

Cuadro AP4-10. Factor camión según pesos máximos para Tractocamión con doble semiremolque, pt=2							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
T2-S1-S1	430	7,793	7,664	7,392	7,266	7,385	7,547
T2-S2-S2	640	5,650	5,612	5,525	5,479	5,515	5,567
T3-S2-S2	750	4,578	4,586	4,592	4,585	4,579	4,577

Cuadro AP4-11. Factor camión según pesos máximos para Tractocamión con doble semiremolque, pt=2,5							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
T2-S1-S1	430	7,767	7,482	6,904	6,641	6,883	7,225
T2-S2-S2	640	5,642	5,560	5,379	5,280	5,351	5,461
T3-S2-S2	750	4,580	4,599	4,616	4,600	4,585	4,579

Cuadro AP4-12. Factor camión según pesos máximos para Tractocamión con doble semiremolque, pt=3							
Tipo de vehículo		SN					
		1	2	3	4	5	6
T2-S1-S1	430	7,732	7,247	6,320	5,903	6,267	6,814
T2-S2-S2	640	5,633	5,496	5,214	5,053	5,152	5,326
T3-S2-S2	750	4,583	4,620	4,661	4,627	4,594	4,582

Apéndice 5: Manual de uso para la herramienta electrónica de cálculo

Para la utilización de la herramienta de cálculo se presenta el siguiente manual de uso, donde se explica los pasos a seguir y las consideraciones a tomar para su buen uso y obtención de los resultados.

Inicialmente se deberá abrir la hoja de Excel con el nombre “Herramienta electrónica para el diseño de pavimentos” la cual presentará la siguiente interfaz.

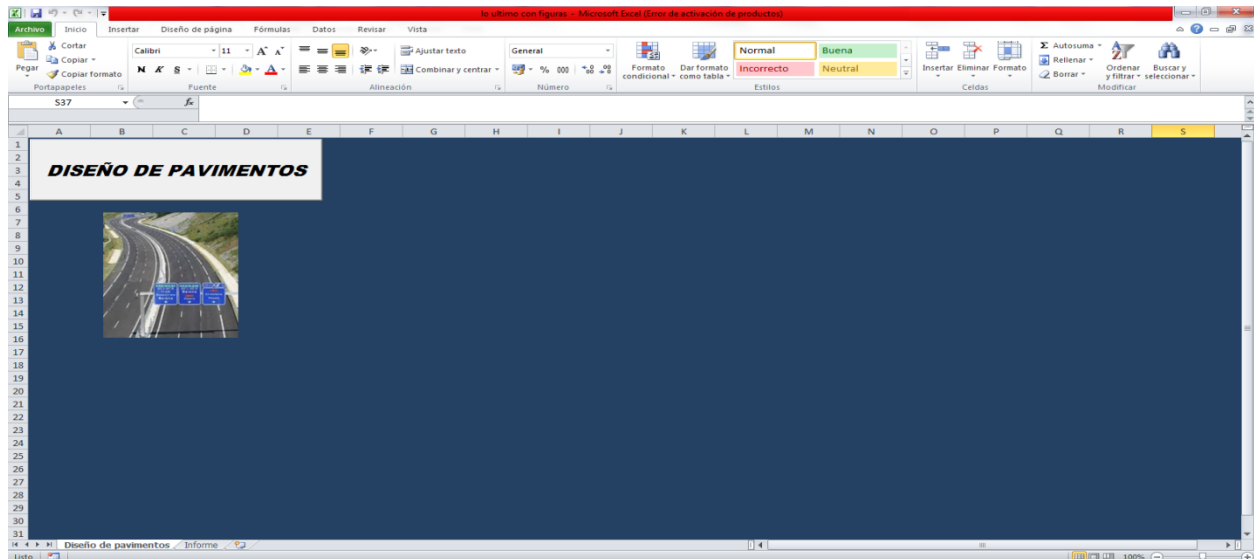


Figura AP5-1. Acceso al programa diseño de pavimentos

Presionando sobre el botón “DISEÑO DE PAVIMENTOS” se podrá acceder a la siguiente hoja:

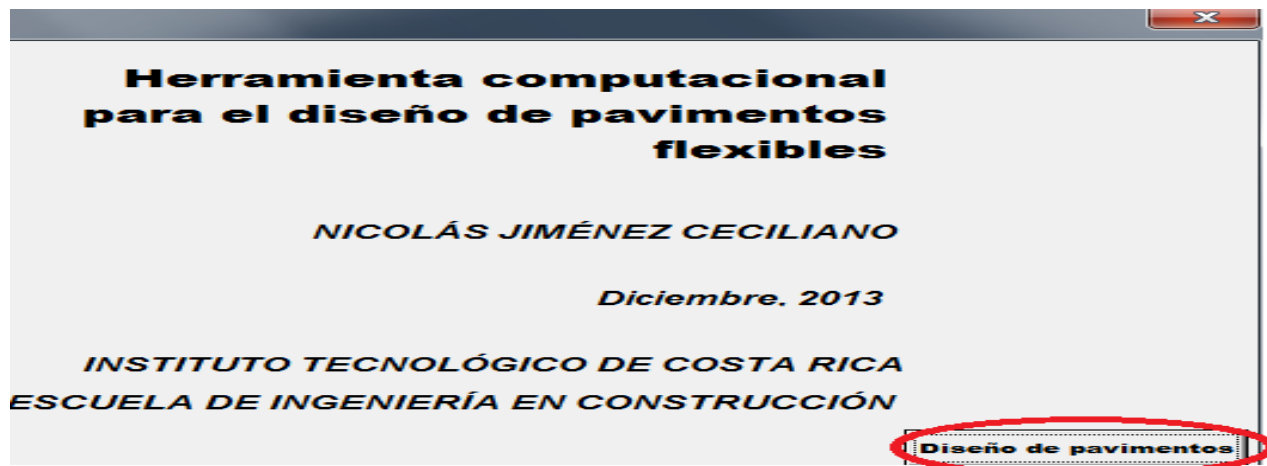


Figura AP5-2. Información general

Para acceder al diseño de pavimentos, presione el botón “Diseño de pavimentos” (marcado en rojo). En seguida, aparecerá un formulario; el cual presenta 5 pestañas, las cuales se pueden seleccionar dependiendo del requerimiento.



Figura AP5-3. Pestañas con los diferentes procesos a realizar

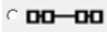


Cálculo de ejes equivalentes de carga

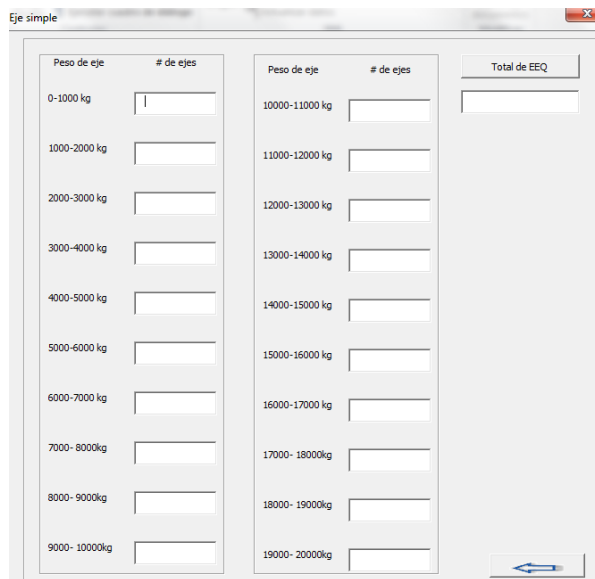
En la pestaña “Ejes equivalentes de carga”, se presentan diferentes recuadros los cuales son necesarios para el cálculo de los ejes de diseño.

Figura AP5-4. Hoja para el cálculo de ejes equivalentes de carga.

Si el conteo se realizó por tipo de eje se debe utilizar el recuadro con el nombre peso de ejes, si por el contrario, se tiene el conteo por tipo de vehículo se debe utilizar el recuadro llamado factor camión.


a. Cálculo de los EEQ diarios por tipo de eje

Si se utiliza el primer recuadro se debe primeramente ingresar los valores de PSI final y el número estructural supuesto (SN). A partir de estos datos, se debe seleccionar la casilla de ejes simples , ejes tándem  o ejes tridem , para ingresar la cantidad de ejes diarios según el peso. Para tal efecto, se mostrará el siguiente formulario.



Peso de eje	# de ejes	Peso de eje	# de ejes	Total de EEQ
0-1000 kg	<input type="text"/>	10000-11000 kg	<input type="text"/>	<input type="text"/>
1000-2000 kg	<input type="text"/>	11000-12000 kg	<input type="text"/>	
2000-3000 kg	<input type="text"/>	12000-13000 kg	<input type="text"/>	
3000-4000 kg	<input type="text"/>	13000-14000 kg	<input type="text"/>	
4000-5000 kg	<input type="text"/>	14000-15000 kg	<input type="text"/>	
5000-6000 kg	<input type="text"/>	15000-16000 kg	<input type="text"/>	
6000-7000 kg	<input type="text"/>	16000-17000 kg	<input type="text"/>	
7000- 8000kg	<input type="text"/>	17000- 18000kg	<input type="text"/>	
8000- 9000kg	<input type="text"/>	18000- 19000kg	<input type="text"/>	
9000- 10000kg	<input type="text"/>	19000- 20000kg	<input type="text"/>	

Figura AP5-5. Hoja para el cálculo de eeq según la cantidad de ejes simples.

En esta hoja, se ingresa la cantidad de ejes según el peso, y mediante el botón “Total de EEQ” se realizará el cálculo de los ejes equivalentes de carga. En seguida, se podrá volver al formulario principal para proseguir con el cálculo presionando el botón .




De igual forma, se debe seguir el procedimiento para el cálculo de los ejes tándem y tridem.

Para determinar los EEQ diarios, se debe marcar el botón señalado, además se puede visualizar un gráfico que muestra el daño que causa cada tipo de eje de acuerdo con los datos ingresados.

Utilizando peso de ejes

PSI final:

SN:


 
 
 EEQ diarios




Figura AP5-6. Cálculo de eeq diarios por tipo de vehículo

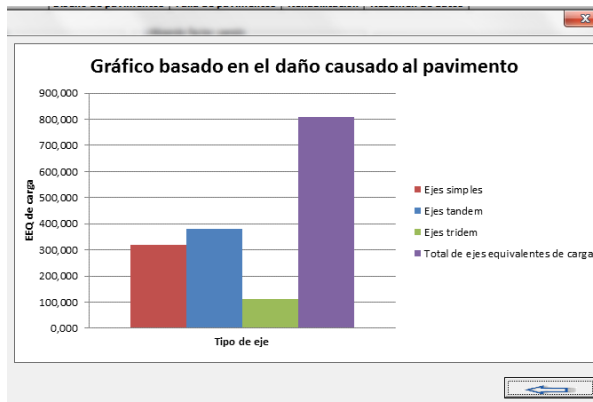




Figura AP5-7. Histograma del daño que ocasionan los ejes.

b. Cálculo de EEQ diarios por tipo de vehículo

Si se utiliza el recuadro "utilizando factor camión" de la figura AP5-4 se debe ingresar los valores de PSI final y el número estructural supuesto (SN). A partir de estos datos, se debe seleccionar la casilla de camión

unitario , camión unitario con remolque , tracto camión con semirremolque

 o tracto camión con doble semirremolque .

Mediante la selección de los diferentes tipos de vehículos, se presentarán diferentes hojas donde se ingresará el TPD y se calculará la cantidad de ejes equivalente diarios.

Figura AP5-8. Hoja para el cálculo de eeq según la cantidad de vehículos.

En el formulario anterior (figura AP5-8), se debe seleccionar el FC deseado, ya sea los factores utilizados por el MOPT, los presentados en la directriz DVOP-5170-07 o lo calculados en este proyecto a partir de las estaciones de pesaje mediante la casilla despegable; y con el botón Total de EEQ, se obtiene los ejes equivalentes estándar para ese tipo de vehículo. Para regresar a la hoja principal de cálculo, se debe señalar el botón con la flecha.

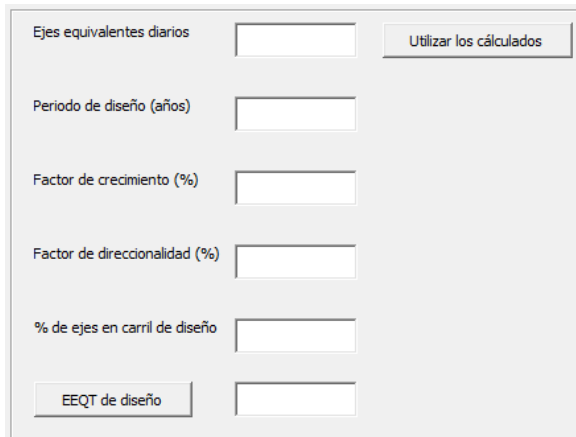
Para el cálculo de los equivalentes de carga, se debe presionar el botón EEQ diarios señalado y igualmente se puede observar u histograma basado en el daño que causa cada tipo de vehículo.

Figura AP5-9. Cálculo de eeq diarios.

Cálculo de ejes equivalentes para el periodo de diseño.

Una vez obtenido el valor de los ejes equivalentes diarios a través de los dos diferentes métodos mencionados, se puede seguir con el cálculo de los ejes para el carril de diseño, donde se debe ingresar los siguientes valores:

- Ejes equivalentes diarios: Ingresarlos manualmente o por medio del botón utilizar los calculados.
- Periodo de diseño
- Factor de crecimiento
- Factor de direccionalidad
- % de ejes equivalentes de diseño



El formulario muestra los siguientes campos de entrada:

- Ejes equivalentes diarios: Utilizar los calculados
- Periodo de diseño (años):
- Factor de crecimiento (%):
- Factor de direccionalidad (%):
- % de ejes en carril de diseño:
- EEQT de diseño:

Figura AP5-10. Cálculo de eeq para carril de diseño

Diseño de pavimentos nuevos

Para realizar el diseño de pavimentos nuevos, se debe seleccionar la pestaña “diseño de pavimentos,” en la cual se observará un formulario como el presentado en la figura AP5-11.

Para determinar el espesor del pavimento que satisfaga las necesidades de la ruta a diseñar, se debe seguir los siguientes pasos:

1. Primeramente ingresar los datos de los materiales. En donde se debe seleccionar el Nivel 1 (si se cuenta directamente con datos del módulo de resiliente) o nivel 2 (si los datos provienen, ya sea de CBR, resistencia a la compresión a los 7 días para las bases estabilizadas con cemento o estabilidad para bases asfálticas).

Existe la posibilidad de incluir o excluir el valor de carpeta, base, subbase, material de préstamo o relleno, según la configuración que se le quiera dar a la estructura, pero siempre se debe ingresar el valor de la subrasante.

2. Seguidamente, se debe ingresar los diferentes valores que se mencionan:
 - Índice de servicio
 - Coeficiente de drenaje
 - Confiabilidad (So y R)
 - Los ejes de diseño, presionando el botón “Utilizar los calculados”, el cual incorpora los valores de la sección Ejes equivalentes de diseño o se pueden ingresar directamente su valor.

- Una vez ingresados todos los valores necesarios para el cálculo, y dando click al botón calcular, se presentarán los valores de las capas que satisfacen los requerimientos, así como el número estructural requerido.

The screenshot shows a software window titled "Ejes equivalentes de diseño | Diseño de pavimentos | Falla de pavimentos | Rehabilitación | Resumen de datos". The interface is divided into several sections:

- Materiales:** Two columns for "Nivel 1: Datos con MR" and "Nivel 2: Datos con CBR". Each column has input fields for "Carpeta (MR, psi)", "Base:" (with a dropdown menu), "Base D (MR, psi)", "Sub base (MR, psi)", "Relleno (MR, psi)", and "Sub rasante (MR, psi)".
- Esesor (cm):** A vertical list of input fields for "Carpeta", "Base A", "Base B", "Base C", "Base D", "Sub base", and "Relleno".
- Número estructural Requerido:** An input field with a "Calcular" button below it.
- Buttons:** "Verificar espesores" and "Borrar datos" buttons are located below the structural number field.
- Indice de servicio:** Input fields for "PSI inicial" and "PSI final", and a dropdown for "So".
- Coefficiente de drenaje base:** Input fields for "base", "Sub base", and "Relleno".
- Ejes equivalentes de carga:** An input field for "EEQ" and a "Utilizar los calculados" button.
- Notas:** A text area containing: "Base A: Base granular", "Base B: Base estabilizada con cemento", "Base c: Base asfáltica", and "Base D: Cuando se utilice una base estabilizada con asfalto existe la posibilidad de utilizar una base granular."

Figura AP5-11. Hoja de cálculo para el diseño de pavimentos.

- Muchas veces los valores calculados no son viablemente construibles y se debe redondear al número entero siguiente, también se puede presentar que no cumplen con los espesores mínimos, por lo cual se deben cambiar las dimensiones de los espesores de acuerdo con los ejes de diseño. Para verificar los cambios que se deseen hacer se puede realizar por medio del botón verificar espesores, donde se presentará un formulario con los espesores obtenidos y diferentes espacios donde se puede ingresar el valor que se desee construir. Presionando el botón verificar, se puede comparar el número estructural requerido con el número estructural de los nuevos espesores, mostrándose un cuadro de diálogo, que indica si es posible tal configuración de acuerdo al número estructural. Mediante el botón guardar, se podrá almacenar los nuevos espesores en el informe de diseño.

Figura AP5-12. Formulario de comparación de los espesores

Cálculo del número de pasadas para la falla de pavimentos

Accediendo a la pestaña “Falla de pavimentos” (ver figura AP5-13) se puede determinar el número de pasadas, ya sea para la falla por fatiga o deformación permanente.

Figura AP5-13. Formulario para el cálculo del número de pasada para la falla del pavimento.

Para realizar los cálculos respectivos, se debe seleccionar en el botón despegable, la ecuación a utilizar. Con la selección del nombre de la ecuación, se podrá visualizar los valores numéricos. También existe la posibilidad de utilizar alguna otra ecuación seleccionando "otra" con lo cual se podrá ingresar el valor respectivo en las casillas vacías.

En cuanto a los valores de la deformación unitaria producida en la carpeta asfáltica o debido a la compresión en la subrasante se pueden obtener de diferentes *softwares* especializados en su cálculo.

Los valores de las deformaciones se deben ingresar tal y como se obtienen del programa, es decir, con los decimales respectivos y el módulo resiliente en unidades de psi.

Para comprobar si los ejes de falla son menores a los ejes de diseño, se puede utilizar el botón verificar en donde el programa realizará una comparación entre el valor de los ejes de diseño y los ejes para la falla, presentando una etiqueta con las acciones a considerar.

Rehabilitación

Cuando se seleccione la pestaña rehabilitación, se mostrara el siguiente formulario:

Figura AP5-14. Formulario para la rehabilitación de pavimentos

Primeramente, se debe ingresar el valor de los espesores del pavimento existente, así como el espesor total, además de la rigidez de la carpeta asfáltica.

Posterior a esto, se debe realizar el cálculo del módulo resiliente de la subrasante, el cual requiere los datos del ensayo por deflectómetro. Para esto, se debe seleccionar el botón "Obtenido por deflectómetro" en la cual se mostrará la siguiente hoja.

Cálculo del módulo resiliente de la subrasante y del módulo efectivo del pavimento

Espesor total (cm)

P (lb)

a (in)

do (in)

dr (in)

Factor Monoqrama

r (in)

Mr

Ep

SN

Figura AP5-15. Formulario para el cálculo del SN, Ep y SN

En este formulario, se debe ingresar:

- La carga aplicada en el ensayo
- El radio del plato de carga
- Las deflexiones en el centro del plato de carga y a una distancia (r).
- La distancia (r) a la cual se tomó la deflexión.
- El factor de corrección por temperatura, cuando esta fuera diferente a los 20°C. Si no es necesaria la corrección se debe colocar 1.

Una vez obtenido el valor del MR de la subrasante y el número estructural del pavimento, se debe ingresar los valores del índice de servicio, confiabilidad y cantidad de ejes equivalentes de carga para la nueva estructura.

Para poder obtener el espesor de la carpeta asfáltica que se colocará, se debe seleccionar si esta es una sobrecapa o un recarpeteo. Si se opta por un recarpeteo se deberá ingresar el espesor a cortar de la superficie de rueda.

Por último, se puede seleccionar la pestaña resumen de datos en la cual se presentará la siguiente hoja.

Ejes equivalentes de diseño | Diseño de pavimentos | Falla de pavimentos | Rehabilitación | **Resumen de datos**

EEQ DE CARGA

Total de eqq según tipo de vehículo:

Camión unitario

Camión unitario con remolque

Tractocamión con semirremolque

Tractocamión con doble semirremolque

Total de eqq según

Simple

Tandem

Tridem

eqq diarios

Periodo de diseño

Factor de crecimiento

Total de eqq de diseño

DISEÑO DE PAVIMENTOS

Espesor de capas (cm)

Carpeta asfáltica

Base granular

Base estabilizada con cemento

Base asfáltica

Base granular usada cuando se use base asfáltica

Sub base

Relleno

REHABILITACIÓN

Espesor de sobrecapa

Capa asfáltica

Espesor de recarpeteo

Capa asfáltica

FALLA DE PAVIMENTOS

Cantidad de ejes para la falla por fatiga

Cantidad de ejes para la falla por deformación

Generar informe

Figura AP5-16. Resumen de datos

Mediante el botón “Generar informe”, se puede observar todos los valores ingresados, así como los resultados obtenidos, donde es posible guardar o imprimir un reporte de datos.

Anexos

En los anexos, se incluye:

- Los factores equivalentes de carga para ejes simple, dobles y tándem, según la AAHSTO 93.
- Cuadro correspondiente al factor de crecimiento, AASHTO 93.
- Gráfico para determinar el módulo resiliente de la subrasante según el daño producido, AASHTO 93.
- Nomograma para el cálculo del CBR a partir de la clasificación del tipo de material según Yang H. Huang.
- Los gráficos para determinar los coeficientes estructurales o módulos resilientes, para el concreto asfáltico, base granular, base estabilizada con cemento, base asfáltica y subbase, AASHTO 93
- Nomograma para la obtención del número estructural de las capas de los pavimentos, AASHTO 93
- Gráfico de ajuste por temperatura para las deflexiones obtenidas por medio del deflectómetro, AASHTO 93
- Gráfico para obtención del módulo efectivo del pavimento (E_p), AASHTO 93.
- Tabla con los coeficientes estructurales para la caracterización de los materiales según las AASHTO 93.
- Pesos máximos permisibles según el Diario Oficial La Gaceta.

Cuadro AN1. LEF para ejes simples, pt=2						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,009	0,012	0,011	0,010	0,009	0,009
8	0,030	0,035	0,036	0,033	0,031	0,029
10	0,075	0,085	0,090	0,085	0,079	0,076
12	0,165	0,177	0,189	0,183	0,174	0,168
14	0,325	0,338	0,354	0,350	0,338	0,331
16	0,589	0,598	0,613	0,612	0,603	0,596
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,59	1,56	1,55	1,57	1,59
22	2,49	2,44	2,35	2,31	2,35	2,41
24	3,71	3,62	3,43	3,33	3,40	3,51
26	5,36	5,21	4,88	4,68	4,77	4,96
28	7,54	7,31	6,78	6,42	6,52	6,83
30	10,4	10,0	9,2	8,6	8,7	9,2
32	14,0	13,5	12,4	11,5	11,5	12,1
34	18,5	17,9	16,3	15,0	14,9	15,6
36	24,2	23,3	21,2	19,3	19,0	19,9
38	31,1	29,9	27,1	24,6	24,0	25,1
40	39,6	38,0	34,3	30,9	30,0	31,2
42	49,7	47,7	43,0	38,6	37,2	38,5
44	61,8	59,3	53,4	47,6	45,7	47,1
46	76,1	73,0	65,6	58,3	55,7	57,0
48	92,9	89,1	80,0	70,9	67,3	68,6
50	113	108	97	86	81	82

Cuadro AN2. LEF para ejes simples, pt=2,5						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002
6	0,011	0,017	0,017	0,013	0,010	0,009
8	0,032	0,047	0,051	0,041	0,034	0,031
10	0,078	0,102	0,118	0,102	0,088	0,080
12	0,168	0,198	0,229	0,213	0,189	0,176
14	0,328	0,358	0,399	0,388	0,360	0,342
16	0,591	0,613	0,646	0,645	0,623	0,606
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,57	1,49	1,47	1,51	1,55
22	2,48	2,38	2,17	2,09	2,18	2,30
24	3,69	3,49	3,09	2,89	3,03	3,27
26	5,33	4,99	4,31	3,91	4,09	4,48
28	7,49	6,98	5,90	5,21	5,39	5,98
30	10,3	9,5	7,9	6,8	7,0	7,8
32	13,9	12,8	10,5	8,8	8,9	10,0
34	18,4	16,9	13,7	11,3	11,2	12,5
36	24,0	22,0	17,7	14,4	13,9	15,5
38	30,9	28,3	22,6	18,1	17,2	19,0
40	39,3	35,9	28,5	22,5	21,1	23,0
42	49,3	45,0	35,6	27,8	25,6	27,7
44	61,3	55,9	44,0	34,0	31,0	33,1
46	75,5	68,8	54,0	41,4	37,2	39,3
48	92,2	83,9	65,7	50,1	44,5	46,5
50	112	102	79	60	53	55

Cuadro AN3. LEF para ejes simples, pt=3						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0008	0,0009	0,0006	0,0003	0,0002	0,0002
4	0,004	0,008	0,006	0,004	0,002	0,002
6	0,014	0,030	0,028	0,018	0,012	0,010
8	0,035	0,070	0,080	0,055	0,040	0,034
10	0,082	0,132	0,168	0,132	0,101	0,086
12	0,173	0,231	0,296	0,260	0,212	0,187
14	0,332	0,388	0,468	0,447	0,391	0,358
16	0,594	0,633	0,695	0,693	0,651	0,622
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,60	1,53	1,41	1,38	1,44	1,51
22	2,47	2,29	1,96	1,83	1,97	2,16
24	3,67	3,33	2,69	2,39	2,60	2,96
26	5,29	4,72	3,65	3,08	3,33	3,91
28	7,43	6,56	4,88	3,93	4,17	5,00
30	10,2	8,9	6,5	5,0	5,1	6,3
32	13,8	12,0	8,4	6,2	6,3	7,7
34	18,2	15,7	10,9	7,8	7,6	9,3
36	23,8	20,4	14,0	9,7	9,1	11,0
38	30,6	26,2	17,7	11,9	11,0	13,0
40	38,8	33,2	22,2	14,6	13,1	15,3
42	48,8	41,6	27,6	17,8	15,5	17,8
44	60,6	51,6	34,0	21,6	18,4	20,6
46	74,7	63,4	41,5	26,1	21,6	23,8
48	91,2	77,3	50,3	31,3	25,4	27,4
50	110	94	61	37	30	32

Cuadro AN4. LEF para ejes tandém, pt=2						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
8	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002
10	0,007	0,008	0,008	0,007	0,006	0,006
12	0,013	0,016	0,016	0,014	0,013	0,012
14	0,024	0,029	0,029	0,026	0,024	0,023
16	0,041	0,048	0,050	0,046	0,042	0,040
18	0,066	0,077	0,081	0,075	0,069	0,066
20	0,103	0,117	0,124	0,117	0,109	0,105
22	0,156	0,171	0,183	0,174	0,164	0,158
24	0,227	0,244	0,260	0,252	0,239	0,231
26	0,322	0,340	0,360	0,353	0,338	0,329
28	0,447	0,465	0,487	0,481	0,466	0,455
30	0,607	0,623	0,646	0,643	0,627	0,617
32	0,810	0,823	0,843	0,842	0,829	0,819
34	1,06	1,07	1,08	1,08	1,08	1,07
36	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
38	1,76	1,75	1,73	1,72	1,73	1,74
40	2,22	2,19	2,15	2,13	2,16	2,18
42	2,77	2,73	2,64	2,62	2,66	2,70
44	3,42	3,36	3,23	3,18	3,24	3,31
46	4,20	4,11	3,92	3,83	3,91	4,02
48	5,10	4,98	4,72	4,58	4,68	4,83
50	6,15	5,99	5,64	5,44	5,56	5,77
52	7,37	7,16	6,71	6,43	6,56	6,83
54	8,77	8,51	7,93	7,55	7,69	8,03
56	10,4	10,1	9,3	8,8	9,0	9,4
58	12,2	11,8	10,9	10,3	10,4	10,9
60	14,3	13,8	12,7	11,9	12,0	12,6
62	16,6	16,0	14,7	13,7	13,8	14,5
64	19,3	18,6	17,0	15,8	15,8	16,6
66	22,2	21,4	19,6	18,0	18,0	18,9
68	25,5	24,6	22,4	20,6	20,5	21,5
70	29,2	28,1	25,6	23,4	23,2	24,3
72	33,3	32,0	29,1	26,5	26,2	27,4
74	37,8	36,4	33,0	30,0	29,4	30,8
76	42,8	41,2	37,3	33,8	33,1	34,5
78	48,4	46,5	42,0	38,0	37,0	38,6
80	54,4	52,3	47,2	42,5	41,3	43,0
82	61,1	58,7	52,9	47,6	46,0	47,8
84	68,4	65,7	59,2	53,0	51,2	53,0
86	76,3	73,3	66,0	59,0	56,8	58,6
88	85,0	81,6	73,4	65,5	62,8	64,7
90	94,4	90,6	81,5	72,6	69,4	71,3

Cuadro AN5. LEF para ejes tandém, pt=2,5						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002
6	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
8	0,004	0,006	0,005	0,004	0,003	0,003
10	0,008	0,013	0,011	0,009	0,007	0,006
12	0,015	0,024	0,023	0,018	0,014	0,013
14	0,026	0,041	0,042	0,033	0,027	0,024
16	0,044	0,065	0,070	0,057	0,047	0,043
18	0,070	0,097	0,109	0,092	0,077	0,070
20	0,107	0,141	0,162	0,141	0,121	0,110
22	0,160	0,198	0,229	0,207	0,180	0,166
24	0,231	0,273	0,315	0,292	0,260	0,242
26	0,327	0,370	0,420	0,401	0,364	0,342
28	0,451	0,493	0,548	0,534	0,495	0,470
30	0,611	0,648	0,703	0,695	0,658	0,633
32	0,813	0,843	0,889	0,887	0,857	0,834
34	1,06	1,08	1,11	1,11	1,09	1,08
36	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
38	1,75	1,73	1,69	1,68	1,70	1,73
40	2,21	2,16	2,06	2,03	2,08	2,14
42	2,76	2,67	2,49	2,43	2,51	2,61
44	3,41	3,27	2,99	2,88	3,00	3,16
46	4,18	3,98	3,58	3,40	3,55	3,79
48	5,08	4,80	4,25	3,98	4,17	4,49
50	6,12	5,76	5,03	4,64	4,86	5,28
52	7,33	6,87	5,93	5,38	5,63	6,17
54	8,72	8,14	6,95	6,22	6,47	7,15
56	10,3	9,6	8,1	7,2	7,4	8,2
58	12,1	11,3	9,4	8,2	8,4	9,4
60	14,2	13,1	10,9	9,4	9,6	10,7
62	16,5	15,3	12,6	10,7	10,8	12,1
64	19,1	17,6	14,5	12,2	12,2	13,7
66	22,1	20,3	16,6	13,8	13,7	15,4
68	25,3	23,3	18,9	15,6	15,4	17,2
70	29,0	26,6	21,5	17,6	17,2	19,2
72	33,0	30,3	24,4	19,8	19,2	21,3
74	37,5	34,4	27,6	22,2	21,3	23,6
76	42,5	38,9	31,1	24,8	23,7	26,1
78	48,0	43,9	35,0	27,8	26,2	28,8
80	54,0	49,4	39,2	30,9	29,0	31,7
82	60,6	55,4	43,9	34,4	32,0	34,8
84	67,8	61,9	49,0	38,2	35,3	38,1
86	75,7	69,1	54,5	42,3	38,8	41,7
88	84,3	76,9	60,6	46,8	42,6	45,6
90	93,7	85,4	67,1	51,7	46,8	49,7

Cuadro AN6. LEF para ejes tandém, pt=3						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
4	0,0011	0,0012	0,0008	0,0004	0,0003	0,0002
6	0,003	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001
8	0,006	0,011	0,009	0,005	0,003	0,003
10	0,011	0,024	0,020	0,012	0,008	0,007
12	0,019	0,042	0,039	0,024	0,017	0,014
14	0,031	0,066	0,068	0,045	0,032	0,026
16	0,049	0,096	0,109	0,076	0,055	0,046
18	0,075	0,134	0,164	0,121	0,090	0,076
20	0,113	0,181	0,232	0,182	0,139	0,119
22	0,166	0,241	0,313	0,260	0,205	0,178
24	0,238	0,317	0,407	0,358	0,292	0,257
26	0,333	0,413	0,517	0,476	0,402	0,360
28	0,457	0,534	0,643	0,614	0,538	0,492
30	0,616	0,684	0,788	0,773	0,702	0,656
32	0,817	0,870	0,956	0,953	0,896	0,855
34	1,07	1,10	1,15	1,15	1,12	1,09
36	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
38	1,75	1,71	1,64	1,62	1,66	1,70
40	2,21	2,11	1,94	1,89	1,98	2,08
42	2,75	2,59	2,29	2,19	2,33	2,50
44	3,39	3,15	2,70	2,52	2,71	2,97
46	4,15	3,81	3,16	2,89	3,13	3,50
48	5,04	4,58	3,70	3,29	3,57	4,07
50	6,08	5,47	4,31	3,74	4,05	4,70
52	7,27	6,49	5,01	4,24	4,57	5,37
54	8,65	7,67	5,81	4,79	5,13	6,10
56	10,2	9,0	6,7	5,4	5,7	6,9
58	12,0	10,6	7,7	6,1	6,4	7,7
60	14,1	12,3	8,9	6,8	7,1	8,6
62	16,3	14,2	10,2	7,7	7,8	9,5
64	18,9	16,4	11,6	8,6	8,6	10,5
66	21,8	18,9	13,2	9,6	9,5	11,6
68	25,1	21,7	15,0	10,7	10,5	12,7
70	28,7	24,7	17,0	12,0	11,5	13,9
72	32,7	28,1	19,2	13,3	12,6	15,2
74	37,2	31,9	21,6	14,8	13,8	16,5
76	42,1	36,0	24,3	16,4	15,1	17,9
78	47,5	40,6	27,3	18,2	16,5	19,4
80	53,4	45,7	30,5	20,1	18,0	21,0
82	60,0	51,2	34,0	22,2	19,6	22,7
84	67,1	57,2	37,9	24,6	21,3	24,5
86	74,9	63,8	42,1	27,1	23,2	26,4
88	83,4	71,0	46,7	29,8	25,2	28,4
90	92,7	78,8	51,7	32,7	27,4	30,5

Cuadro AN7. LEF para ejes trídem, pt=2						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
6	0,0004	0,0004	0,0003	0,000	0,0003	0,0003
8	0,0009	0,0010	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007
10	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
12	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
14	0,006	0,007	0,007	0,006	0,006	0,005
16	0,010	0,012	0,012	0,010	0,009	0,009
18	0,016	0,019	0,019	0,017	0,015	0,015
20	0,024	0,029	0,029	0,026	0,024	0,023
22	0,034	0,042	0,042	0,038	0,035	0,034
24	0,049	0,058	0,060	0,055	0,051	0,048
26	0,068	0,080	0,083	0,077	0,071	0,068
28	0,093	0,107	0,113	0,105	0,098	0,094
30	0,125	0,140	0,149	0,140	0,131	0,126
32	0,164	0,182	0,194	0,184	0,173	0,167
34	0,213	0,233	0,248	0,238	0,225	0,217
36	0,273	0,294	0,313	0,303	0,288	0,279
38	0,346	0,368	0,390	0,381	0,364	0,353
40	0,434	0,456	0,481	0,473	0,454	0,443
42	0,538	0,560	0,587	0,580	0,561	0,548
44	0,662	0,682	0,710	0,705	0,686	0,673
46	0,807	0,825	0,852	0,849	0,831	0,818
48	0,976	0,992	1,015	1,014	0,999	0,987
50	1,17	1,18	1,20	1,20	1,19	1,18
52	1,40	1,40	1,42	1,42	1,41	1,40
54	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
56	1,95	1,95	1,93	1,93	1,94	1,94
58	2,29	2,27	2,24	2,23	2,25	2,27
60	2,67	2,64	2,59	2,57	2,60	2,63
62	3,10	3,06	2,98	2,95	2,99	3,04
64	3,59	3,53	3,41	3,37	3,42	3,49
66	4,13	4,05	3,89	3,83	3,90	3,99
68	4,73	4,63	4,43	4,34	4,42	4,54
70	5,40	5,28	5,03	4,90	5,00	5,15
72	6,15	6,00	5,68	5,52	5,63	5,82
74	6,97	6,79	6,41	6,20	6,33	6,56
76	7,88	7,67	7,21	6,94	7,08	7,36
78	8,88	8,63	8,09	7,75	7,90	8,23
80	9,98	9,69	9,05	8,63	8,79	9,18
82	11,2	10,8	10,1	9,6	9,8	10,20
84	12,5	12,1	11,2	10,6	10,8	11,3
86	13,9	13,5	12,5	11,8	11,9	12,5
88	15,5	15,0	13,8	13,0	13,2	13,8
90	17,2	16,6	15,3	14,3	14,5	15,2

Cuadro AN8. LEF para ejes trídem, pt=2,5						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
6	0,0006	0,0007	0,0005	0,000	0,0003	0,0003
8	0,0014	0,0017	0,0013	0,0010	0,0008	0,0007
10	0,003	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002
12	0,005	0,007	0,006	0,004	0,003	0,003
14	0,008	0,012	0,010	0,008	0,006	0,006
16	0,012	0,019	0,018	0,013	0,011	0,010
18	0,018	0,029	0,028	0,021	0,017	0,016
20	0,027	0,042	0,042	0,032	0,027	0,024
22	0,038	0,058	0,060	0,048	0,040	0,036
24	0,053	0,078	0,084	0,068	0,057	0,051
26	0,072	0,103	0,114	0,095	0,080	0,072
28	0,098	0,133	0,151	0,128	0,109	0,099
30	0,129	0,169	0,195	0,170	0,145	0,133
32	0,169	0,213	0,247	0,220	0,191	0,175
34	0,219	0,266	0,308	0,281	0,246	0,228
36	0,279	0,329	0,379	0,352	0,313	0,292
38	0,352	0,403	0,461	0,436	0,393	0,368
40	0,439	0,491	0,554	0,533	0,487	0,459
42	0,543	0,594	0,661	0,644	0,597	0,567
44	0,666	0,714	0,781	0,769	0,723	0,692
46	0,811	0,854	0,918	0,911	0,868	0,838
48	0,979	1,015	1,072	1,069	1,033	1,005
50	1,17	1,20	1,24	1,25	1,22	1,20
52	1,40	1,41	1,44	1,44	1,43	1,41
54	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
56	1,95	1,93	1,90	1,90	1,91	1,93
58	2,29	2,25	2,17	2,16	2,20	2,24
60	2,67	2,60	2,48	2,44	2,51	2,58
62	3,09	3,00	2,82	2,76	2,85	2,95
64	3,57	3,44	3,19	3,10	3,22	3,36
66	4,11	3,94	3,61	3,47	3,62	3,81
68	4,71	4,49	4,06	3,88	4,05	4,30
70	5,38	5,11	4,57	4,32	4,52	4,84
72	6,12	5,79	5,13	4,80	5,03	5,41
74	6,93	6,54	5,74	5,32	5,57	6,04
76	7,84	7,37	6,41	5,88	6,15	6,71
78	8,83	8,28	7,14	6,49	6,78	7,43
80	9,92	9,28	7,95	7,15	7,45	8,21
82	11,1	10,4	8,8	7,9	8,2	9,03
84	12,4	11,6	9,8	8,6	8,9	9,9
86	13,8	12,9	10,8	9,5	9,8	10,9
88	15,4	14,3	11,9	10,4	10,6	11,9
90	17,1	15,8	13,2	11,3	11,6	12,9

Cuadro AN9. LEF para ejes trídem, pt=3						
Carga (klb)	SN					
	1	2	3	4	5	6
	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF	LEF
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001
6	0,0013	0,0014	0,0009	0,001	0,0004	0,0003
8	0,0027	0,0036	0,0024	0,0014	0,0009	0,0008
10	0,005	0,008	0,005	0,003	0,002	0,002
12	0,007	0,014	0,010	0,006	0,004	0,003
14	0,011	0,023	0,018	0,011	0,007	0,006
16	0,016	0,035	0,030	0,018	0,013	0,010
18	0,022	0,050	0,047	0,029	0,020	0,017
20	0,031	0,069	0,069	0,044	0,031	0,026
22	0,043	0,090	0,097	0,065	0,046	0,039
24	0,059	0,116	0,132	0,092	0,066	0,056
26	0,079	0,145	0,174	0,126	0,092	0,078
28	0,104	0,179	0,223	0,168	0,126	0,107
30	0,136	0,218	0,279	0,219	0,167	0,143
32	0,176	0,265	0,342	0,279	0,218	0,188
34	0,226	0,319	0,413	0,350	0,279	0,243
36	0,286	0,382	0,491	0,432	0,352	0,310
38	0,359	0,456	0,577	0,524	0,437	0,389
40	0,447	0,543	0,671	0,626	0,536	0,483
42	0,550	0,643	0,775	0,740	0,649	0,593
44	0,673	0,760	0,889	0,865	0,777	0,720
46	0,817	0,894	1,014	1,001	0,920	0,865
48	0,984	1,049	1,152	1,148	1,080	1,030
50	1,18	1,23	1,30	1,31	1,26	1,22
52	1,40	1,43	1,47	1,48	1,45	1,43
54	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
56	1,95	1,92	1,86	1,85	1,88	1,91
58	2,28	2,21	2,09	2,06	2,13	2,20
60	2,66	2,54	2,34	2,28	2,39	2,50
62	3,08	2,92	2,61	2,52	2,66	2,84
64	3,56	3,33	2,92	2,77	2,96	3,19
66	4,09	3,79	3,25	3,04	3,27	3,58
68	4,68	4,31	3,62	3,33	3,60	4,00
70	5,34	4,88	4,02	3,64	3,94	4,44
72	6,08	5,51	4,46	3,97	4,31	4,91
74	6,89	6,21	4,94	4,32	4,69	5,40
76	7,78	6,98	5,47	4,70	5,09	5,93
78	8,76	7,83	6,04	5,11	5,51	6,48
80	9,84	8,75	6,67	5,54	5,96	7,06
82	11,0	9,8	7,4	6,0	6,4	7,66
84	12,3	10,9	8,1	6,5	6,9	8,3
86	13,7	12,1	8,9	7,0	7,4	9,0
88	15,3	13,4	9,8	7,6	8,0	9,6
90	16,9	14,8	10,7	8,2	8,5	10,4

Cuadro AN10. Valores del factor de crecimiento.

Número de años en análisis	Tasa de crecimiento						
	2	4	5	6	7	8	10
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	2,02	2,04	2,05	2,06	2,07	2,08	2,10
3	3,06	3,12	3,15	3,18	3,21	3,25	3,31
4	4,12	4,25	4,31	4,37	4,44	4,51	4,64
5	5,20	5,42	5,53	5,64	5,75	5,87	6,11
6	6,31	6,63	6,80	6,98	7,15	7,34	7,72
7	7,43	7,90	8,14	8,39	8,65	8,92	9,49
8	8,58	9,21	9,55	9,90	10,26	10,64	11,44
9	9,75	10,58	11,03	11,49	11,98	12,49	13,58
10	10,95	12,01	12,58	13,18	13,82	14,49	15,94
11	12,17	13,49	14,21	14,97	15,78	16,65	18,53
12	13,41	15,03	15,92	16,87	17,89	18,98	21,38
13	14,68	16,63	17,71	18,88	20,14	21,50	24,52
14	15,97	18,29	19,60	21,02	22,55	24,21	27,97
15	17,29	20,02	21,58	23,28	25,13	27,15	31,77
16	18,64	21,82	23,66	25,67	27,89	30,32	35,95
17	20,01	23,70	25,84	28,21	30,84	33,75	40,54
18	21,41	25,65	28,13	30,91	34,00	37,45	45,60
19	22,84	27,67	30,54	33,76	37,38	41,45	51,16
20	24,30	29,78	33,07	36,79	41,00	45,76	57,27
21	25,78	31,97	35,72	39,99	44,87	50,42	64,00
22	27,30	34,25	38,51	43,39	49,01	55,46	71,40
23	28,84	36,62	41,43	47,00	53,44	60,89	79,54
24	30,42	39,08	44,50	50,82	58,18	66,76	88,50
25	32,03	41,65	47,73	54,86	63,25	73,11	98,35
26	33,67	44,31	51,11	59,16	68,68	79,95	109,18
27	35,34	47,08	54,67	63,71	74,48	87,35	121,10
28	37,05	49,97	58,40	68,53	80,70	95,34	134,21
29	38,79	52,97	62,32	73,64	87,35	103,97	148,63
30	40,57	56,08	66,44	79,06	94,46	113,28	164,49
31	42,38	59,33	70,76	84,80	102,07	123,35	181,94
32	44,23	62,70	75,30	90,89	110,22	134,21	201,14
33	46,11	66,21	80,06	97,34	118,93	145,95	222,25
34	48,03	69,86	85,07	104,18	128,26	158,63	245,48
35	49,99	73,65	90,32	111,43	138,24	172,32	271,02

Figura AN1. Figura para determinar el módulo resiliente de la subrasante

Month	Roadbed Soil Modulus, M_R (psi)	Relative Damage, u_f
Jan		
Feb		
Mar		
Apr		
May		
June		
July		
Aug		
Sept		
Oct		
Nov		
Dec		
Summation: $\Sigma u_f =$		

Average: $\bar{u}_f = \frac{\Sigma u_f}{n} = \underline{\hspace{2cm}}$

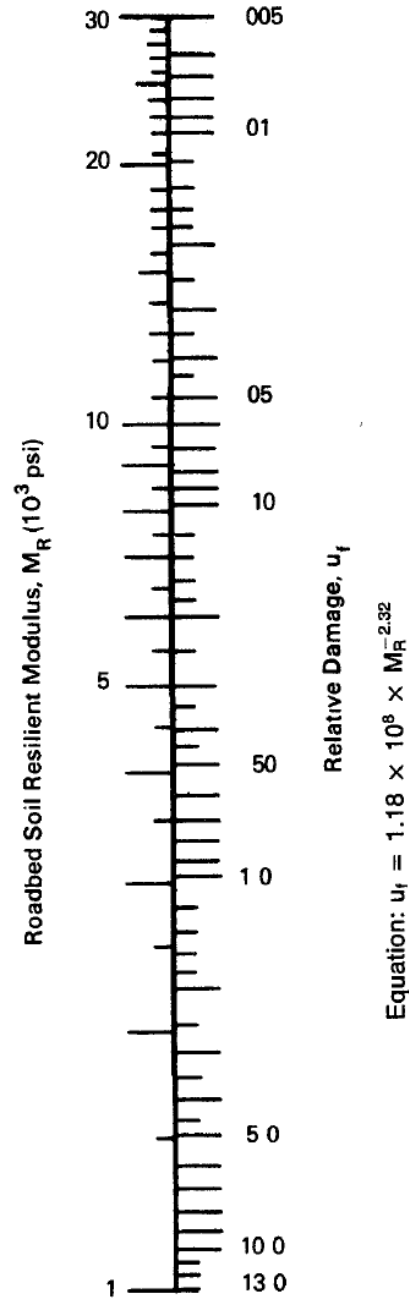


Figura AN2. Figura para el cálculo del CBR a partir de la clasificación del material.

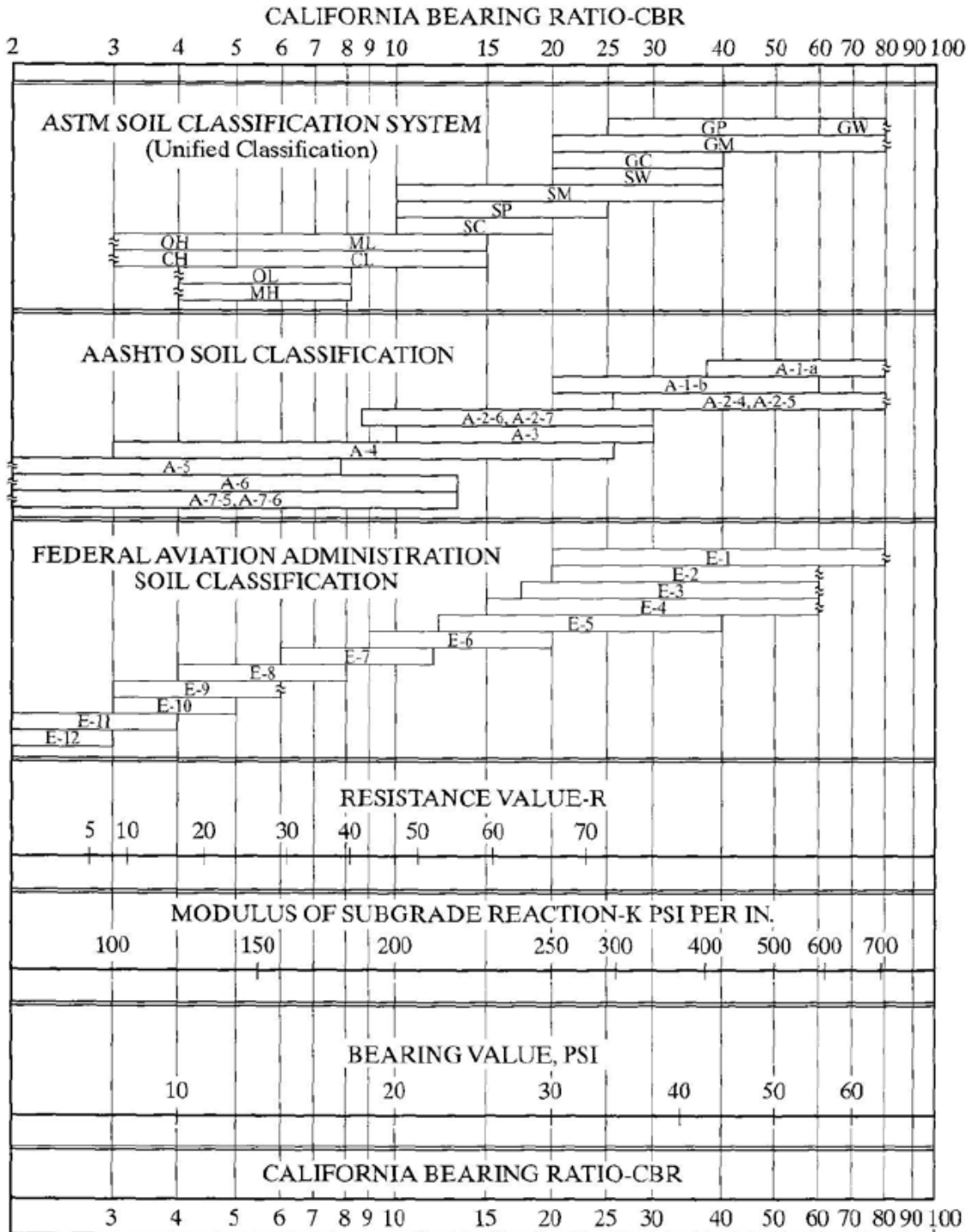


Figura AN3. Figura para determinar el coeficiente estructural del concreto asfáltico

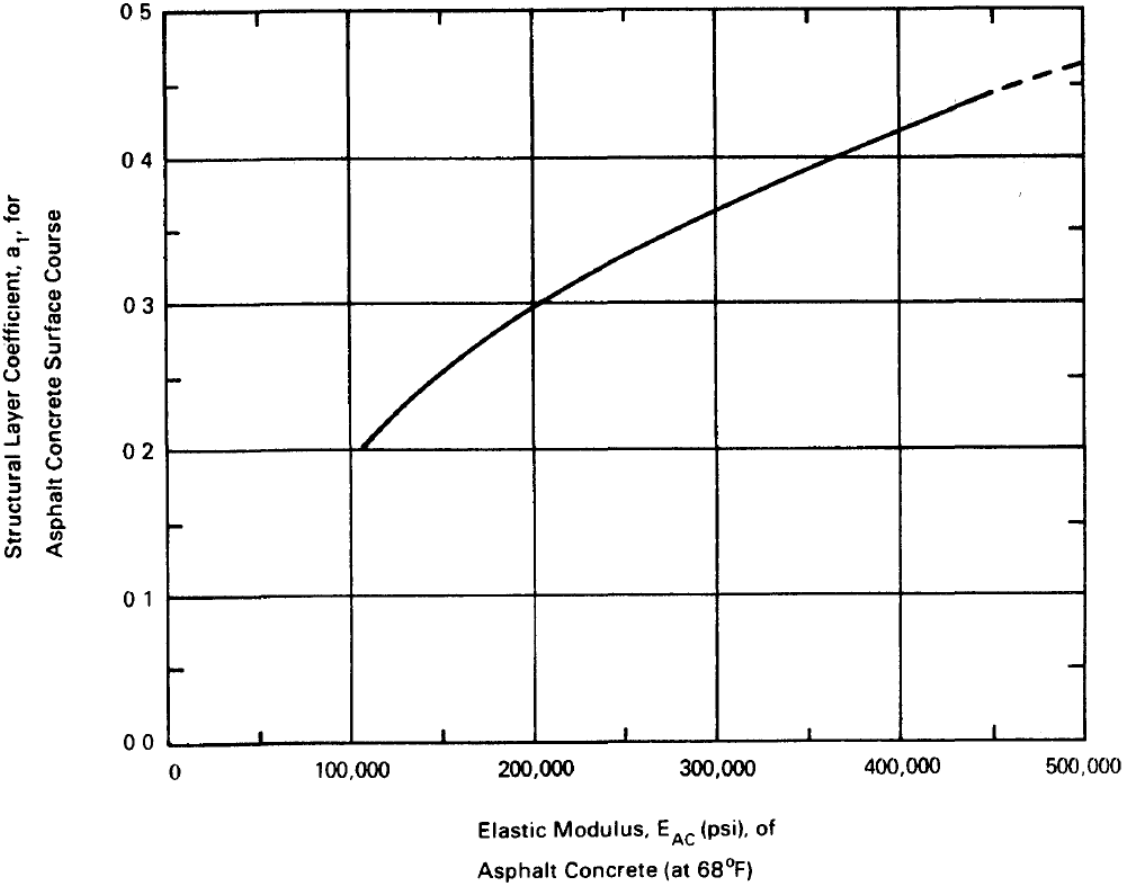
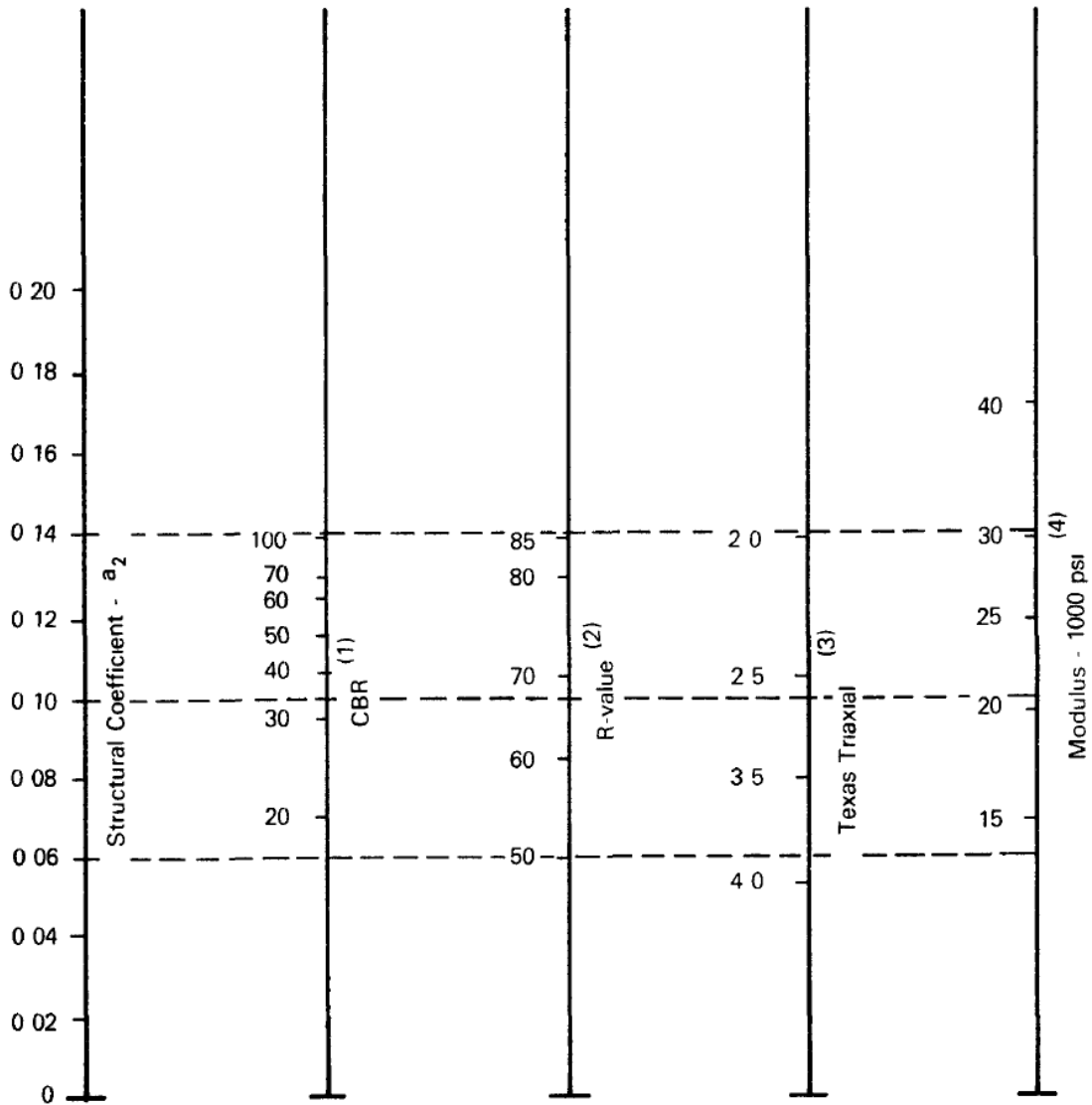
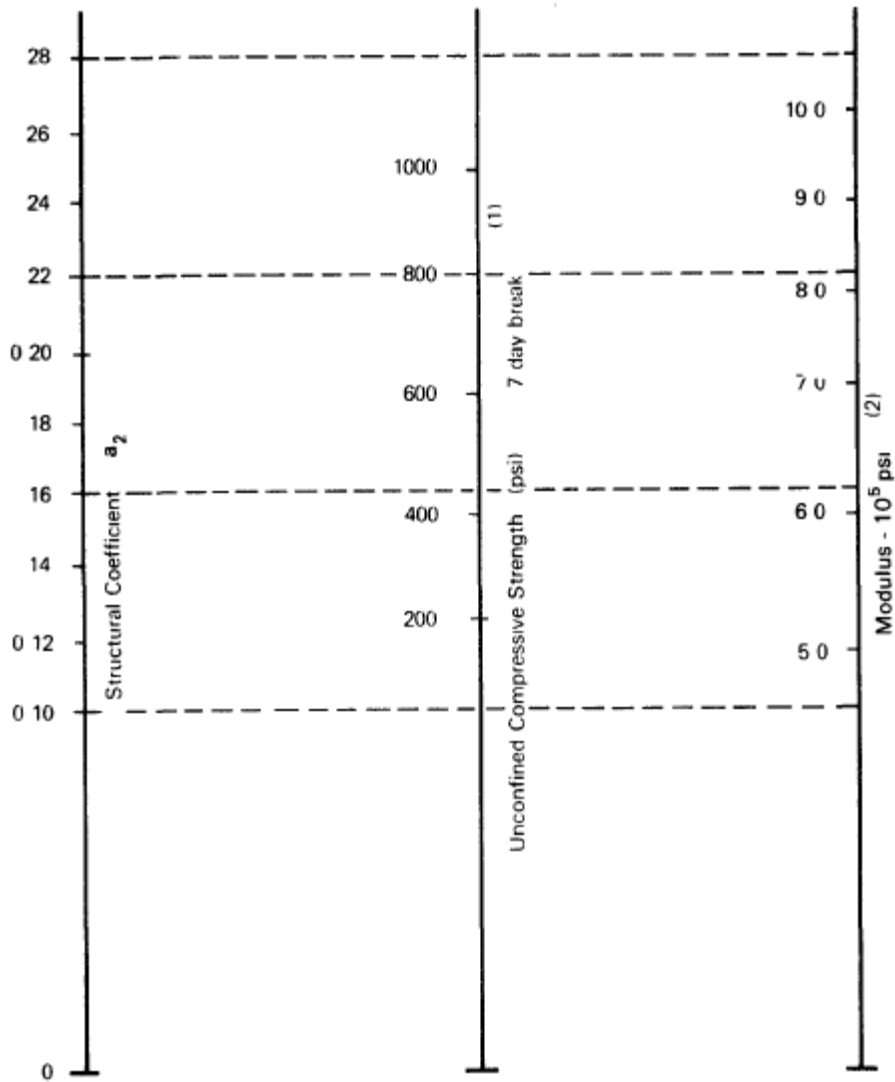


Figura AN4. Figura para determinar el módulo resiliente o coeficiente estructural para la base granular



- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

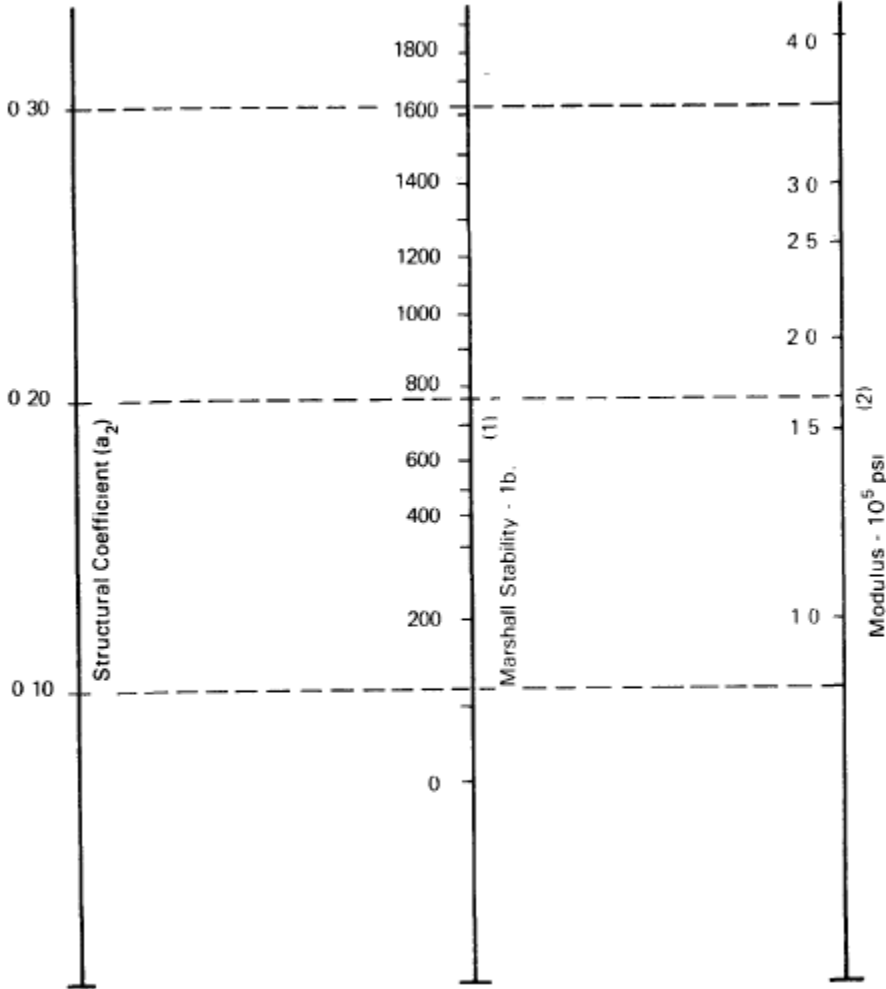
Figura AN5. Figura para determinar el módulo resiliente o coeficiente estructural para bases estabilizadas con cemento



(1) Scale derived by averaging correlations from Illinois Louisiana and Texas

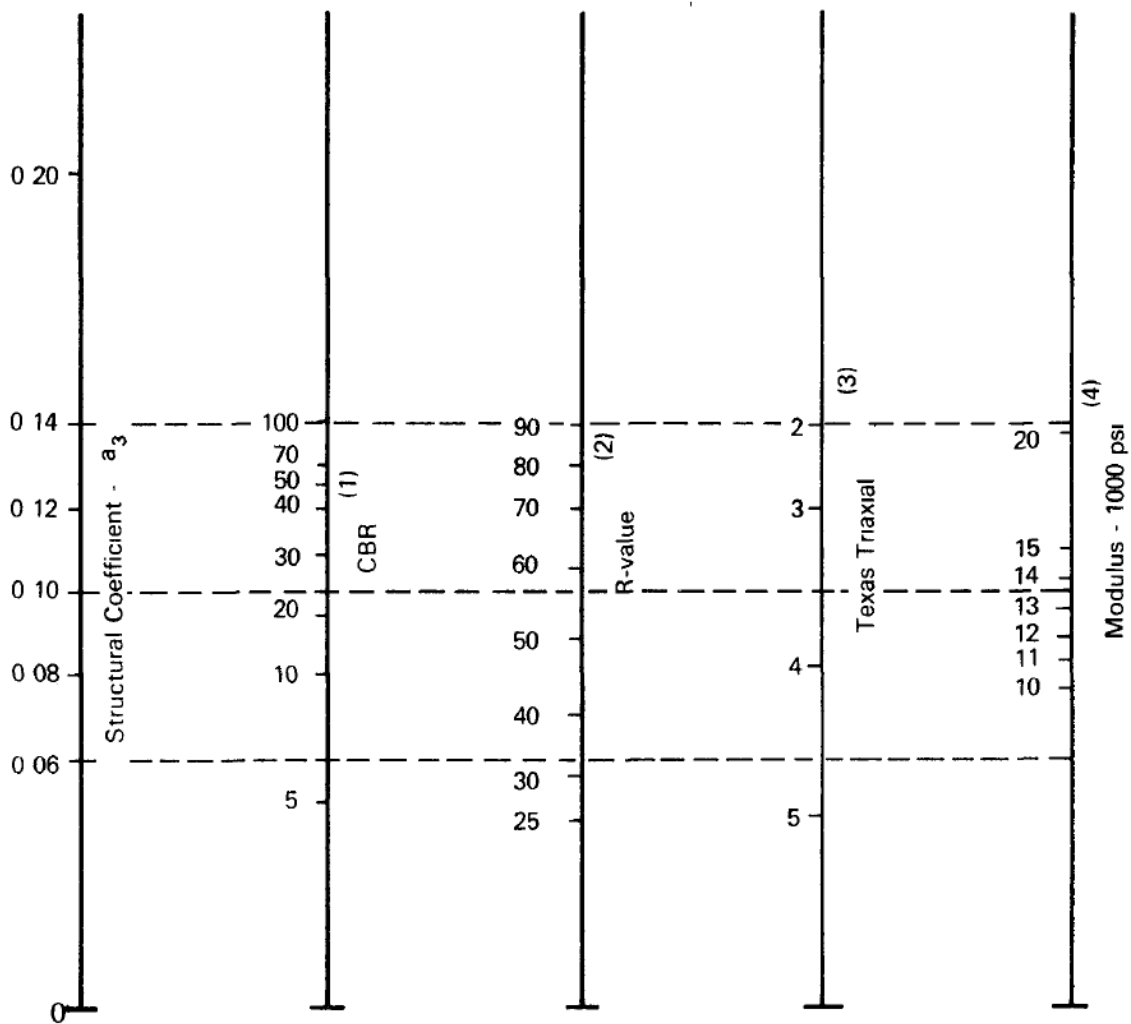
(2) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura AN6. Figura para determinar el módulo resiliente o coeficiente estructural para bases asfálticas



- (1) Scale derived by correlation obtained from Illinois
- (2) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura AN7. Figura para determinar el módulo resiliente o coeficiente estructural para subbases



- (1) Scale derived from correlations from Illinois
- (2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived from correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura AN8. Monograma para el diseño de pavimentos flexibles

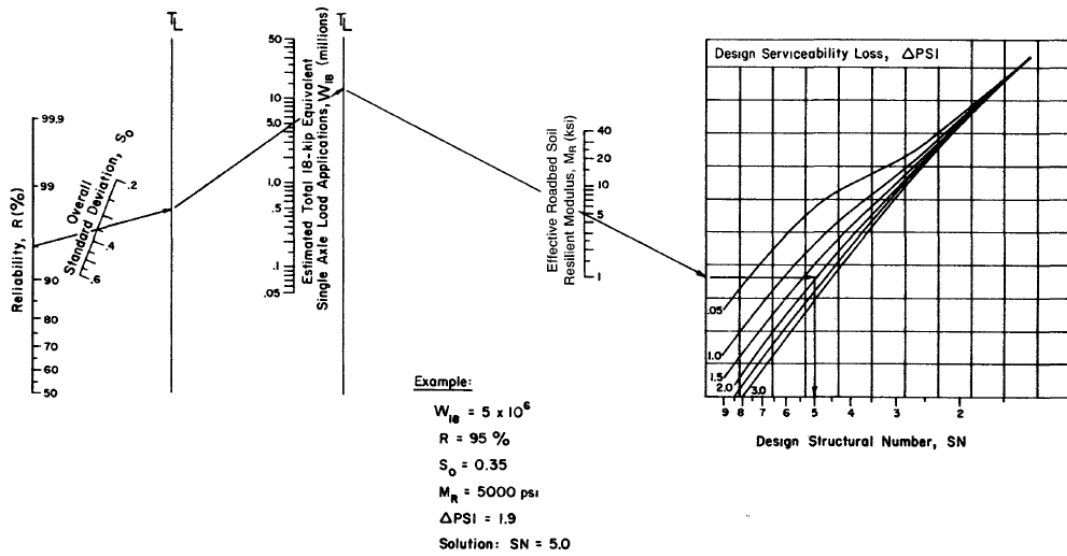


Figura AN9. Figura para el ajuste de temperatura para pavimentos con bases granulares

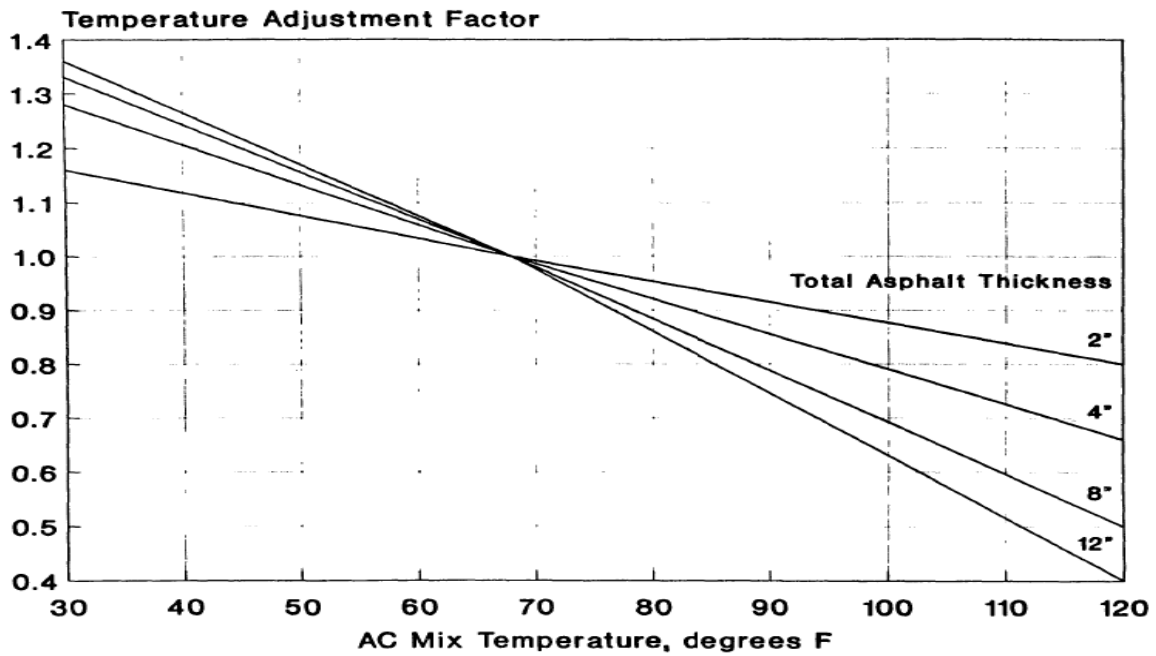


Figura AN10. Figura para el ajuste de temperatura para pavimentos con bases estabilizadas

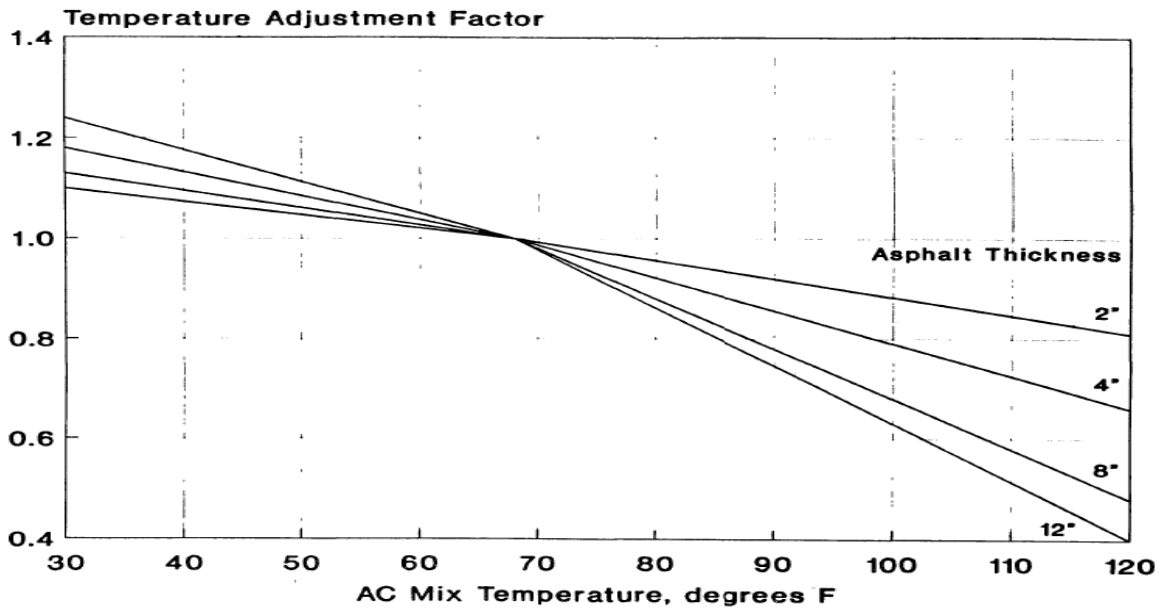
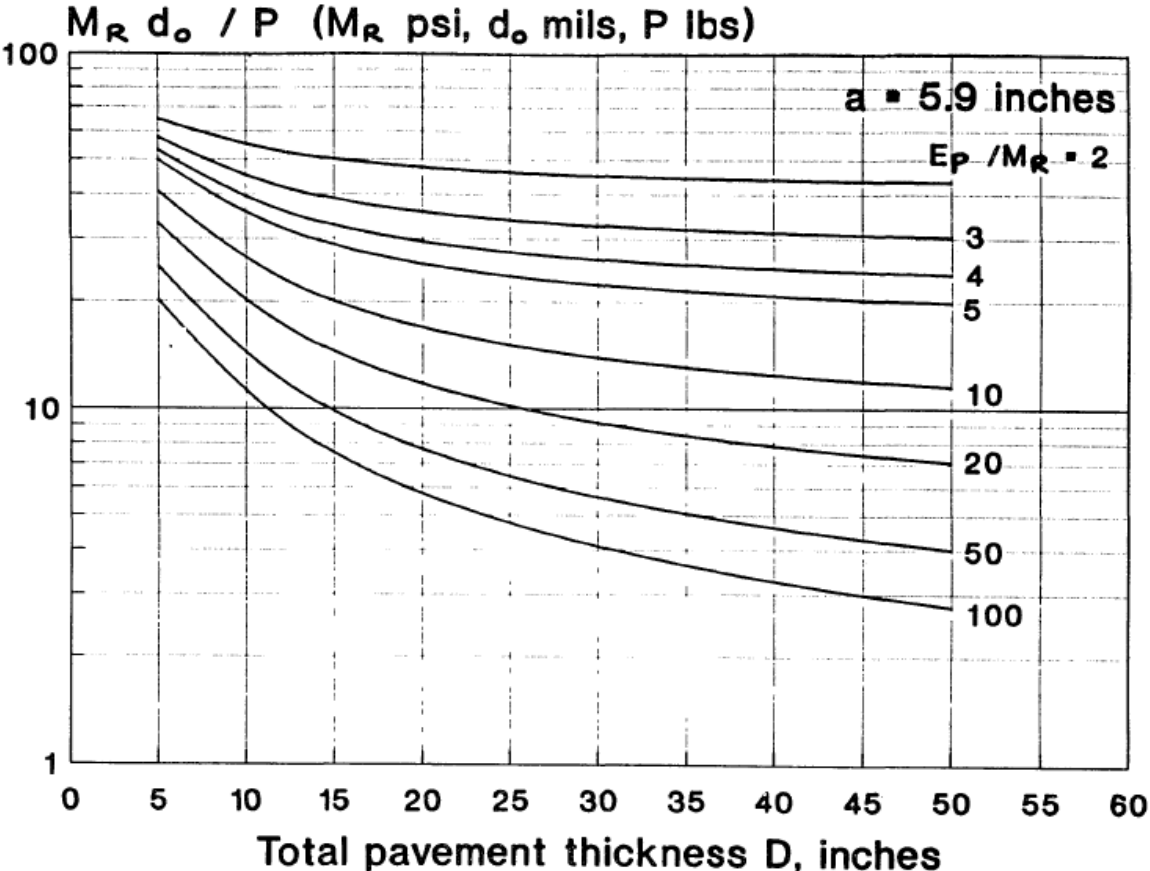


Figura AN11. Figura para la obtención de $\frac{E_p}{MR}$



Cuadro AN11. Coeficientes estructurales para la caracterización de los materiales		
Material	Condición superficial	Coeficientes
Concreto asfáltico	Poco o ningún agrietamiento de piel de cocodrilo y bajo agrietamiento transversal, baja severidad	0,35 a 0,40
	<10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad baja y/o <5% de grietas transversales, severidad media y alta	0,25 a 0,35
	>10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad baja y /o <10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad media y/o >5-10 % de grietas transversales, severidad media y alta	0,20 a 0,30
	>10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad media y /o <10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad alta y/o >10% de grietas transversales, severidad alta	0,14 a 0,20
	>10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad alta y/o >10% de grietas transversales, severidad alta	0,08 a 0,15
	Poco o ningún griaetamiento de piel de cocodrilo y bajo agrietamiento transversal, baja severidad	0,20 a 0,35
	<10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad baja y/o <5% de grietas transversales, severidad media y alta	0,15 a 0,25
	>10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad baja y /o <10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad media y/o >5-10 % de grietas transversales, severidad media y alta	0,15 a 0,20
	>10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad media y /o <10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad alta y/o >10% de grietas transversales, severidad alta	0,10 a 0,20
	>10 % de grietas de piel de cocodrilo, severidad alta y/o >10% de grietas transversales, severidad alta	0,08 a 0,15
Base y sub base granular	No hay evidencias de bombeo, degradación o contaminación por finos	0,10 a 0,14
	con hay evidencias de bombeo, degradación o contaminación por finos	0,00 a 0,10

Cuadro AN12. Peso máximo por tipo de eje				
Tipo de eje	Simbología del rodado		Pesos máximos permisibles por tipo de eje (Ton)	Tolerancia (± ton)
Eje simple delantero. Llanta simple	1-S		6	0,5
Eje simple no delantero. Llanta simple	1-S		6	0,5
Eje simple. Llantas dobles o duales	1-D		10	0,5
Eje doble (Tandém). Llanta simple	2-S		13	0,5
Eje doble (Tandém). Llanta mixtas	1-D/1-S	1-S/S-D	15	0,5
Eje doble (Tandém). Llanta dobles o duales	2-D		16,5	0,5
Eje triple (Trídem). Llanta simple	3-S		16,5	0,5
Eje triple (Trídem). Llanta mixtas	2-D/1-S	1-S/2D	20	0,5
Eje triple (Trídem). Llantas dobles o duales	3-D		23	0,5
Ejes mixtos. Llantas mixtas	2-D→ 1-S	1-S→2-D	23	0,5
Ejes mixtos. Llantas dobles o duales	2-D→ 1-D	1-D→ 2-D	27	0,5

Cuadro AN13. Peso máximo permisible para camión unitario								
Tipo de vehículo	Simbología de rodado	Número de ejes	Peso máximo permisible en grupo de ejes (ton)			PMA	PSN	Longitud máxima (m)
			1	2	3			
C2+	1S-1S	2	Señalado por el fabricante			6	6	6
C2	1S-1D	2	6	10	-	16	16	12
C3	1S-1D1S	3	6	15	-	21	21	12
C3	1S-2D	3	6	16,5	-	22,5	22,5	12
C4	1S-3D	4	6	23	-	29	29	12
	1S-1S2D			20	-	26	26	
C4+	2S-2D	4	13	16,5	-	29,5	29,5	12
C4++	1S-2D-1S	4	6	16,5	6	28,5	28,5	12
C5	1S-1S-2D-1S	5	6	20	6	32	32	12

PMA: Peso Máximo Autorizado

PSN = Peso Máximo Autorizado con Suspensión Neumática, para implementación futura

Cuadro AN14. Peso máximo permisible para camión con remolque									
Tipo de vehículo	Simbología de rodado	Número de ejes	Pesos máximos permisibles en grupo de ejes (ton)				PMA	PSN	Longitud máxima (m)
			1	2	3	4			
C2-R1	1S-1D-1D	3	6	10	10	-	26	26	21
C2-R2	1S-1D-1D-1D	4	6	10	10	10	36	36	21
C3-R1	1S-2D-1D	4	6	16,5	10	-	32,5	32,5	21
C3-R2	1S-2D-1D-1D	5	6	16,5	10	10	42,5	42,5	21
C3-R3	1S-2D-1D-2D	6	6	16,5	10	16,5	49	49	21
C4-R1	2S-2D-1D	5	13	16,5	10	-	39,5	39,5	21
C4-R1	1S-3D-1D	5	6	23	10	-	39	39	21
C4-R2	2S-2D-1D-1D	6	13	16,5	10	10	49,5	49,5	21
C4-R2	1S-3D-1D-1D	6	6	23	10	10	49	49	21
C4-R3	2S-2D-1D-2D	7	13	16,5	10	16,5	56	56	21
C4-R3	1S-3D-1D-2D	7	6	23	10	16,5	55,5	55,5	21

PMA: Peso Máximo Autorizado

PSN = Peso Máximo Autorizado con Suspensión Neumática, para implementación futura

Cuadro AN15. Peso máximo permisible para tractocamión con semirremolque									
Tipo de vehículo	Simbología de rodado	Número de ejes	Peso máximo permisible en grupo de ejes				PMA	PSN	Longitud máxima (m)
			1	2	3	4			
T2-S1	1S-1D-1D	3	6	10	10	-	26	26	21
T2-S2	1S-1D-2D	4	6	10	16,5	-	32,5	32,5	21
T2-S3	1S-1D-3D	5	6	10	23	-	39	39	21
T2-S1-2	1S-1D-1D-2D	5	6	10	10	16,5	42,5	42,5	21
T3-S1	1S-2D-1D	4	6	16,5	10	-	32,5	32,5	21
T3-S2	1S-2D-2D	5	6	16,5	16,5	-	39	39	21
T3-S3	1S-2D-3D	6	6	16,5	23	-	45,5	45,5	21
T3-S1-2	1S-2D-1D-2D	6	6	16,5	10	16,5	49	49	21

PMA: Peso Aáximo Autorizado

PSN = Peso Máximo Autorizado con Suspensión Neumática, para implementación futura

Cuadro AN16. Peso máximo permisible para tractocamión con doble semirremolque									
Tipo de vehículo	Simbología de rodado	Número de ejes	Peso máximo permisible en grupo de ejes				PMA	PSN	Longitud máxima (m)
			1	2	3	4			
T2-S1-S1	1S-1D-1D-1D	4	6	10	10	10	36	36	21
T2-S2-S2	1S-1D-2D-2D	6	6	10	16,5	16,5	49	49	21
T3-S2-S2	1S-2D-2D-2D	7	6	16,5	16,5	16,5	55,5	55,5	21

PMA: Peso máximo autorizado

PSN = Peso Máximo Autorizado con Suspensión Neumática, para implementación futura

Referencias

American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993. **AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 1993**. Washington.

Badilla, G. 2009. **Incidencia de las estaciones de pesaje en los factores camión en pavimentos de Costa Rica**. Lanamme UCR.

Casprowitz, L. 2010. **Determinación de Factores de Camión para el Diseño de Pavimentos flexibles en Guatemala**. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Castro, P. 2012. **Material del curso Construcción de Pavimentos**.

Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. 2002. **Catálogo y deterioros de pavimentos flexibles**.

Coronado, J. 2002. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. **Secretaría de Integración Económica**.

Elizondo, F. 2012. **Diseño estructural y conceptos de pavimentos asfálticos**. Lanamme UCR.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 2010. **Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010**.

Poder Ejecutivo. 2005. 01.19. **Reglamento de Circulación con Base en Peso y Dimensiones**. La Gaceta. La Uruca, San José, Costa Rica. 2-5 p.

Unidad de Materiales y Pavimentos. 2012. **Manual de Diseño Simplificado de Pavimentos de Bajo Volumen**. Lanamme UCR.

Yang H. Huang. **Pavement Analysis and Desing**. Second editon. Prentice Hall

