



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

PITRA

MANUAL DE USUARIO HERRAMIENTA

CR-ME VERSIÓN BETA

PREPARADO POR

Christopher Trejos-Castillo

San José, Costa Rica

Diciembre, 2016



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

**Programa de
Infraestructura
del Transporte**



programa de infraestructura
del transporte

UMP

Unidad de
Materiales y Pavimentos



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

MANUAL DE USUARIO HERRAMIENTA

CR-ME VERSIÓN BETA

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

Diciembre, 2016

Documento generado con base en el Art. 6, inciso i) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capít. 6, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | 5 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 8 |
| RESUMEN EJECUTIVO | 9 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| 2. INTERFAZ PRINCIPAL DEL CR-ME | 12 |
| 2.1 BARRA DE MENÚ..... | 12 |
| 2.2 PROYECTO | 14 |
| 2.3 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO | 15 |
| 2.4 DATOS DE ENTRADA | 16 |
| 3. INTERFAZ TRÁNSITO..... | 18 |
| 3.1 VENTANA PRINCIPAL | 18 |
| 3.2 INTERFAZ EJES EQUIVALENTES DE CARGA..... | 19 |
| 3.3 INTERFAZ ESPECTRO DE CARGA SIN SERIES HISTÓRICAS..... | 22 |
| 3.4 INTERFAZ ESPECTRO DE CARGA SIN SERIES HISTÓRICAS | 23 |
| 4. INTERFAZ DE CLIMA..... | 25 |
| 5. INTERFAZ DE MATERIALES..... | 26 |
| 5.1 INGRESO DE DATOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA | 27 |
| 5.1.1 NIVEL 3 DE INGRESO DE DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA | 28 |
| 5.1.2 NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS..... | 29 |



| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.1.3 | NIVEL 1 DE INGRESO DE DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA | 30 |
| 5.2 | INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO..... | 31 |
| 5.2.1 | NIVEL 3 DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO | 31 |
| 5.2.2 | NIVEL 2 DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO | 32 |
| 5.2.3 | NIVEL 1 DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO | 32 |
| 5.2.4 | CURVA MAESTRA..... | 33 |
| 6. | BASE Y SUBBASE..... | 34 |
| 6.1.1 | BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO..... | 35 |
| 6.1.2 | BASE ESTABILIZADA CON LIGANTE | 36 |
| 6.1.3 | BASE Y SUBBASE GRANULAR NIVEL 3..... | 36 |
| 6.1.4 | BASE Y SUBBASE GRANULAR NIVEL 2..... | 37 |
| 6.1.5 | BASE Y SUBBASE NIVEL 1 | 38 |
| 7. | SUBRASANTE..... | 40 |
| 8. | MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DAÑO Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE | 41 |
| 9. | SALIDA DEL SOFTWARE..... | 47 |
| 9.1 | MÓDULOS | 47 |
| 10. | EJEMPLO CON CR-ME..... | 52 |
| 10.1 | DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 52 |
| 10.1.1 | TRÁNSITO..... | 52 |
| 10.1.2 | CLIMA | 53 |
| 10.1.3 | CAPA ASFÁLTICA..... | 54 |



| | | |
|------------|-----------------------------|-----------|
| 10.1.4 | BASE GRANULAR..... | 55 |
| 10.1.5 | SUBBASE..... | 55 |
| 10.1.6 | SUBRASANTE..... | 56 |
| 10.2 | SOLUCIÓN DEL PROBLEMA | 56 |
| 11. | BIBLIOGRAFÍA..... | 61 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| FIGURA 1. | INTERFAZ PRINCIPAL | 12 |
| FIGURA 2. | VISTA DE LA BARRA DE MENÚ | 13 |
| FIGURA 3. | ACERCA DEL PROGRAMA | 14 |
| FIGURA 4. | INFORMACIÓN DEL PROYECTO | 14 |
| FIGURA 5. | CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO | 15 |
| FIGURA 6. | DATOS DE ENTRADA | 16 |
| FIGURA 7. | INTERFAZ PRINCIPAL MÓDULO TRÁNSITO | 18 |
| FIGURA 8. | MENÚ PARA EL NIVEL 2 DE LA VARIABLE TRÁNSITO | 18 |
| FIGURA 9. | INTERFAZ EJES EQUIVALENTES DE CARGA..... | 19 |
| FIGURA 10. | ALERTA EN QUE SE ESPECIFICA SI SE DESEA GUARDAR LOS DATOS EN UN ARCHIVO | 21 |
| FIGURA 11. | INTERFAZ ESPECTRO DE CARGA SIN SERIES HISTÓRICAS..... | 22 |



| | |
|--|----|
| FIGURA 12. ESPECTRO DE CARGA CON SERIES HISTÓRICAS | 24 |
| FIGURA 13. VENTANA DE DATOS CLIMÁTICOS | 26 |
| FIGURA 14. SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE CAPAS..... | 27 |
| FIGURA 15. INGRESO DE LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN EL NIVEL 3 | 28 |
| FIGURA 16. NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA | 29 |
| FIGURA 17. NIVEL 1 DE CONOCIMIENTO DE LOS DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA | 30 |
| FIGURA 18. NIVEL 3 DE INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO | 31 |
| FIGURA 19. NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO | 32 |
| FIGURA 20. NIVEL 1 DE INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO | 33 |
| FIGURA 21. CURVA MAESTRA..... | 34 |
| FIGURA 22. BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO | 35 |
| FIGURA 23. BASE ESTABILIZADA CON LIGANTE | 36 |
| FIGURA 24. VENTANA DE INGRESO NIVEL 3 BASE GRANULAR | 37 |
| FIGURA 25. NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS PARA BASES Y SUBBASES | 38 |
| FIGURA 26. NIVEL 1 DE INGRESO DE DATOS PARA BASE Y SUBBASE GRANULAR ... | 39 |
| FIGURA 27. DATOS DE ENTRADA MODELO UNIVERSAL | 40 |
| FIGURA 28. DATOS DE INGRESO SUBRASANTE PARA NIVELES 1, 2 Y 3 | 41 |



| | |
|---|----|
| FIGURA 29. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN | 43 |
| FIGURA 30. MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAS REPETICIONES PERMITIDAS POR FATIGA DE ABAJO HACIA ARRIBA | 43 |
| FIGURA 31. MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAS REPETICIONES PERMITIDAS POR FATIGA DE ABAJO HACIA ARRIBA | 44 |
| FIGURA 32. MODELO DE AHUELLAMIENTO | 44 |
| FIGURA 33. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA..... | 45 |
| FIGURA 34. AHUELLAMIENTO EN LA BASE..... | 46 |
| FIGURA 35. AHUELLAMIENTO EN LA SUBRASANTE. | 46 |
| FIGURA 36. FATIGA EN BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO..... | 47 |
| FIGURA 37. MÓDULOS RESILIENTES MENSUALES PARA LAS CAPAS NO LIGADAS Y MÓDULO DINÁMICO MENSUAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA | 48 |
| FIGURA 38. MÓDULOS RESILIENTES DE LAS CAPAS NO LIGADAS EN FUNCIÓN DE LA CARGA Y MÓDULO DINÁMICO MENSUAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA | 49 |
| FIGURA 39. DAÑO POR FATIGA, ÁREA AGRIETADA Y AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL | 50 |
| FIGURA 40. AHUELLAMIENTO EN CADA CAPA | 51 |
| FIGURA 41. MÓDULOS RESILIENTES DE LAS CAPAS NO LIGADAS | 57 |
| FIGURA 42. DAÑO POR FATIGA..... | 58 |
| FIGURA 43. ÁREA AGRIETADA | 59 |



FIGURA 44. AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL.....59

FIGURA 45. AHUELLAMIENTO EN CADA CAPA60

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PORCENTAJE Y FACTOR DAÑO DE CADA TIPO DE VEHÍCULO.....53

TABLA 2. DATOS CLIMÁTICOS.....54



RESUMEN EJECUTIVO

Los conceptos mecanísticos - empíricos de pavimentos son la tendencia actual a nivel mundial para el análisis y diseño de pavimentos flexibles y rígidos. La parte mecanística de estas técnicas se encuentra en la determinación analítica-numérica de las respuestas de los pavimentos ante solicitaciones mecánicas específicas. Para el caso de los pavimentos flexibles, normalmente se emplea la solución analítica de multicapa elástica para obtener estas respuestas, a saber: esfuerzos, deformaciones y deflexiones.

CR-ME es la herramienta informática de la primera guía de diseño mecanística-empírica de Costa Rica, la cual permitirá mejorar la calidad de los diseños de estructuras de pavimentos en el país. Este software incluye características que sólo es posible encontrar en software de diseño de pavimentos flexibles con un alto costo. Considera las principales variables que afectan el diseño de pavimentos, tales como el clima, el tránsito y las características de los materiales.

El software incluye modelos calibrados para el país, incluyendo la investigación realizada en el LanammeUCR en materia de pavimentos para el diseño eficiente de las estructuras de pavimento, evitando fallas prematuras que producen un sobre costo en los proyectos. El software está desarrollado en Visual Basic 6.0 y puede ser utilizado en sistemas operativos Windows de 32 y 64 bits.

Se pretende con este software, proveer a los ingenieros de carreteras de una aplicación fácil de utilizar como complemento de la guía de diseño mecanístico de pavimentos de Costa Rica y que les permita realizar diseños duraderos utilizando los principales avances en ingeniería de pavimentos.



1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de CR-ME se enmarca dentro del objetivo final de obtener la primera guía de diseño mecanística-empírica de pavimentos para Costa Rica, labor en ejecución por parte del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Al ser la estructura de pavimentos flexibles la más utilizada en el país para la construcción de carreteras y ser el asfalto el material ingenieril más utilizado, es de gran importancia contar con un software que permita diseñar las estructuras de pavimento asfáltico de manera más eficiente y permitir un ahorro al país en la construcción de carreteras que tengan una vida útil mayor.

CR-ME es un programa informático de análisis de pavimentos flexibles, que permite calcular el desempeño del pavimento a las cargas aplicadas por los vehículos, basados en la teoría de multicapa elástica y en modelos de predicción del desempeño de pavimentos desarrollados gracias a investigación del LanammeUCR. Para esto el ingeniero diseñador deberá colocar valores de espesores iniciales para valorar si soportan el tránsito pronosticado para el proyecto e iterar hasta obtener el diseño óptimo.

Este software es muy sencillo de utilizar, con una interfaz muy amigable que permite fácilmente calcular la deformación permanente en las capas de la estructura, además de calcular el daño por fatiga y el agrietamiento en la carpeta asfáltica.

Para la estimación de los módulos resilientes de las capas que conforman la estructura, el software utiliza modelos predictivos en función de las condiciones climáticas para variar este valor. Además de permitir al usuario utilizar modelos que consideren la propiedad esfuerzo-dependiente de los materiales granulares.

El tránsito esperado en el proyecto se puede estimar utilizando el enfoque de ejes equivalentes de carga o puede utilizarse espectros de carga, siendo este último una manera más específica



de tomar en cuenta la variable tránsito, la cual es una de las más importantes al realizar el diseño de la estructura.

Esta herramienta utiliza la teoría de multicapa elástica, basado en la teoría de Burmister (1943) y ampliada por Huang (1967). El software obtiene la respuesta del pavimento en puntos de interés para el diseño y luego utiliza estos valores obtenidos dentro de los modelos predictivos para calcular el daño que se producirá a lo largo de la vida útil esperada del proyecto, tanto por fatiga como por deformación permanente.

La presente versión es de prueba, es decir está en fase de verificación de los resultados obtenidos por el programa. Algunas mejoras posteriores se realizarán a la interfaz y a algunas funcionalidades.

Este software está protegido por la Ley de Derechos de Autor. El propietario tiene derecho exclusivo de reproducirlo y desarrollarlo. El propietario de los derechos impide otras formas de compilación o ensamblaje en alguna forma, la traducción del mismo a un lenguaje distinto. El programa no debe ser usado total o parcialmente, en el desarrollo de un nuevo programa, para ser distribuido con un nombre distinto, excepto cuando los permisos hayan sido concedidos por el propietario de los derechos de autor. Deberá reconocerse el uso de la herramienta en cualquier publicación en la que se haga uso.

El usuario final de la herramienta debe hacer un análisis apropiado de los datos introducidos y obtenidos, de manera que la entera responsabilidad, de la correcta interpretación y utilización de los resultados, es del usuario. Por la diversidad de condiciones y hardware bajo el cual el programa puede ser usado, no se garantiza que funcione bajo todos los escenarios. Se advierte al usuario que es necesario que tenga conocimiento de los conceptos, suposiciones y limitaciones que hay detrás de los procedimientos de cálculo, y conocer por completo el programa para que pueda darse cuenta de la capacidad del mismo antes de su uso. Los desarrolladores no se hacen responsables por daños directos, indirectos, causados o incidentales que surjan de la posibilidad o no del uso de esta herramienta.



2. INTERFAZ PRINCIPAL DEL CR-ME

Al iniciar el programa se desplegará la interfaz principal del programa. En la Figura 1 se muestra las principales características del programa.

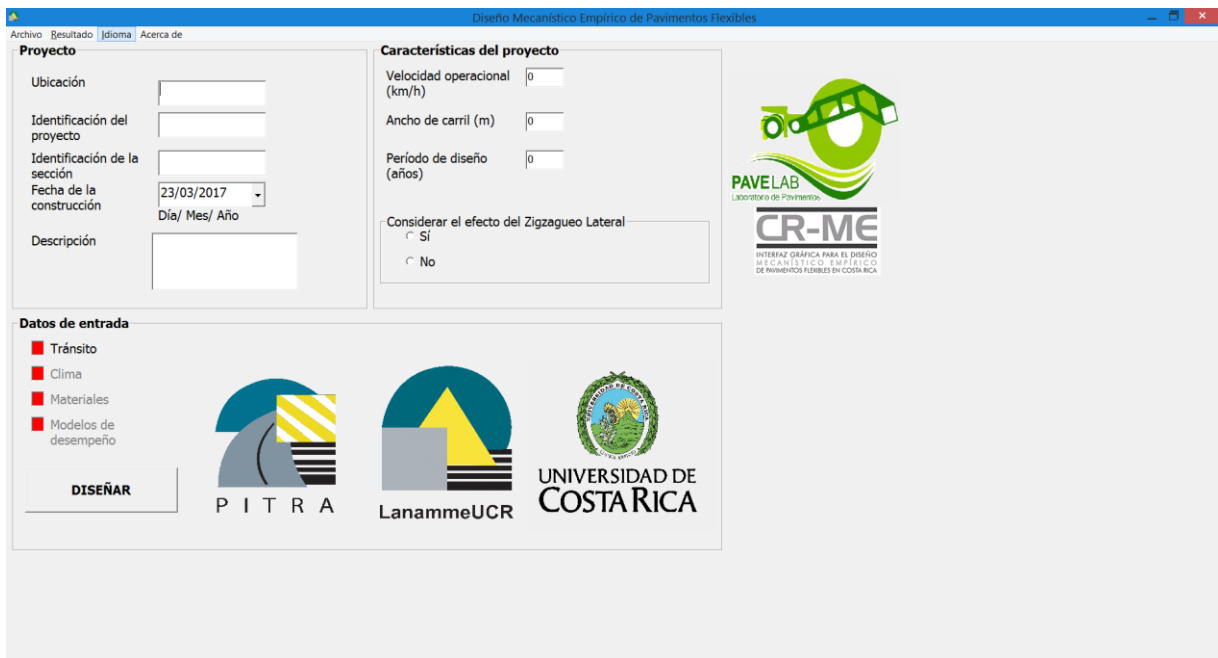


Figura 1. Interfaz principal

La interfaz se compone esencialmente de los elementos que se mostraran a continuación.

2.1 Barra de menú

En la parte superior de la Figura 1 se aprecia la barra de menú. En la barra de menú se encuentra el menú Archivo que contiene los submenús Guardar proyecto, Abrir proyecto y Nuevo proyecto. El menú Guardar Proyecto permite guardar un archivo con todos los datos del proyecto en un archivo *.crm, el menú Abrir Proyecto permite abrir un archivo previamente guardado con los datos del proyecto y el menú Nuevo Proyecto permite al usuario iniciar un nuevo proyecto, dando la opción de guardar los datos que ha ingresado anteriormente. El menú Nuevo proyecto puede ser accesado con la combinación de teclas Ctl+N, el menú Guardar proyecto con las teclas Ctl+S y Abrir proyecto con Ctl+O.



El menú de Resultado abre la ventana de vista de carpetas para guardar el archivo con los datos del proyecto en *.txt, el usuario podrá ver los datos de deformación permanente, daño por fatiga de arriba hacia abajo, daño por fatiga de abajo hacia arriba, agrietamiento longitudinal y porcentaje de área agrietada para cada mes durante la vida útil del proyecto. También se muestran los módulos resilientes mensuales estimados de las capas no ligadas y el módulo dinámico mensual estimado de la carpeta asfáltica.

La herramienta permite mostrar la información en español o inglés, para esto el usuario debe ir al menú Idioma y seleccionar ya sea español o inglés y se modificarán las etiquetas al idioma seleccionado.

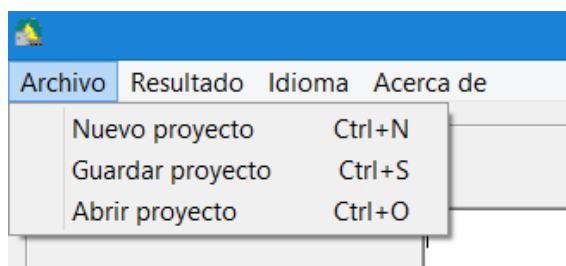


Figura 2. Vista de la Barra de menú

En el menú Acerca de, se mostrará una ventana como la que se muestra en la Figura 3. Esta misma ventana aparece durante tres segundos al inicio del programa.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



Figura 3. Acerca del programa

A continuación, se detallan las funciones de las secciones de la interfaz principal.

2.2 Proyecto

Proyecto

| | |
|------------------------------|-----------------------------|
| Ubicación | <input type="text"/> |
| Identificación del proyecto | <input type="text"/> |
| Identificación de la sección | <input type="text"/> |
| Fecha de construcción | 30/11/2016 Día/ Mes/ Año |
| Descripción | <input type="text"/> |

Figura 4. Información del proyecto

Cuenta con las sub-secciones, todos estos datos son opcionales:

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Reporte LM-PI-UMP-057-R1 | Fecha de emisión: 28 de marzo de 2017 | Página 14 de 61 |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|



- Ubicación; el usuario escribe la ubicación del proyecto.
- Identificación del proyecto; se puede escribir un ID para el proyecto a diseñar.
- Identificación de la sección; el usuario escribe un ID para la sección a diseñar.
- Fecha de construcción; se especifica la fecha en que se iniciará la construcción
- Descripción; el usuario podrá anotar datos extras del proyecto.

2.3 Características del proyecto

Características del proyecto

Velocidad operacional (km/h)

Ancho de carril (m)

Período de diseño (años)

Considerar el efecto del Zigzagado Lateral

☐ Sí

☐ No

Figura 5. Características del proyecto

En apartado, se encuentran datos generales del proyecto que serán necesarios para estimar con los modelos más precisos el daño esperado en la estructura al estar en uso. Estos datos son obligatorios y el software no permitirá avanzar en los módulos sin haber completado los datos solicitados.

Cuenta con las sub-secciones:

- Velocidad operacional: el usuario deberá introducir un valor en km/h de la velocidad operacional del proyecto. Este dato es necesario para la estimación del módulo dinámico de la carpeta asfáltica a una cierta velocidad.



- Ancho de carril: se debe ingresar un valor de ancho de carril en metros, el cual será utilizado de acuerdo a ciertos modelos para estimar el zigzagado lateral que se espera que ocurra cuando la carretera esté en funcionamiento.
- Período de diseño: es el tiempo en años de vida útil esperada para el proyecto.
- Considerar el efecto del Zigzagado Lateral; el ingeniero diseñador podrá especificar si utilizar los modelos que consideran que los vehículos abarcarán una huella variable, lo cual reduce el daño, ya que la aplicación de carga no se da en todas las ocasiones en el mismo lugar o puede considerar el caso más crítico, en el cual no considera el zigzagado lateral.

2.4 Datos de entrada


Datos de entrada


☐ Tránsito


☐ Clima

☐ Materiales

☐ Modelos de desempeño


P I T R A


LanammeUCR


UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

DISEÑAR

Figura 6. Datos de entrada

En esta sección se debe dar clic al botón en que se quiere ingresar los datos. El software no permitirá ingresar los datos si no han sido ingresados la información necesaria. Se mostrará en rojo las opciones que aún no hayan sido completadas y en verde las que ya se han completado. Para acceder a la ventana de Tránsito deben de haberse completado todas las características del proyecto. Podrá accederse al módulo Clima únicamente luego de haber completado todos los datos necesarios para Tránsito y así sucesivamente para poder acceder a los demás módulos. Se debe dar clic a las etiquetas o al cuadro para acceder a cada ventana.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Se podrá dar clic al botón de DISEÑAR únicamente después de haber completado todos los módulos.

A continuación, se describirá cada uno de los módulos de ingreso de datos: Tránsito, Clima, Materiales y Modelos de desempeño, además de indicar la funcionalidad del botón DISEÑAR.



3. INTERFAZ TRÁNSITO

3.1 Ventana principal

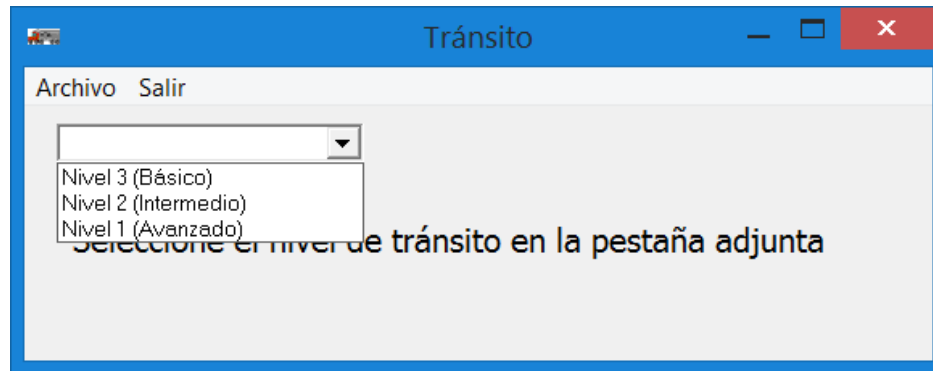


Figura 7. Interfaz principal módulo Tránsito

El menú principal cuenta con las sub-secciones:

- Archivo: el usuario podrá guardar los datos de Tránsito ingresados o Abrir los datos de Tránsito previamente guardados en un archivo *.tra. Esto le permitirá probar diferentes datos de entrada de tránsito.
- Salir: permite al usuario salir del módulo tránsito sin guardar los datos ingresados.
- Selección de nivel: se selecciona el nivel de conocimiento de la variable Tránsito, tal como se muestra en la Figura 7 donde se selecciona alguno de los tres niveles de entrada. En el caso del Nivel 2, se abrirá otro menú en el que se podrá elegir entre utilizar Ejes Equivalentes o Espectro de Carga. En caso de elegir Espectro de Carga, el usuario deberá elegir entre Con o Sin Series Históricas, lo cual abrirá ventanas distintas, este menú puede verse en la Figura 8.

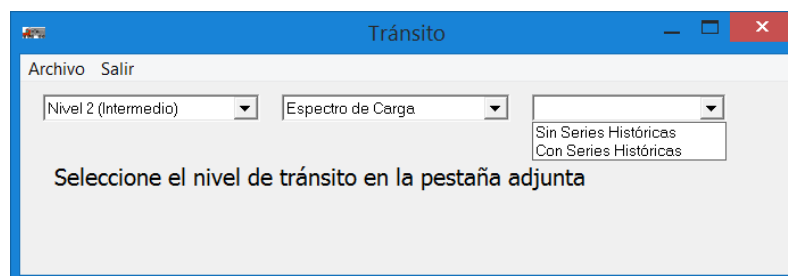


Figura 8. Menú para el Nivel 2 de la variable Tránsito



3.2 Interfaz Ejes Equivalentes de Carga

Tránsito

Archivo Salir

Nivel 3 (Básico)

Ejes Equivalentes de Carga (ESAL)

☐ Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T con series históricas

N (8.2 T)

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

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

Factor de distribución por carril (%)

| Tipos de vehículos | Porcentaje del TPD | Factor daño |
|--------------------|--------------------|-------------|
| Automóviles | 55 | 0 |
| Buses | 12 | 0.42 |
| C2P | 5.5 | 0.31 |
| C2G | 8.1 | 2.3 |
| C3 | 4.2 | 3.81 |
| C3S2 | 9.9 | 5.11 |
| C3S3 | 5.3 | 4.02 |

ESAL durante la construcción (Nc)

Porcentaje atraído

Porcentaje generado

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

ESAL calculado

Calcular ESAL

Guardar

Figura 9. Interfaz Ejes Equivalentes de Carga

Esta ventana aparecerá cuando el usuario elija el Nivel 3 o el Nivel 2 con la opción Ejes Equivalentes de Carga. Se deberán ingresar los siguientes datos:

- Selección entre Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T con o sin series históricas: al elegir uno o el otro bloqueará algunas casillas.



Si el usuario elige la opción con series históricas, se le abrirá la siguiente opción:

- Casilla N (8.2 T): en este campo de texto el usuario deberá escribir la cantidad de ejes equivalentes esperados a lo largo del proyecto realizado mediante un estudio previo tomando en consideración series históricas.

En los casos en que el usuario elija la opción sin series históricas, las opciones que se le abrirán son las siguientes:

- TPD inicial (TPDi): acá se introduce el tránsito promedio diario inicial del proyecto, este dato puede ser obtenido mediante conteos por parte del diseñador de la carretera. Valores iguales a 0 o negativos llevarán a un error en el programa.
- Crecimiento vehicular: es la tasa esperada de crecimiento geométrico de la cantidad de vehículos transitando la carretera. Este valor debe ser mayor o igual que cero.
- Factor de distribución direccional (%): se debe especificar qué porcentaje del TPD transita por el sentido del carril a diseñar, normalmente este valor es un 50% a menos que haya un estudio que especifique los valores reales. Este debe ser un valor mayor que 0 y menor que 100, en caso contrario se tendrá un error.
- Factor de distribución por carril (%): se debe especificar qué porcentaje del total de camiones que transitarán la carretera van por el carril más crítico, este dato es importante al diseñar una carretera con un carril de ascenso, pues en estos casos habrá una mayor cantidad de vehículos pesados transitando por el carril de ascenso, lo cual deberá considerarse en el diseño de este carril. Este debe ser un valor mayor que 0 y menor que 100, en caso contrario se tendrá un error.
- Tabla de ingreso del porcentaje de cada tipo de vehículo y el factor daño promedio estimado de cada tipo de vehículo: el usuario especificará el porcentaje del TPD que corresponde a cada tipo de vehículo y el factor daño asociado. Es importante mencionar que valores negativos llevarán a un error o los casos en que los porcentajes no sumen 100%.



- Nivel de confianza: El software con un modelo estadístico predice los ejes equivalentes esperados para una confiabilidad especificada por el usuario. Un valor de 50% llevará al valor sin modificación debido al Nivel de confianza.

En ambos casos se habilitarán las siguientes opciones:

- ESAL durante la construcción: en esta casilla el usuario introducirá la cantidad de ejes equivalentes de carga que se contaron durante la construcción de la carretera. El ingeniero diseñador puede no considerar esta variable colocando un 0.
- Porcentaje atraído: representa el porcentaje de vehículos que se estima estará atrayendo el proyecto.
- Porcentaje generado: representa el porcentaje de vehículos que se estima estará generado la construcción de la carretera.
- Factor de amplificación: es un factor multiplicativo que permite al ingeniero encargado del diseño valorar el efecto que tendrá en el diseño algún error en la cuantificación de la variable Tránsito, un valor de 1 indica el caso sin afectación.

Con el botón Cálculo de ESAL, el usuario podrá ver la cantidad de ejes equivalentes estimados para el proyecto. Luego al dar click en el botón Guardar, el software preguntará si desea Guardar los datos en un archivo *.tra tal como se muestra en la Figura 10, en caso de que el usuario dé click en Sí, se abrirá una ventana en la que el usuario podrá elegir una ubicación para salvar el archivo. Esta opción está disponible en todas las ventanas de ingreso de los datos de la variable Tránsito. Luego de dar click en Guardar se cerrará la ventana de Tránsito.

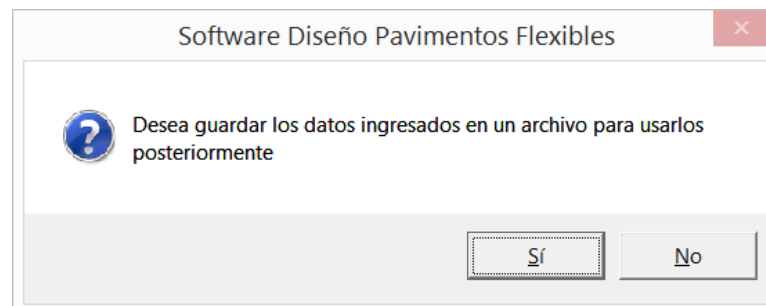


Figura 10. Alerta en que se especifica si se desea guardar los datos en un archivo



3.3 Interfaz Espectro de Carga Sin Series Históricas

Esta ventana aparecerá cuando el usuario elija el Nivel 2 con la opción Espectro de carga sin series históricas. Deberá ingresar los siguientes datos:

Tránsito

Archivo Salir

Nivel 2 (Intermedio) Espectro de Carga Sin Series Históricas

Espectro de Carga sin Series Históricas

Repeticiones sin Series Históricas

TPD año inicial (TPDi) 1371 Crecimiento vehicular (%) 3

Factor de distribución por carril (%) 100 Factor de distribución direccional (%) 50

| Tipos de vehículos | Porcentaje del TPD |
|--------------------|--------------------|
| Automóviles | 55 |
| Buses | 12 |
| C2P | 5.5 |
| C2G | 8.1 |
| C3 | 4.2 |
| C3S2 | 9.9 |
| C3S3 | 5.3 |

Nivel de confianza de la variable Tránsito (%) 90

Factor de amplificación 1

| Eje Simple | Eje Simple Dual | Eje Tandem | Eje Tridem |
|---------------------|---------------------------|------------|--------------------------------------|
| Rango de carga (kg) | Carga Representativa (kg) | Porcentaje | Repeticiones en el período de diseño |
| 0-500 | 250 | 0.03 | 448 |
| 500-1000 | 750 | 0.25 | 3739 |
| 1000-1500 | 1250 | 2.93 | 43831 |
| 1500-2000 | 1750 | 12.62 | 188791 |
| 2000-2500 | 2250 | 7.75 | 115937 |
| 2500-3000 | 2750 | 4.72 | 70609 |
| 3000-3500 | 3250 | 4.8 | 71806 |
| 3500-4000 | 3750 | 10.56 | 157974 |
| 4000-4500 | 4250 | 28.26 | 422760 |
| 4500-5000 | 4750 | 20.76 | 310562 |

Calcular las repeticiones esperadas

Guardar

Figura 11. Interfaz Espectro de Carga sin series históricas

- El TPD año inicial, el crecimiento vehicular, el factor de distribución por carril, el factor de distribución direccional, el nivel de confianza y el porcentaje de cada tipo de vehículo fueron descritos en la sección anterior.



- El Factor de amplificación de las repeticiones, es un factor de ajuste que permite al diseñador valorar el efecto en una mala estimación de la variable tránsito, un factor de 1 representa el caso sin variar la cantidad de repeticiones.
- La tabla que indica el rango de los valores de las cargas en kilogramos para cada tipo de eje (eje simple, simple dual, tándem o trídem), solicita al usuario una carga representativa en kilogramos, un porcentaje de cada una de las cargas de cada tipo de eje y el espacio de repeticiones esperadas se llena automáticamente con los datos ingresados por el usuario al dar click al botón de Calcular las repeticiones esperadas. La carga representativa debe ser un valor que esté entre el rango de la carga. Se recomienda al ingeniero que haga un análisis estadístico con un nivel de confiabilidad de los datos para obtener este dato. Los porcentajes de cada carga deben sumar un total del 100 para completar el espectro de carga.
- El botón Calcular las repeticiones esperadas permite al usuario visualizar cuántas repeticiones de una carga específica para un tipo de eje se esperan durante la vida útil del proyecto.
- El botón “Guardar” guarda los datos ingresados por el usuario y cerrará la ventana. También consultará si desea guardar los datos en un archivo *.tra igual como se describió en la sección anterior.

3.4 Interfaz Espectro de Carga sin Series Históricas

Esta ventana aparecerá al elegir el Nivel 1 de conocimiento en la lista desplegable o al elegir el Nivel 2 con la opción Espectro de Carga Con Series Históricas. La forma en que el ingeniero calcula la cantidad de repeticiones en cada uno de los niveles de conocimiento descritos anteriormente queda a su criterio, sin embargo se recomienda que para el Nivel 1 se haya realizado mediciones reales a la carretera a ser rehabilitada, mientras que para el Nivel 2 con Espectro de Carga Con Series Históricas, se espera que el ingeniero tenga una base de datos robusta de la cuál con un análisis estadístico logré estimar la cantidad de repeticiones de carga esperadas para cada intervalo de cada tipo de eje.



La ventana que se presentará al usuario es igual a la que se muestra en la Figura 12. Las opciones que tiene esta opción son las siguientes:

| Rango de carga (kg) | Carga Representativa (kg) | Repeticiones en el período |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0-500 | 250 | 448 |
| 500-1000 | 750 | 3739 |
| 1000-1500 | 1250 | 43831 |
| 1500-2000 | 1750 | 188791 |
| 2000-2500 | 2250 | 115937 |
| 2500-3000 | 2750 | 70609 |
| 3000-3500 | 3250 | 71806 |
| 3500-4000 | 3750 | 157974 |
| 4000-4500 | 4250 | 422760 |
| 4500-5000 | 4750 | 310562 |
| 5000-5500 | 5250 | 71357 |
| 5500-6000 | 5750 | 25730 |
| 6000-6500 | 6250 | 8826 |
| 6500-7000 | 6750 | 2243 |
| 7000-7500 | 7250 | 747 |
| 7500-8000 | 7750 | 299 |
| 8000-8500 | 8250 | 0 |
| 8500-9000 | 8750 | 0 |
| 9000-9500 | 9250 | 0 |
| 9500-10000 | 9750 | 0 |
| 10000-10500 | 10250 | 0 |
| 10500-11000 | 10750 | 0 |

Figura 12. Espectro de carga con Series Históricas

- La tabla de rango de cargas en kilogramos para cada tipo de eje, solicita al usuario ingresar una carga representativa, tal como se describió en la ventana anterior, además que en este caso el ingeniero a cargo del diseño deberá introducir las repeticiones esperadas que obtuvo mediante su estudio.



- Factor de amplificación de las repeticiones: tiene la misma funcionalidad descrita en la sección anterior.

4. INTERFAZ DE CLIMA

Los materiales que componen la estructura de un pavimento, son fuertemente afectados por las condiciones climáticas. Costa Rica, al ser un país tropical, presenta variaciones considerables de temperatura y humedad dependiendo de la época del año.

La humedad afecta a los materiales granulares que conforman la base, subbase y subrasante, mientras que la temperatura tiene un efecto principalmente sobre la carpeta asfáltica, la cual está conformada por un material viscoelástico, lo cual hace que su resistencia esté ligada a la temperatura.

Para afectar el módulo resiliente de las capas no ligadas, se utiliza el índice de humedad de Thornwaite (TMI por sus siglas en inglés), el cual el usuario puede calcular ya sea utilizando algún modelo basado en la temperatura y la precipitación o un modelo que considere más variables climáticas (humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar), tal como el modelo de Penmann-Monteith. De momento, el software no realiza el cálculo del índice de humedad Thornwaite, sin embargo, se espera obtener datos de las estaciones climáticas del país para que el usuario pueda elegir una o varias estaciones y que se carguen los datos de temperatura y TMI automáticamente.

En la Figura 13 se muestra la ventana de datos climáticos. Las funciones son las siguientes:

- Tabla de ingreso del índice de humedad de Thornwaite (TMI) y la temperatura mensual promedio: el usuario ingresará los datos solicitados para luego ser utilizados por el software en los modelos de afectación climática.
- El botón Guardar permite al usuario guardar los datos y le preguntará al usuario si desea guardar los datos en un archivo *.cli. Esto permite al usuario considerar diferentes escenarios climáticos en distintos proyectos.

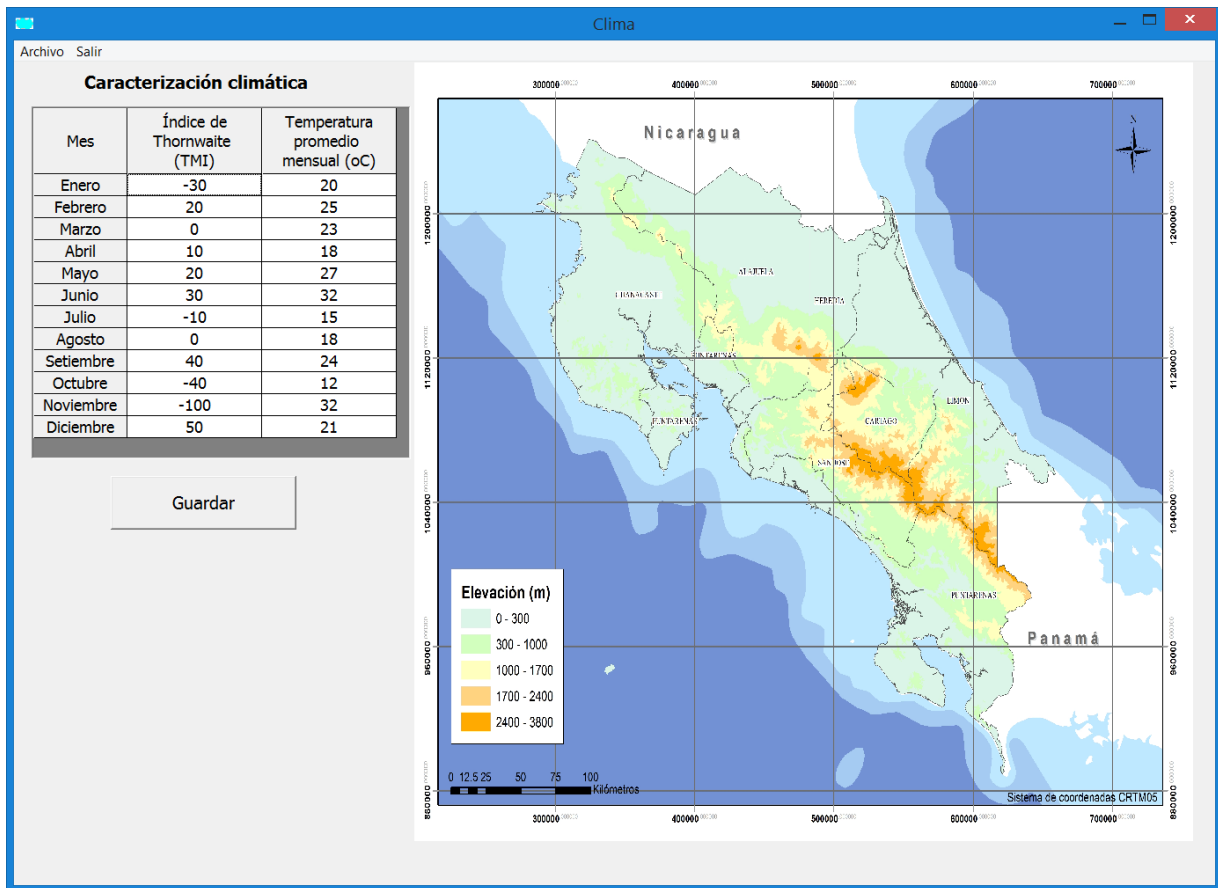


Figura 13. Ventana de datos climáticos

5. INTERFAZ DE MATERIALES

En función de la importancia del proyecto, la cual será definida por el usuario según la cantidad de ejes equivalentes esperados. Sin embargo, el programa permitirá al ingeniero combinar niveles de conocimiento de los materiales.

En la Figura 14 se muestra la selección de la cantidad de capas. Se puede elegir un máximo de 10 capas por efectos prácticos. El software da la opción de seleccionar 3 capas asfálticas. Esta práctica se recomienda en ingeniería de pavimentos para que la primera capa sea realizada con una mezcla asfáltica drenante, la siguiente capa se diseña para que sea resistente a la deformación permanente con una granulometría más gruesa, mientras que la



última capa se realiza resistente a la fatiga con un porcentaje de asfalto mayor. Se permiten además 3 bases, 2 subbases y siempre se tendrá una subrasante.

Figura 14. Selección de la cantidad de capas

Para acceder al módulo de ingreso de datos de cada capa se deberá dar clic a la imagen de la capa. Al dar clic a las imágenes se mostrará la ventana específica de cada capa. A continuación, se mostrará la ventana destinada a ingresar los datos de la carpeta asfáltica.

5.1 Ingreso de datos de la carpeta asfáltica

En la ventana que se muestra en la Figura 15, se ingresan los datos de la mezcla asfáltica. Se dispone de tres niveles de ingreso de los datos.

5.1.1 Nivel 3 de ingreso de datos de la mezcla asfáltica

El nivel 3 es el nivel en que el usuario cuenta con menor conocimiento de los datos de la mezcla asfáltica, utilizando correlaciones con la granulometría de la mezcla y el volumen efectivo de asfalto y el porcentaje de vacíos, expresados como porcentaje. Posteriormente se explicarán el Nivel 1 y 2.

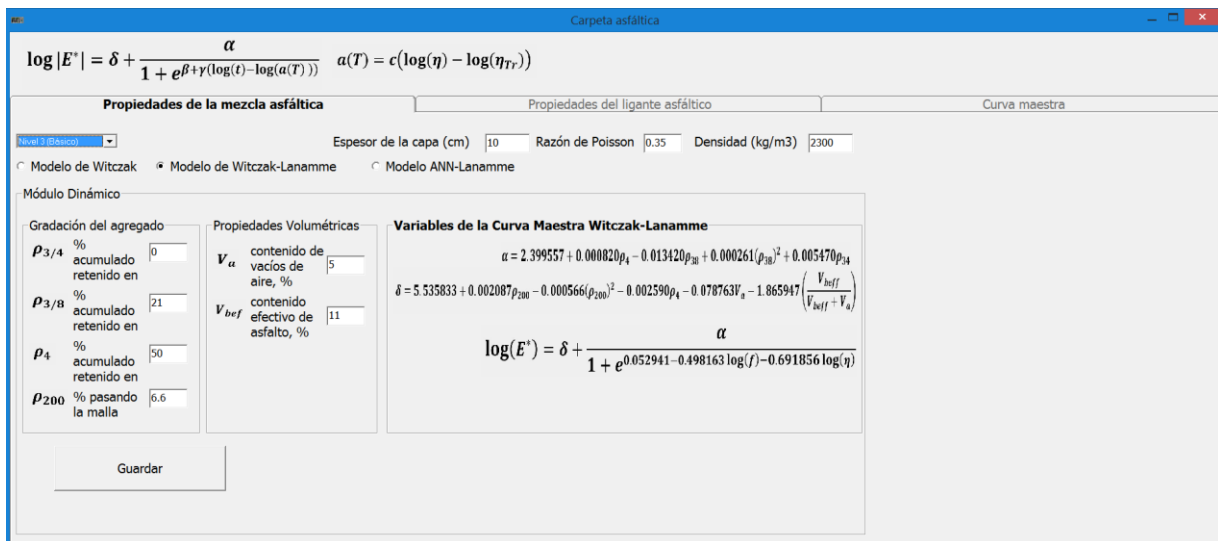


Figura 15. Ingreso de las propiedades de la mezcla asfáltica en el Nivel 3

Las propiedades de la ventana se describen a continuación:

- Se ingresa el espesor en centímetros que será evaluado en el proyecto para posteriormente verificar si cumple con las especificaciones establecidas, también se ingresa la razón de Poisson.
- Se elige cuál método se desea utilizar para la elaboración de la curva maestra y el cálculo del módulo dinámico para cada temperatura mensual. Se dispone de tres modelos, el modelo de Witzak, la calibración nacional Witzak-Lanamme, la cual considera los ligantes asfálticos presentes en el país y el modelo ANN-Lanamme, el cual utiliza una red neural con datos de ensayos realizados en el Lanamme.



- Se debe ingresar la gradación del agregado de la mezcla, escribiendo los porcentajes acumulados retenidos en la malla 3/4, 3/8 y #4, además del porcentaje pasando la malla #200.
- Se ingresa el porcentaje de vacíos de aire y de contenido efectivo de asfalto, los cuales son utilizados en los modelos de predicción del módulo dinámico.

5.1.2 Nivel 2 de ingreso de datos

Si el usuario elige el Nivel 2, se visualizará una ventana como la mostrada en la Figura 16.

Figura 16. Nivel 2 de ingreso de datos de la mezcla asfáltica

En este nivel se utilizará el modelo de Arrhenius, en este modelo no se toma en cuenta las propiedades específicas del ligante asfáltico utilizado. Para calcular los valores de las constantes Max , β , γ , δ y ΔE_a , puede utilizarse el software desarrollado en el LanammeUCR llamado IMODin.

A continuación, se describen las características de esta ventana:

- Las constantes Max , β , γ , δ y ΔE_a , se deben ingresar como producto de una optimización no lineal de los datos del ensayo AASHTO T307, en el cual se calcula el módulo dinámico a diferentes frecuencias y temperaturas.



- Se tiene una casilla de ingreso del espesor y la razón de Poisson, tal como se describió previamente.
- Se debe ingresar la temperatura de referencia en grados Fahrenheit, además del porcentaje de contenido de vacíos de aire y de asfalto efectivo.

5.1.3 Nivel 1 de ingreso de datos de la mezcla asfáltica

Si el usuario elige el Nivel 1, se le desplegará una ventana como la que se muestra en la Figura 17.

Las indicaciones a ingresar se explican a continuación:

Figura 17. Nivel 1 de conocimiento de los datos de la mezcla asfáltica

- Las constantes, α , β , γ , δ y c son obtenidas de una optimización no lineal con los datos del ensayo AASHTO T307 y los datos del ligante asfáltico, los cuales pueden ser interpretados como se verá en las ventanas siguientes.
- Los demás datos son similares al Nivel 2 descrito anteriormente.

El botón Guardar permitirá al usuario pasar a la tab de Propiedades del ligante asfáltico, la cual está bloqueada hasta que no se haya incorporado todos los datos solicitados para la mezcla asfáltica. En caso de que se haya seleccionado el Nivel 2, se enviará al usuario



directamente al Tab de la Curva Maestra y no se tendrá acceso a las propiedades del ligante asfáltico.

5.2 Ingreso de datos del ligante asfáltico

Para definir las propiedades del ligante asfáltico, existen tres niveles de conocimiento de los datos, los cuales serán descritos a continuación:

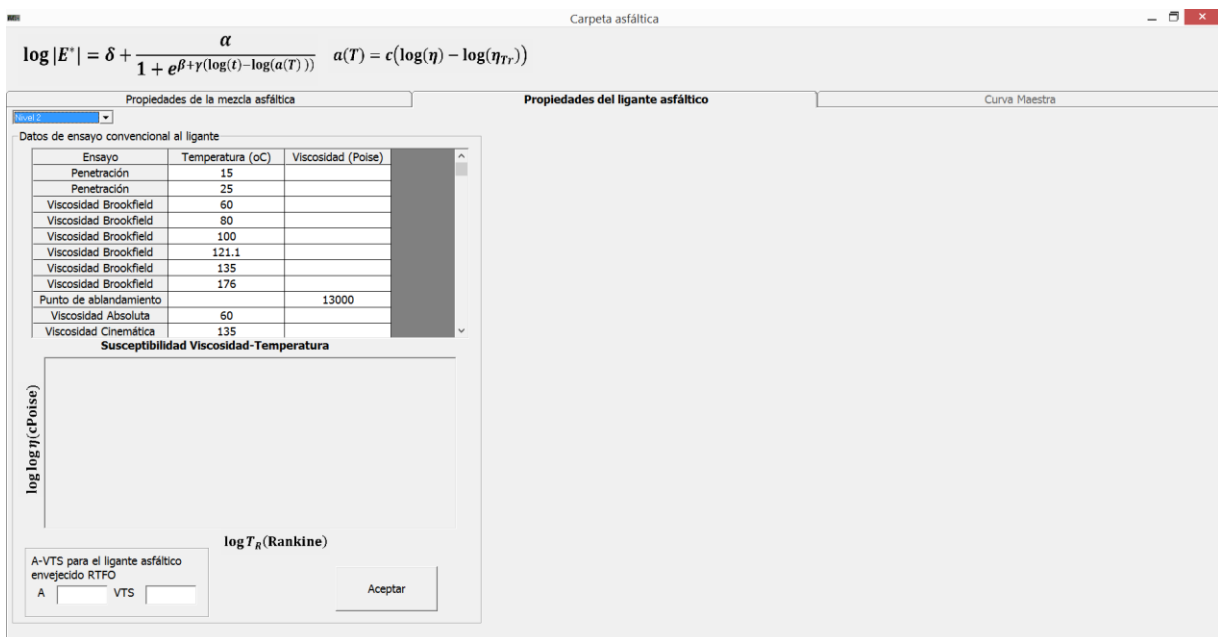
5.2.1 Nivel 3 de datos del ligante asfáltico

En la Figura 18 se muestra la ventana del nivel 3 de ingreso de datos del ligante asfáltico. El usuario elegirá una manera de establecer el valor de A y VTS ya sea con el grado Superpave del ligante, el grado convencional AC o el grado de penetración convencional. En cada uno de los casos se le desplegará una lista de selección con la cual se accede a los valores especificados para cada tipo de ligante. El usuario deberá conocer la propiedad de su ligante para poder seleccionar el valor más adecuado. En Costa Rica, el ligante refinado por RECOPE es AC-30.

Figura 18. Nivel 3 de ingreso de datos del ligante asfáltico

5.2.2 Nivel 2 de datos del ligante asfáltico

En este nivel el usuario deberá anotar los valores de resultados de ensayos tradicionales a ligantes asfálticos, tales como el ensayo de penetración, viscosidad Brookfield, el punto de ablandamiento. El software solicita al usuario que ingrese los datos de al menos 4 ensayos con temperaturas diferentes. Automáticamente el programa realizará la regresión lineal múltiple con los datos ingresados por el usuario y calcula el valor de A y VTS, además de graficar los datos del ensayo de susceptibilidad Viscosidad- Temperatura.



Carpetas asfáltica

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(t) - \log(a(T)))}} \quad a(T) = c(\log(\eta) - \log(\eta_{Tr}))$$

Propiedades de la mezcla asfáltica Propiedades del ligante asfáltico Curva Maestra

Nivel 2

Datos de ensayo convencional al ligante

| Ensayo | Temperatura (oC) | Viscosidad (Poise) |
|------------------------|------------------|--------------------|
| Penetración | 15 | |
| Penetración | 25 | |
| Viscosidad Brookfield | 60 | |
| Viscosidad Brookfield | 80 | |
| Viscosidad Brookfield | 100 | |
| Viscosidad Brookfield | 121.1 | |
| Viscosidad Brookfield | 135 | |
| Viscosidad Brookfield | 176 | |
| Punto de ablandamiento | | 13000 |
| Viscosidad Absoluta | 60 | |
| Viscosidad Cinemática | 135 | |

Susceptibilidad Viscosidad-Temperatura

log log η (cPoise)

log T_R (Rankine)

A-VTS para el ligante asfáltico envejecido RTFO

A: VTS: Aceptar

Figura 19. Nivel 2 de ingreso de datos del ligante asfáltico

5.2.3 Nivel 1 de datos del ligante asfáltico

En este nivel, el usuario debe haber realizado el ensayo AASHTO T315, en el cual se obtiene el ángulo de fase y el módulo en cortante a al menos tres temperaturas. El software automáticamente realizará el gráfico de Susceptibilidad Viscosidad Temperatura con los datos ingresados y calculará los valores de A y VTS necesarios para el diseño del pavimento. Esta es la manera más precisa de caracterizar el ligante asfáltico a utilizar en el proyecto.

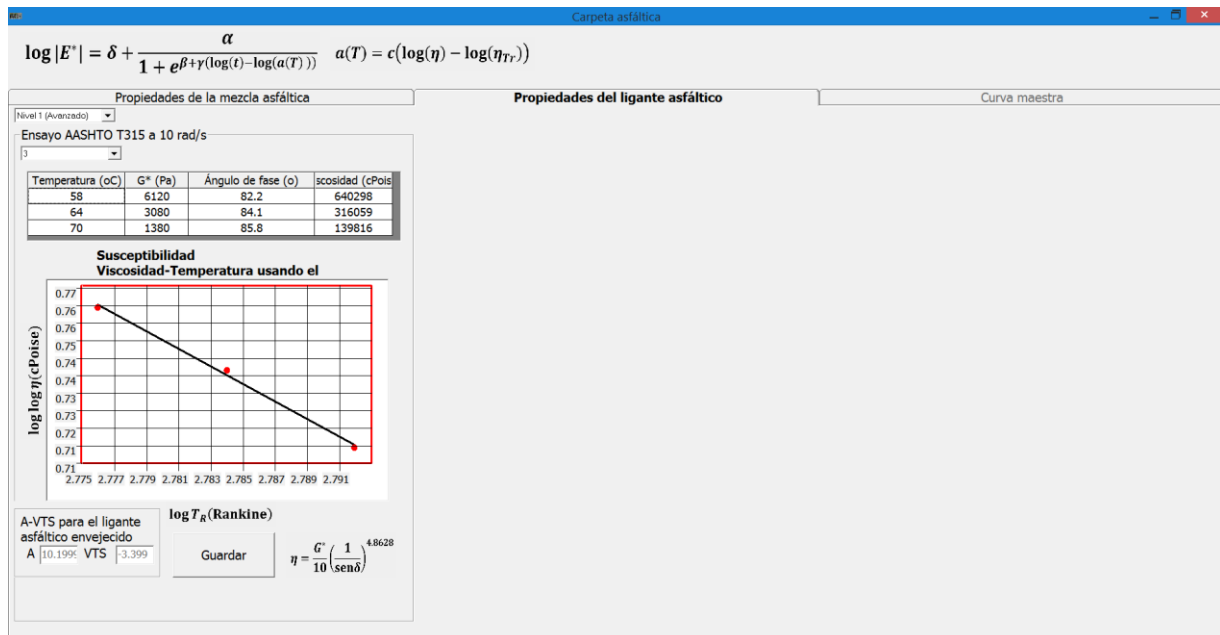


Figura 20. Nivel 1 de ingreso de datos del ligante asfáltico

5.2.4 Curva Maestra

La curva maestra representa los módulos dinámicos en un rango de frecuencias reducidas. La frecuencia reducida toma en cuenta la frecuencia y la temperatura. Los valores más bajos de la curva maestra representan las temperaturas mayores y las frecuencias menores, es decir las peores condiciones para el pavimento; mientras que los valores mayores representan las temperaturas menores y las frecuencias mayores. Es importante considerar que los valores altos de módulo dinámico pueden producir fatiga, esto se ve reflejado en el diseño final, por lo tanto, el diseñador debe saber que no siempre un módulo alto representa una mejor condición.

La ventana que se muestra en la Figura 21, se muestra una curva maestra a la temperatura de referencia. La ventana permite guardar, dando clic al botón Guardar, para continuar caracterizando las demás capas; también permite al usuario guardar la imagen de la curva maestra en formato *.jpg dando clic al botón Guardar imagen. También la aplicación permite que el usuario sepa el valor del módulo dinámico en psi y de la frecuencia reducida en Hz, pasando el puntero por el gráfico.

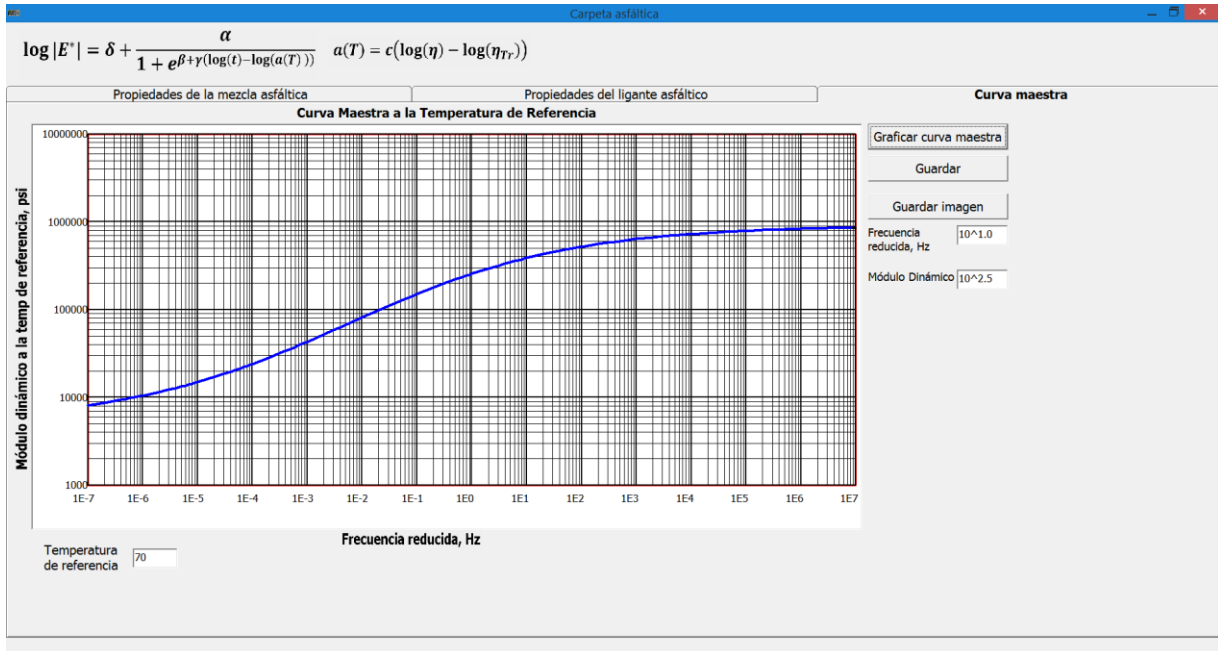


Figura 21. Curva Maestra

6. BASE Y SUBBASE

Para la caracterización de la base, el usuario contará con varias opciones, puede colocar el caso en que se utiliza la base estabilizada con cemento o ligante o puede caracterizar su capa como una base granular. En el caso de la subbase el usuario podrá diseñarla como una granular con tres niveles distintos de conocimiento.

En las bases granulares, subbases y subrasantes, hay ciertos datos que deberán ser ingresados en todos los casos, los cuales describimos a continuación.

- **Espesor:** El usuario debe colocar un valor de espesor en centímetros. Este dato debe ser incluido en todas las opciones, incluyendo si se selecciona una base estabilizada con cemento o con ligante.
- **Razón de Poisson:** La razón de Poisson es un valor entre 0 y 0.5 el cual representa la relación entre la deformación unitaria horizontal y vertical. Este valor debe ser incluido en todas las opciones al igual que el espesor.
- **P200:** Representa el porcentaje pasando la malla #200.



- Índice de plasticidad: Representa la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.
- Gravedad específica: representa la razón entre la densidad del material y la del agua.
- Densidad seca máxima: al realizar el ensayo Proctor es la densidad máxima obtenida a la humedad óptima. El valor deberá ser ingresado en kg/m^3 .
- Humedad óptima: es la humedad obtenida con la densidad máxima en el ensayo Proctor. El valor debe ser ingresado como porcentaje.

En todos los casos, el botón Guardar permite al usuario salir de la ventana guardando los datos.

6.1.1 Base estabilizada con cemento

Para el diseño utilizando una base estabilizada con cemento, el usuario deberá ingresar un valor del módulo resiliente inicial y final, ya que esta capa perderá resistencia con el paso del tiempo por su agrietamiento. Además, deberá ingresar el valor del módulo de ruptura, el cual será utilizado para predecir la fatiga en esta capa.

The screenshot shows a software window titled 'Base'. At the top, there is a dropdown menu with 'Base Estabilizada con Cemento' selected. Below this, there are two input fields: 'Espesor (cm)' and 'Razón de Poisson', both containing the value '0'. A section titled 'Bases Estabilizadas con Cemento' contains three more input fields: 'Módulo Resiliente inicial (MPa)', 'Módulo Resiliente final (MPa)', and 'Módulo de ruptura (MPa)', all containing the value '0'. At the bottom of the window is a 'Guardar' button.

Figura 22. Base estabilizada con cemento



6.1.2 Base estabilizada con ligante

En esta opción el usuario deberá colocar el módulo resiliente en Mega Pascales.

Figura 23. Base estabilizada con ligante

6.1.3 Base y subbase granular nivel 3

En la ventana de ingreso de datos del nivel 3 para bases, subbases y subrasante, aparte de los datos que se describieron en la sección 5.3, el usuario deberá digitar ya sea el valor de CBR óptimo o el módulo resiliente en condiciones óptimas de la capa.

- CBR óptimo: Si se selecciona ingresar este dato. El software automáticamente estimará el valor del módulo resiliente con la fórmula $M_r = 2555 \cdot CBR^{0.64}$. El valor debe ser ingresado como un porcentaje. El ensayo de CBR (California Bearing Ratio), constituye la resistencia del material con respecto a una muestra patrón.
- Módulo resiliente: El usuario deberá ingresar el valor del módulo resiliente óptimo estimado. Al ser los materiales granulares esfuerzo-dependiente, este valor debe ser calculado para la presión producida por una carga de 20 KN, tal como la carga de un eje equivalente de carga.



The screenshot shows a software window titled "Base". At the top, there are two dropdown menus: "Base Granular" and "Nivel 3". Below these, there are input fields for "Espesor (cm)" and "Razón de Poisson", both containing the value "0". A section titled "Nivel 3" contains input fields for "P200 (%)" and "Índice de plasticidad", both containing "0". Below this is a section titled "Gravedad Específica y Proctor Modificado" containing input fields for "Gravedad específica (Gs)", "Densidad seca máxima (kg/m3)", and "Humedad óptima (%)", all containing "0". At the bottom is a section titled "Módulo Resiliente" containing input fields for "CBR óptimo (%)" and "Módulo resiliente (MPa)", both containing "0". A "Guardar" button is located at the bottom center of the window.

Figura 24. Ventana de ingreso nivel 3 base granular

6.1.4 Base y subbase granular nivel 2

Las diferencias en este nivel están en que se solicita la granulometría del material, por lo cual el usuario deberá introducir los parámetros de diámetro efectivo D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60} y D_{90} , donde D_x representa el diámetro para el cual un x por ciento de la muestra tiene un peso menor o igual.

También en este nivel el usuario podrá elegir entre ingresar directamente el módulo resiliente o el CBR o si introducir los valores k_1 , k_2 y k_3 del modelo universal del suelo. Este ensayo y método de ensayo serán explicados en Base y subbase nivel 3.



Base

Base Granular Nivel 2

Espesor (cm) 0 Razón de Poisson 0

Nivel 2

P200 (%) 0 Índice de plasticidad 0

Granulometría (mm)

D10 0 D20 0 D30 0

D60 0 D90 0

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs) 0

Densidad seca máxima (kg/m3) 0

Humedad óptima (%) 0

☐ Módulo Resiliente ☐ Modelo Universal

Guardar

Figura 25. Nivel 2 de ingreso de datos para bases y subbases

6.1.5 Base y subbase nivel 1

Este nivel representa el mayor conocimiento de los materiales. En este nivel el usuario deberá realizar algún ensayo como el de papel filtro, para obtener el valor de a_f , b_f , c_f y h_r para obtener la Curva Característica Suelo-Agua (SWCC por sus siglas en inglés).

Además, el usuario deberá incluir los valores de k_1 , k_2 y k_3 del modelo universal, los cuales consideran el efecto del esfuerzo en los materiales. La ecuación que modela el módulo resiliente de los materiales no ligados en función de su esfuerzo principal y el esfuerzo octaédrico es la siguiente:

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Reporte LM-PI-UMP-057-R1 | Fecha de emisión: 28 de marzo de 2017 | Página 38 de 61 |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|



$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

El factor θ/p_a debe ser positivo y afecta principalmente a los materiales granulares, mientras que el factor $\left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)$ debe ser negativo y afecta principalmente a los materiales cohesivos.

Base

Base Granular

Nivel 1

Espesor (cm)

0

Razón de Poisson

0

Nivel 1

P200 (%)

0

Índice de plasticidad

0

Parámetros Curva SWCC

Ensayo de determinación de la succión del suelo con el método de papel filtro

af

0

cf

0

bf

0

hr

0

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs)

0

Densidad seca máxima (kg/m3)

0

Humedad óptima (%)

0

Modelo Universal:

k1

0

k2

0

k3

0

Introducir los valores del ensayo para obtener los valores k1, k2 y k3

$$M_r = k_1 \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Mr en MPa, esfuerzos en KPa

Guardar

Figura 26. Nivel 1 de ingreso de datos para base y subbase granular



En caso de que el usuario tenga los datos del ensayo triaxial con los 16 ciclos, el usuario puede dar click al botón Introducir los valores del ensayo para obtener los valores k_1 , k_2 y k_3 y le aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 27.

| Esfuerzo de confinamiento (KPa) | Esfuerzo desviador (KPa) | Módulo Resiliente (MPa) |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Guardar

Figura 27. Datos de entrada Modelo Universal

7. SUBRASANTE

Para la subrasante, los datos de entrada son los mismos descritos en toda la sección 5.3 para bases y subbases granulares. La única diferencia está en que el usuario deberá ingresar el valor de la profundidad hasta la roca, en lugar del valor del espesor de la capa.

En la Figura 28, se logra apreciar las tres ventanas que obtendrá el usuario al caracterizar la subrasante, con los mismos datos de entrada descritos anteriormente en cada uno de los niveles de conocimiento de la variable.



Subrasante

Nivel 3

Profundidad a la roca firme (m) Razón de Poisson

Nivel 3

P200 Índice de plasticidad

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs)

Densidad seca máxima (kg/m3)

Humedad óptima (%)

Módulo Resiliente

CBR diseño (%) Módulo calculado (MPa)

Guardar

Subrasante

Nivel 2

Profundidad a la roca firme (m) Razón de Poisson

Nivel 2

P200 Índice de plasticidad

Granulometría (mm)

D10 D20 D30

D60 D90

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs)

Densidad seca máxima (kg/m3)

Humedad óptima (%)

☐ Módulo Resiliente ☐ Modelo Universal

Guardar

Subrasante

Nivel 1

Profundidad a la roca firme (m) Razón de Poisson

Nivel 1

P200 Índice de plasticidad

Parámetros Curva SWCC

Ensayo de determinación de la succión del suelo con el método de papel filtro

af cf

bf hr

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs)

Densidad seca máxima (kg/m3)

Humedad óptima (%)

Modelo Universal

k1 k2 k3

Introducir los valores del ensayo para obtener los valores k1, k2 y k3

$$M_r = k_1 \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Guardar

Figura 28. Datos de ingreso subrasante para niveles 1, 2 y 3

8. MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DAÑO Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Los modelos incorporados automáticamente son los incorporados en la MEPDG. Sin embargo, el software permite al usuario que introduzca modelos calibrados propios de los materiales de cada país.

El LanammeUCR, gracias a la investigación realizada con el Heavy Vehicle Simulator (HVS), el cual es un programa de ensayo acelerado de pavimentos, ha logrado obtener ecuaciones



de predicción del daño por fatiga considerando la disminución del módulo resiliente en las capas no ligadas y el módulo dinámico de la carpeta asfáltica.

Para este propósito, el ensayo con el HVS consiste en ejercer una gran cantidad de pasadas de una carga sobre un pavimento para estimar el efecto a corto plazo de las cargas sobre una estructura determinada de pavimento y así simular el efecto de las cargas en la carretera. Para esto el LanammeUCR utiliza equipo de alta tecnología como el Falling Weight Deflectometer (FWD) el cual es un aparato de determinación del módulo resiliente de manera no destructiva, aplicando una carga al pavimento y midiendo las deflexiones para así estimar mediante una metodología llamada retrocálculo de módulos. La deformación permanente es medida por medio de sensores para cada una de las capas de la estructura del pavimento a lo largo del experimento acelerado.

Estos modelos permiten predecir el daño por fatiga tanto de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba producido en la carpeta asfáltica y el ahuellamiento producido en cada capa. En todos los modelos que se verán a continuación, si el usuario elige la opción de utilizar los modelos de MEPDG, el sistema automáticamente colocará los valores predeterminados por los modelos de esta guía y si escoge la opción Modelos definidos por el usuario, el sistema le permitirá colocar los factores calibrados.

Al dar click al botón de Modelos, se desplegará una ventana como la mostrada en la Figura 29, en la cual el diseñador deberá ingresar los valores límite para cada uno de los deterioros que predice el software. Estos datos servirán al usuario para tomar una decisión respecto de si el diseño es adecuado o no.



| | Valor límite | Confiabilidad (%) |
|---|--------------|-------------------|
| Agrietamiento longitudinal (pies/milla) | 2000 | 90 |
| Área agrietada piel de cocodrilo (%) | 25 | 90 |
| Ahuellamiento Carpeta asfáltica (mm) | 17 | 90 |
| Ahuellamiento total (mm) | 12.5 | 90 |

Aceptar

Figura 29. Criterios de aceptación

En la Figura 30, se muestra el modelo utilizado para predecir la cantidad de repeticiones de carga permitidas por fatiga de abajo hacia arriba. En este caso, se seleccionó la opción en que el usuario coloca los factores propios.

Modelos de desempeño

Agrietamiento de abajo hacia arriba

Nf: repeticiones al agrietamiento por fatiga
et: Deformación unitaria tangencial en la posición crítica (in/in)
E: Módulo dinámico (psi)
hac: espesor de la carpeta (in)
Va: contenido de vacíos de aire (%)
Vb: contenido de asfalto (% por volumen)

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

Modelo MEPDG
Modelo definidos por el usuario

Guardar

Figura 30. Modelo de estimación de las repeticiones permitidas por fatiga de abajo hacia arriba

Para el modelo de arriba hacia abajo, la guía MEPDG recomienda utilizar un modelo similar al de la fatiga de abajo hacia arriba, por falta de estudios relacionados con este tipo de deterioro.



En la Figura 31, se muestra el caso en que el usuario seleccionó los modelos predeterminados por la guía MEPDG.

Figura 31. Modelo de estimación de las repeticiones permitidas por fatiga de abajo hacia arriba

Para el ahuellamiento en la carpeta asfáltica, se propone un modelo en función de la temperatura de la carpeta asfáltica, la cantidad de repeticiones de carga, la deformación unitaria vertical en la mitad de la capa y el espesor de la capa. La guía MEPDG propone los modelos que se aprecian en la Figura 32.

Figura 32. Modelo de ahuellamiento

Las funciones de transferencia, son modelos de tipo sigmoideal que permiten predecir un deterioro específico a partir del daño, calculado con la ley de Miner. Se utiliza una función sigmoideal debido a que permite colocar dos asíntotas.



Los deterioros predichos son el área agrietada, la cual se muestra en el pavimento como agrietamiento piel de lagarto y el agrietamiento longitudinal. El área agrietada se relaciona con el daño por fatiga de abajo hacia arriba y el agrietamiento longitudinal se relaciona con el daño por fatiga de arriba hacia abajo.

Los factores recomendados por la guía MEPDG son los mostrados en la Figura 33, $C_1 = 1$, $C_2 = 1$ y $C_3 = 6000$ para el área agrietada, mientras que para el agrietamiento longitudinal los factores son: $C_1 = 7$, $C_2 = 3.5$ y $C_3 = 1000$.

Modelos de desempeño

Carpeta asfáltica
Base
Base Estabilizada con Cemento
Subbase
Subrasante

Agrietamiento de abajo hacia arriba Agrietamiento de arriba hacia abajo Ahuellamiento **Funciones de transferencia**

Agrietamiento de abajo hacia arriba:

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

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

C1:
C2:
C3:

Agrietamiento de arriba hacia abajo:

$$FC_{arriba-abajo} = \left(\frac{C_3}{1 + e^{C_1 - C_2 \cdot \log(D)}} \right) \cdot 10.56$$

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

C1:
C2:
C3:

Guardar

Figura 33. Funciones de transferencia

Para tomar en cuenta el ahuellamiento en la base y en la subbase, la guía MEPDG recomienda factores de calibración. Estos factores pueden ser modificados por el usuario seleccionando la opción de Modelos definidos por el usuario. El usuario tendrá la posibilidad de seleccionar factores calibrados para materiales granulares o para granulares finos.



The screenshot shows the 'Modelos de desempeño' window with the 'Ahuellamiento Base' tab selected. On the left, a sidebar contains buttons for 'Carpeta asfáltica', 'Base', 'Base Estabilizada con Cemento', 'Subbase', and 'Subrasante', with a 'Guardar' button at the bottom. The main area is divided into input fields, a formula, and material selection options.

Ahuellamiento Base

delta p: ahuellamiento de la subcapa (in)

ev: Deformación unitaria vertical promedio (in/in)

n: número de repeticiones de carga

hsuelo: espesor subcapa (in)

$$\Delta p_{(suelo)} = \frac{\beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{suelo} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right)}{e^{\left(\frac{p}{n} \right)^B}}$$

☒ Modelo MEPDG ☐ Modelo definidos por el usuario

☒ Granular ☐ Granular Fino

ks1 ks1

Bs1 Bs1

Figura 34. Ahuellamiento en la base

Los modelos de deformación permanente de la subrasante, son similares a los modelos definidos para la base y la subbase, la única diferencia es que estos deben considerar que la subrasante es una capa infinita. Nuevamente, el usuario puede ingresar sus propios valores.

The screenshot shows the 'Modelos de desempeño' window with the 'Ahuellamiento Subrasante' tab selected. The layout is similar to Figure 34, but with different input fields and formulas.

Ahuellamiento Subrasante

delta: ahuellamiento en la subrasante (in)

ep,z: Deformación unitaria permanente a la profundidad z (in/in)

h roca: profundidad hasta la roca firme (in)

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

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

☒ Modelo MEPDG ☐ Modelo definidos por el usuario

☐ Granular ☒ Granular Fino

ks1 ks1

Bs1 Bs1

Figura 35. Ahuellamiento en la subrasante.

Si el usuario seleccionó una base estabilizada con cemento, el software le colocará una nueva ventana de ingreso de datos como la mostrada en la Figura 36. Estos modelos son los indicados por la PCA y que la guía MEPDG especifica que no hay ningún proyecto NCHRP para calibrar los modelos propuestos para bases estabilizadas con cemento.



Figura 36. Fatiga en base estabilizada con cemento

El usuario deberá seleccionar o escribir los valores de cada uno de los tabs de los modelos de la carpeta asfáltica y los módulos de ingreso de las otras capas para poder luego acceder al botón de Diseño, el cual realiza todos los cálculos para el análisis de la estructura de pavimento con todos los datos incorporados por el usuario y verificar la aprobación de la estructura, tal como se verá en la siguiente sección.

9. SALIDA DEL SOFTWARE

9.1 Módulos

El software envía los módulos resilientes mensuales promedio para todo el período de diseño, para cada una de las capas que componen la estructura de pavimento, en el caso de que el usuario haya elegido utilizar ejes equivalentes para caracterizar el tráfico, tal como se muestra en la Figura 37.

Los módulos resilientes de las capas no ligadas son afectados por las condiciones climáticas presentes en cada mes, las cuales dependen de la temperatura promedio de cada mes y el índice de humedad de Thornwaite. Algunas capas, debido a sus propiedades físicas, se verán más o menos afectadas por los cambios climáticos. Por ejemplo, una base estabilizada con cemento no presentará modificación por las condiciones climáticas.



Por otra parte, los módulos dinámicos mensuales de la carpeta asfáltica, son afectados por la temperatura promedio mensual de la carpeta asfáltica. Estos módulos dinámicos son obtenidos por el programa utilizando la curva maestra del material.

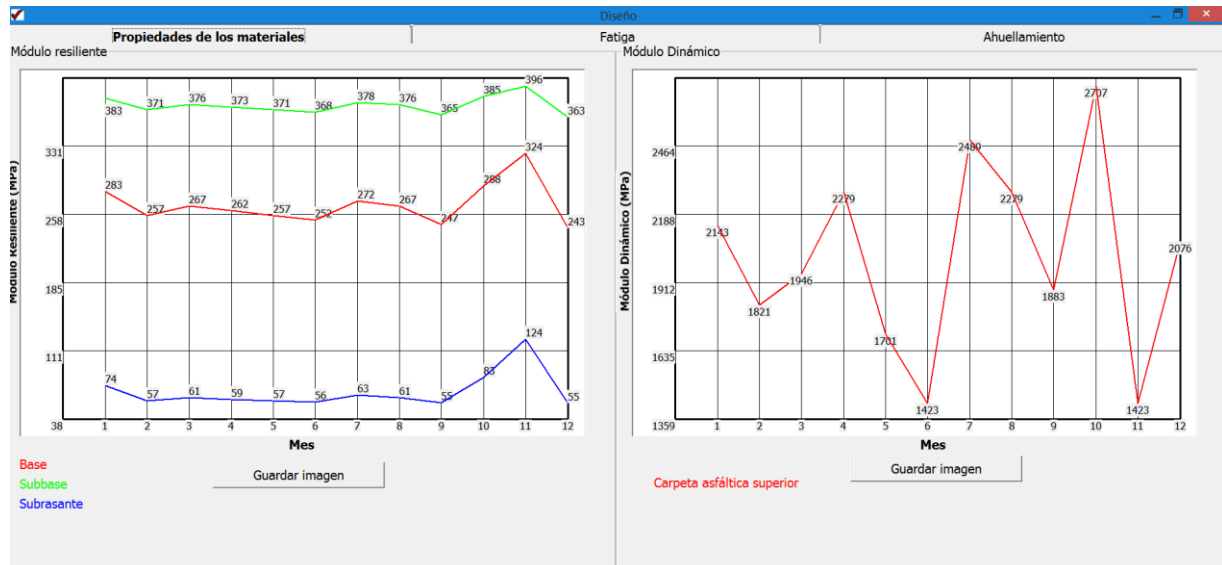


Figura 37. Módulos resilientes mensuales para las capas no ligadas y módulo dinámico mensual de la carpeta asfáltica

Si el usuario elige la opción de caracterización del tránsito con espectros de carga, el software le enviará los módulos de cada carga del espectro de carga. Si el usuario colocó un modelo que tome en cuenta la afectación del módulo por condiciones de carga, notará una curva en la cual, para una mayor carga, hay un mayor módulo resiliente; tomando en consideración la propiedad esfuerzo-dependiente de los materiales granulares de las capas no ligadas. Este efecto se muestra en la Figura 38.

En ambos casos, el usuario podrá guardar la imagen del gráfico en formato *.jpg, dando clic al botón Guardar Imagen.

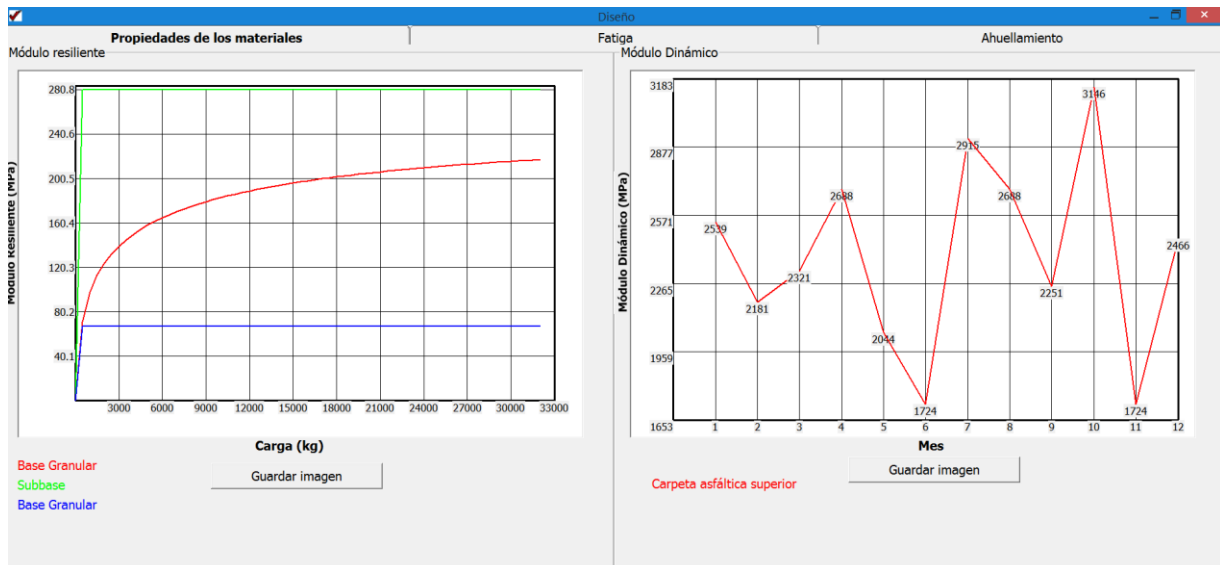


Figura 38. Módulos resilientes de las capas no ligadas en función de la carga y módulo dinámico mensual de la carpeta asfáltica

Los modelos de deterioro por fatiga, se basan en la ley de Miner para estimar el daño producido por el paso de los vehículos a la estructura. El software enviará al usuario el valor de daño por fatiga tanto de arriba hacia abajo, como de abajo hacia arriba.

Basado en los valores de daño obtenidos, se utilizan las funciones de transferencia ingresadas por el usuario para estimar el agrietamiento longitudinal medido en pies por pulgada cuadra y el porcentaje de área agrietada. El primer deterioro se relaciona con el daño por fatiga de arriba hacia abajo, mientras que el área agrietada o agrietamiento por piel de cocodrilo, se relaciona con la fatiga de abajo hacia arriba.

El software suma el daño de la carpeta asfáltica para cada mes del período de diseño para cada carga y cada tipo de eje en la opción para espectro de carga, mientras que, para ejes equivalentes de carga, el programa suma el daño para cada mes del periodo de diseño. La ventana permite al usuario guardar las imágenes con el daño, el área agrietada y el agrietamiento longitudinal en cada mes del período de diseño en formato *.jpg, además de permitir al usuario visualizar con el puntero cuál es el valor determinado para cada deterioro en cada mes de diseño.

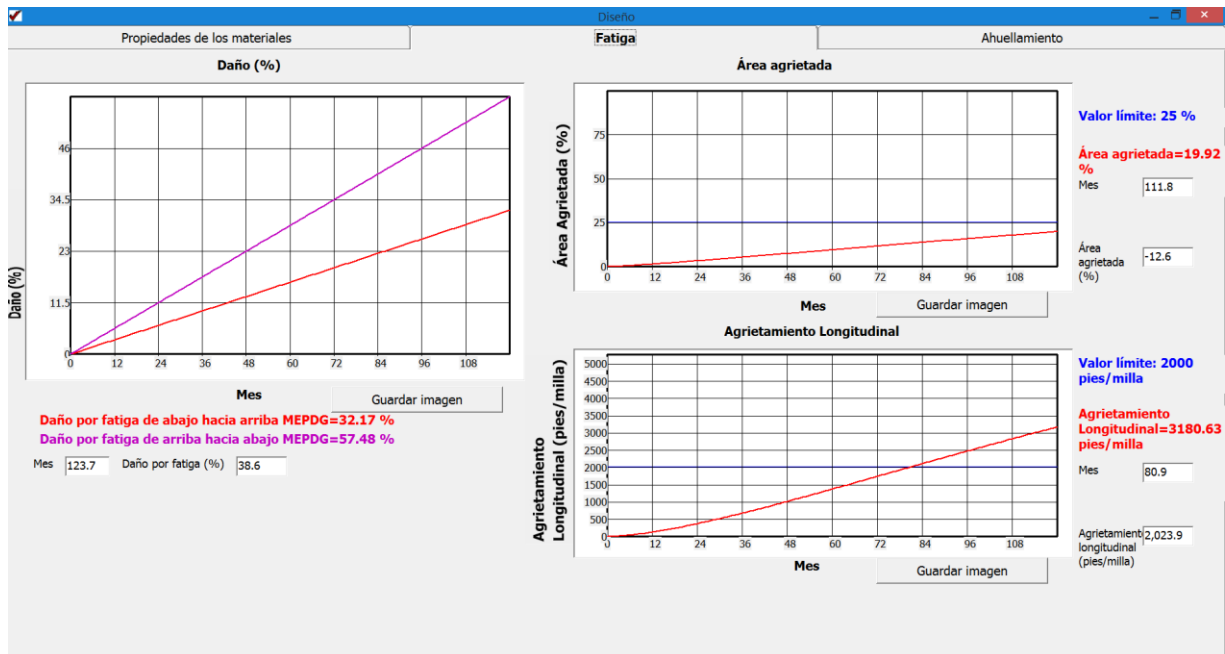


Figura 39. Daño por fatiga, área agrietada y agrietamiento longitudinal

Para el ahuellamiento, el software utiliza los modelos colocados por el usuario para la determinación de la deformación permanente en cada una de las capas. El programa utiliza el enfoque de endurecimiento por fatiga. La curva mostrada en la Figura 40, muestra el valor en cada uno de los meses del período de diseño. También se muestra el valor al final del período.

El usuario podrá guardar la imagen en extensión *.jpg al dar clic en Guardar Imagen, además podrá ver el valor de ahuellamiento en cada mes moviendo el cursor por la imagen.

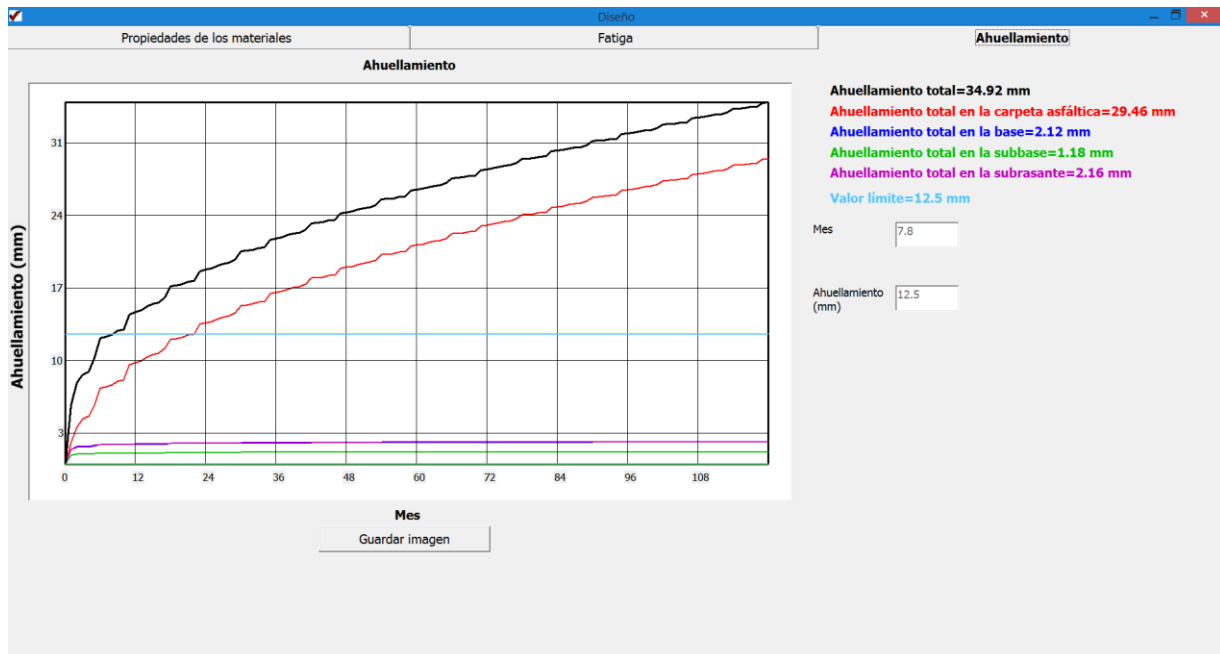


Figura 40. Ahuellamiento en cada capa



10. EJEMPLO CON CR-ME

10.1 Descripción del problema

A continuación, se describen las variables utilizadas para el diseño de un pavimento flexible, utilizando el software descrito anteriormente. Con el ejemplo se pretende mostrar que la herramienta es sencilla de utilizar. Se describirán las variables en el Nivel 3 de conocimiento y finalmente se mostrarán los resultados del análisis con los datos ingresados para verificar si el diseño es adecuado para soportar la cantidad de tránsito al que será sometido.

Los modelos utilizados para el ejemplo son los propuestos por la guía MEPDG tanto para fatiga como para deformación permanente.

Se describirán los datos de las principales variables ingresadas, las cuales son:

10.1.1 Tránsito

Se utilizó el Nivel 3 de conocimiento para la variable Tránsito con los siguientes datos:

- TPD año inicial: 1371
- Crecimiento vehicular: 3%
- Factor de distribución direccional: 50%
- Factor de distribución por carril: 100%
- ESAL durante la construcción: 71065
- Porcentaje atraído: 20%
- Porcentaje generado: 30%
- Nivel de confianza de la variable Tránsito: 90%
- Factor de amplificación del tránsito: 1

Los vehículos que se tendrán en cuenta para el análisis son los automóviles, los buses, los camiones C2 pequeños, los cuales cuentan con un eje simple delantero y un eje simple dual trasero, los vehículos C2 grandes, los cuales tienen la misma disposición de ejes que el camión anterior, el C3S2, el cual cuenta con un eje simple delantero, dos ejes tándem, uno en el

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Reporte LM-PI-UMP-057-R1 | Fecha de emisión: 28 de marzo de 2017 | Página 52 de 61 |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|



semirremolque y el C3S3, el cual tiene un eje simple, un eje tándem y un eje trídem en el semirremolque. Los porcentajes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje y factor daño de cada tipo de vehículo

| Tipo de vehículo | Porcentaje del TPD | Factor daño |
|------------------|--------------------|-------------|
| Automóvil | 55 | 0 |
| Bus | 12 | 0,42 |
| C2P | 5,5 | 0,31 |
| C2G | 8,1 | 2,3 |
| C3 | 4,2 | 3,81 |
| C2S3 | 9,9 | 5,11 |
| C3S3 | 5,3 | 4,02 |

El total de ejes equivalentes de carga con los datos ingresados, utilizando un crecimiento geométrico, es de 5,73 millones de ESAL.

10.1.2 Clima

La variable climática, se caracteriza por medio del índice de humedad de Thornwaite y la temperatura ambiente. Con estos datos se modifica el módulo resiliente de las capas no ligadas y el módulo dinámico de la carpeta asfáltica. Estos datos se muestran en la Tabla 2.

Se utilizan modelos que para calcular la succión matricial del material de la capa en función del TMI y otras variables, con el cual se estima una saturación mensual del material y con este valor se predice un factor ambiental, el cual multiplicará al módulo resiliente en condiciones óptimas.



Tabla 2. Datos climáticos

| Mes | Índice de humedad de Thornwaite | Temperatura promedio mensual (°C) |
|------------|--|--|
| Enero | -30 | 20 |
| Febrero | 20 | 25 |
| Marzo | 0 | 23 |
| Abril | 10 | 18 |
| Mayo | 20 | 27 |
| Junio | 30 | 32 |
| Julio | -10 | 15 |
| Agosto | 0 | 18 |
| Setiembre | 40 | 24 |
| Octubre | -40 | 12 |
| Noviembre | -100 | 32 |
| Diciembre | 50 | 21 |

10.1.3 Capa asfáltica

La carpeta asfáltica se caracteriza con el Nivel 3 de conocimiento, utilizando la ecuación de Witczak-Lanamme. Los datos ingresados son los siguientes:

- Porcentaje acumulado retenido en la malla 3/4: 0%
- Porcentaje acumulado retenido en la malla 3/8: 21%
- Porcentaje acumulado retenido en la malla #4: 50%
- Porcentaje pasando la malla #200: 6.6%
- Contenido de vacíos de aire: 5%
- Contenido efectivo de asfalto: 11%
- Espesor: 10 cm
- Razón de Poisson: 0.35



Las propiedades del ligante asfáltica ingresadas son las predeterminadas para un ligante con penetración 60/70. Los valores de A y VTS para este caso son los siguientes:

- A: 10,6508
- VTS: -3,5537

10.1.4 Base granular

Las propiedades ingresadas para la base granular, considerando su propiedad esfuerzo-dependiente con el Nivel 1, son los siguientes:

- Espesor: 15 cm
- Razón de poisson: 0,4
- Porcentaje pasando la malla #200: 0
- Índice de plasticidad: 0
- Constante a_f : 5
- Constante b_f : 3,69
- Constante c_f : 1,36
- Constante h_f : 500
- Gravedad específica: 2,7
- Densidad seca máxima: 1600 kg/m³
- Humedad óptima: 3%
- Constante k_1 : 1,1926
- Constante k_2 : 0,892
- Constante k_3 : -0,441

10.1.5 Subbase

Los datos ingresados para la subbase son los solicitados por el programa para el Nivel 3 de conocimiento de la variable:

- Espesor: 15 cm

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Reporte LM-PI-UMP-057-R1 | Fecha de emisión: 28 de marzo de 2017 | Página 55 de 61 |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|



- Razón de Poisson: 0,4
- Porcentaje pasando la malla #200: 2%
- Índice de plasticidad: 0
- Gravedad específica: 2,6
- Densidad seca máxima: 1600 kg/m³
- Humedad óptima: 15%
- Módulo resiliente en condiciones óptimas: 215,4 MPa

10.1.6 Subrasante

La subrasante se caracterizó con las variables del Nivel 3, así:

- Profundidad a la roca firme: 3 m
- Razón de Poisson: 0,5
- Porcentaje pasando la malla #200: 70%
- Índice de plasticidad: 10
- Gravedad específica: 2,5
- Densidad seca máxima: 1500 kg/m³
- Humedad óptima: 30%
- Módulo resiliente en condiciones óptimas: 49,35 MPa

10.2 Solución del problema

Los módulos obtenidos para cada mes del período de diseño se muestran en la Figura 41. Estos módulos son afectados por las condiciones climáticas.

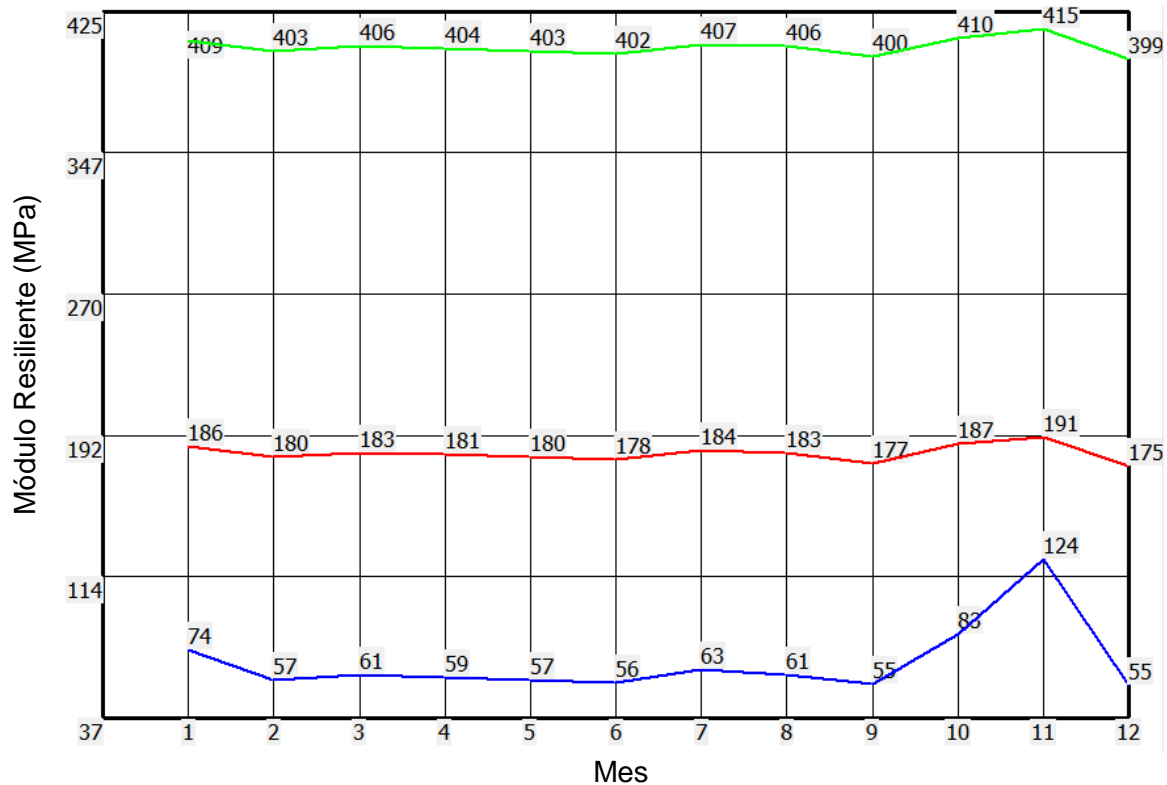


Figura 41. Módulos resilientes de las capas no ligadas

El daño por fatiga se muestra en la Figura 42. Este daño toma en cuenta el daño mensual producido en la parte baja de la carpeta asfáltica y en la superficie de la carpeta asfáltica. Se utiliza la ley de Miner, la cual es la relación entre la cantidad de repeticiones de carga a las que será sometida la carretera entre la cantidad de repeticiones de carga permitidas.

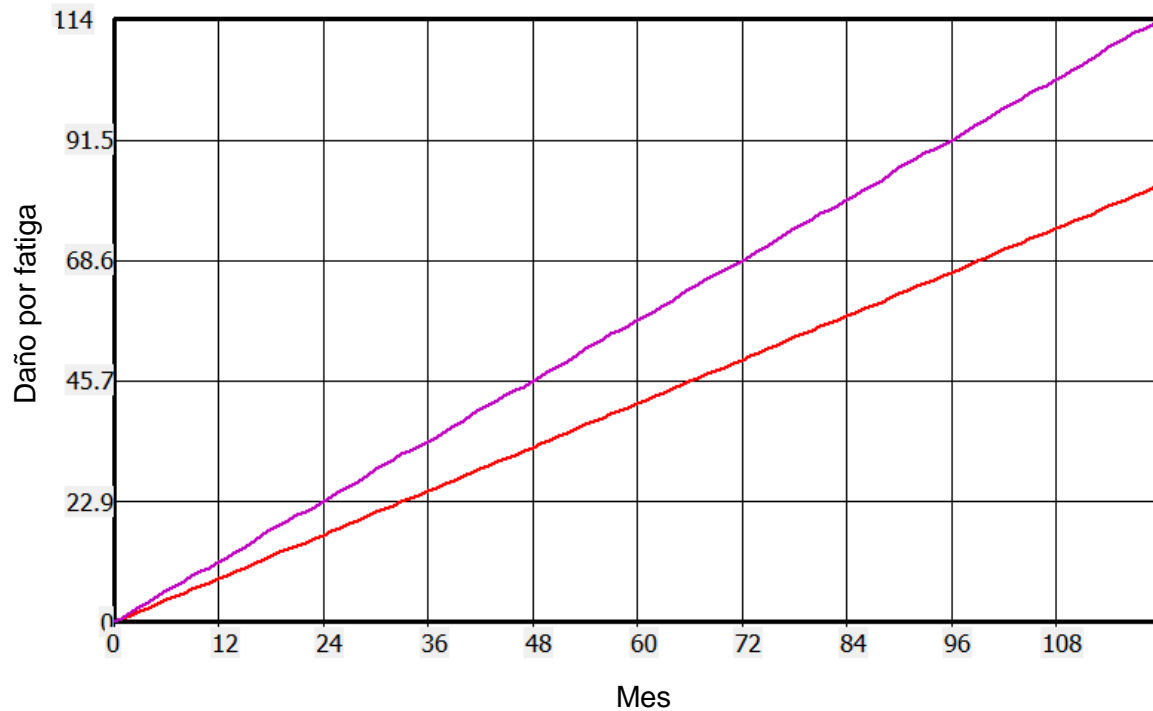


Figura 42. Daño por fatiga

Utilizando las funciones de transferencia, se puede relacionar el daño con un deterioro específico. En la Figura 43, se muestra el área agrietada o agrietamiento piel de cocodrilo, el cual se relaciona con el daño de abajo hacia arriba. En el gráfico se puede observar que en el mes 60 la estructura ya alcanzó el máximo admitido, por lo cual por daño por fatiga se deberá corregir el diseño.

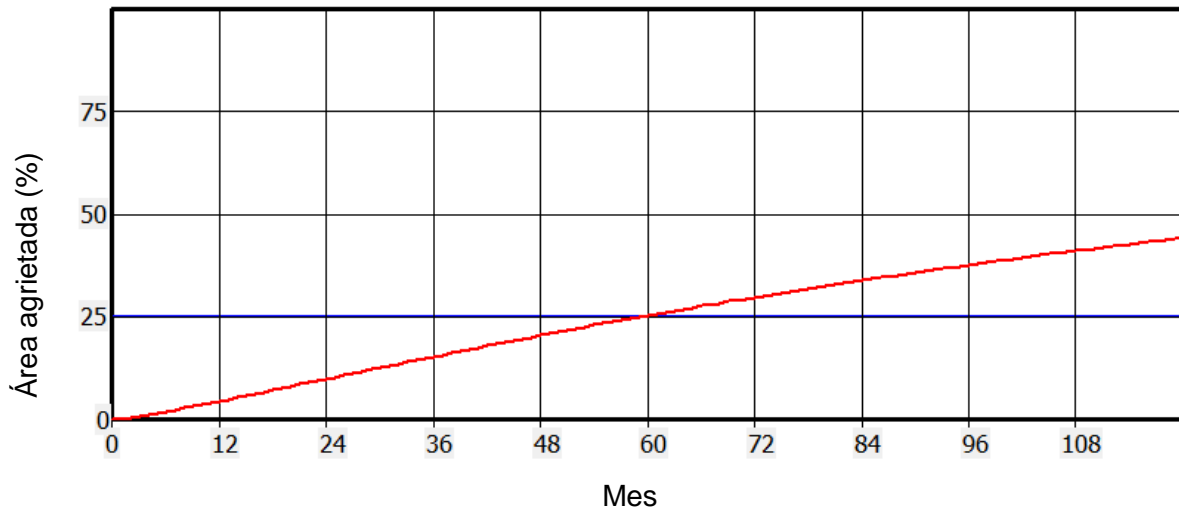


Figura 43. Área agrietada

El agrietamiento longitudinal se relaciona con la fatiga de arriba hacia abajo. Este deterioro utiliza el mismo modelo que el utilizado para el agrietamiento piel de cocodrilo variando los factores. En la Figura 44, se logra apreciar que el límite se superó al poco tiempo, lo cual supone una falla temprana por fatiga e indica que el diseño debe modificarse.

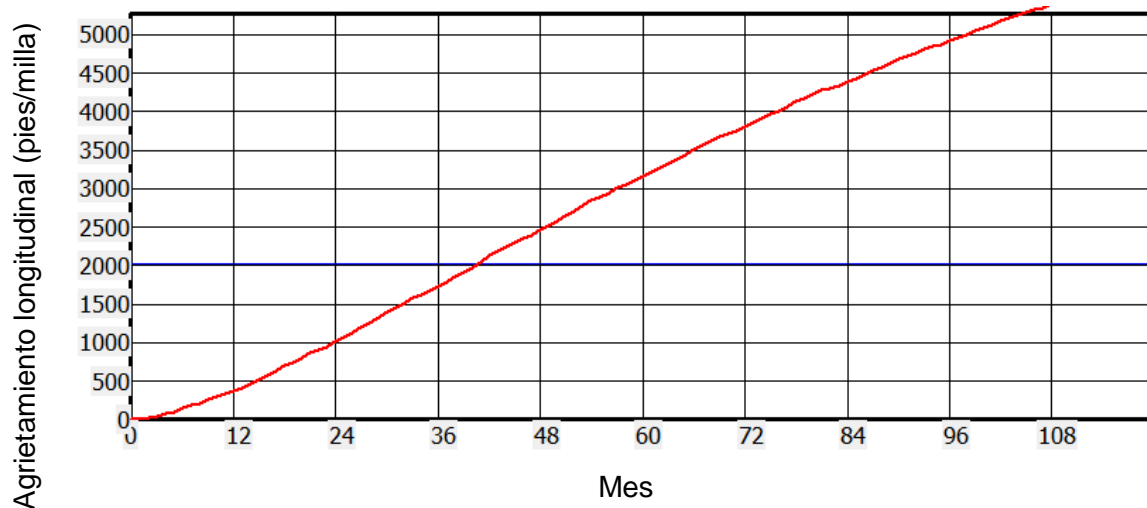


Figura 44. Agrietamiento longitudinal



El ahuellamiento en cada capa se logra apreciar en la Figura 45. Este valor es mayor al permitido por la guía MEPDG y por las especificaciones de Costa Rica, por lo cual la estructura deberá rediseñarse hasta que los espesores, produzcan deterioros que cumplan con las especificaciones dadas.

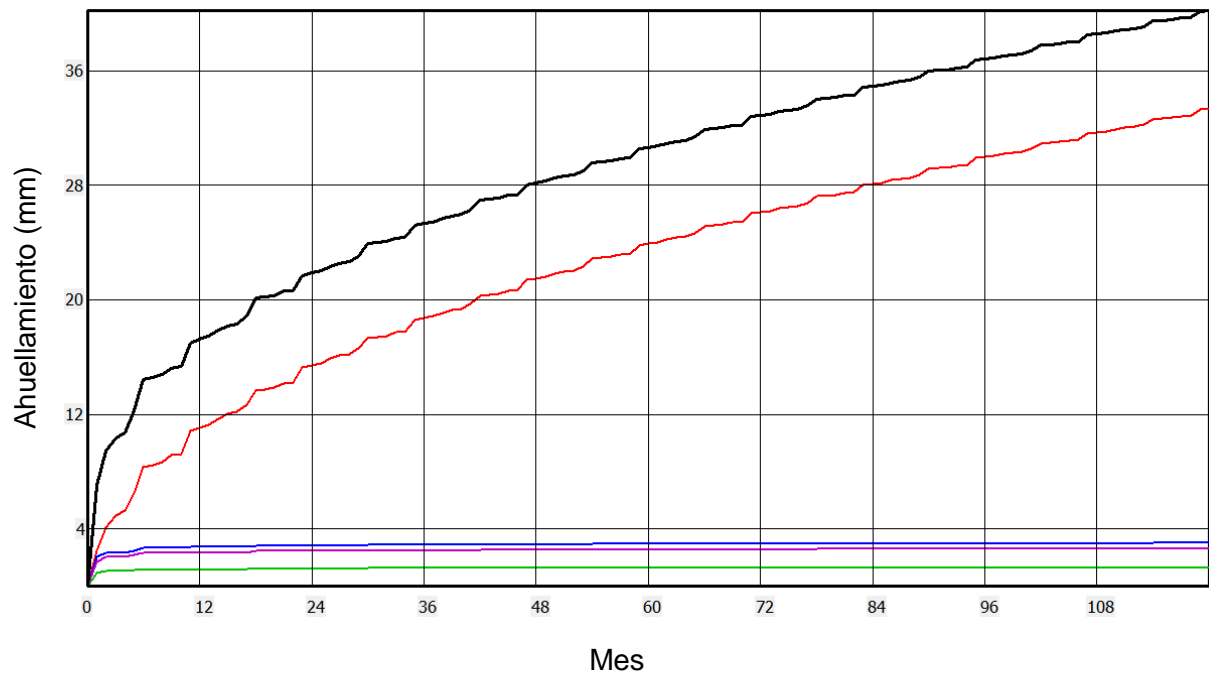


Figura 45. Ahuellamiento en cada capa

El ingeniero, al realizar este diseño, deberá observar que los valores son mayores a los límites, por lo cual deberá sustituir los espesores y realizar nuevamente el análisis hasta obtener un diseño que apruebe las especificaciones planteadas.



11. BIBLIOGRAFÍA

Burmister, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil System. *Journal of Applied Physics*, 296-302.

Burmister, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. *Journal of Applied Physics*, 89-94.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. United States of America: Pearson Prentice Hall.