



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



PITRA
programa de
Infraestructura
del transporte

2014

INTERFAZ GRÁFICA PARA DISEÑO MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA

CR-ME VERSIÓN 1

Guía del Usuario

1. Informe: LM-PI-UMP-030 R		2. Copia No.: 1
3. Título y subtítulo: INTERFAZ GRÁFICA PARA DISEÑO MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA		4. Fecha del Informe: Octubre de 2013
7. Organización y dirección: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <i>El diseño de pavimentos en Costa Rica, tradicionalmente se ha basado en las metodologías desarrolladas en los Estados Unidos, como es el caso de la AASHTO 93 y la del Instituto del Asfalto.</i> <i>Estas metodologías han sido desarrolladas para las condiciones específicas de clima, propiedades de los materiales, carga, entre otros parámetros, de ciertas regiones de los Estados Unidos; situación que las hace poco aplicables a la realidad costarricense.</i> <i>En este sentido en el LanammeUCR, se ha desarrollado toda una línea de investigaciones en la definición, de una metodología adaptada a las condiciones propias costarricenses, con capacidades extrapolables a los países de la región.</i> <i>La definición de esta guía, debe además venir acompañada de un software suficientemente amigable y accesible, que sirva como herramienta al profesional durante el proceso de diseño, es por esto que por medio del presente documento, se pone a disposición el manual de usuario de la primera versión del CR-ME, nombre con que se ha denominado a la herramienta de cálculo que servirá como complemento a la nueva guía costarricense.</i> <i>Cabe destacar que esta es la primera de las versiones, por lo que se espera que durante el proceso de mejora de la guía, este software pueda proveer mejoras que serán igualmente actualizadas en el centro de descarga de la UMP-PITRA-LanammeUCR.</i>		
10. Palabras clave CR-ME, GUÍA DE DISEÑO, MECANÍSTICO-EMPÍRICA	11. Nivel de seguridad Ninguno	12. Núm. de páginas 37
13. Preparado por Christopher Trejos Castillo, Asistente Unidad de Materiales y Pavimentos PITRA-LanammeUCR Fecha: 06/10/14	14. Revisado por Ing. Paulina Leiva Padilla, Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos PITRA-LanammeUCR Fecha: 06/10/14	15. Revisado y Aprobado por Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD. Coordinador General PITRA-LanammeUCR Fecha: 06/10/14

CONTENIDOS

GUÍA DEL USUARIO	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. INTERFAZ DE CÁLCULO	7
2.1 Módulo de Datos Generales	9
2.2 Módulo de Selección: Tipo de Análisis	9
2.3 Módulo de Estructura del Pavimento	11
2.3.1 Cálculo de Espesores Metodología AASHTO 93	13
2.4 Módulo de Clima	14
2.5 Módulo de Tráfico	16
2.6 Módulo de efectos de temperatura en la mezcla asfáltica / curva maestra	21
2.7 Módulo de efectos de la humedad en las capas granulares	24
2.8 Módulo de Respuestas del Pavimento	26
2.9 Módulo de parámetros de entrada: Desempeño a la fatiga	27
2.10 Módulo de parámetros de entrada:	28
Desempeño con respecto a la deformación permanente	08
2.11 Módulo de resultados	29
2.12 Módulo de resultados: Deformación permanente	30
2.13 Módulo de resultados: Resumen en Excel	31
2.14 Herramienta de Determinación de Saturación de Capas Granulares	32
BIBLIOGRAFÍA	37

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de funcionamiento del programa	7
Figura 2. Portada del Software	8
Figura 3. Introducción de Datos Generales	9
Figura 4. Selección del Tipo de Análisis	10
Figura 5. Características de la vía	11
Figura 6. Entrada de datos – 3 capas	12
Figura 7. Herramienta de cálculo AASHTO 93	13
Figura 8. Advertencia de módulo excluido	14
Figura 9. Introducción de datos climáticos	15
Figura 10. Selección de perfiles climáticos	16
Figura 11. Introducción de datos de tráfico	17
Figura 12. Introducción de Ejes Equivalentes de Diseño (ESAL)	18
Figura 13. Introducción de Ejes Equivalentes de Diseño (ESAL)	19
Figura 14. Cálculo de Ejes Equivalentes de Diseño (ESAL)	20
Figura 15. Advertencia de Módulo Excluido	21
Figura 16. Introducción directa de la temperatura	22
Figura 17. Introducción de datos – Ensayo de Módulo Dinámico	23
Figura 18. Resultados – Cálculo de Curva Maestra	24
Figura 19. Advertencia de módulo excluido	25
Figura 20. Introducción de Saturaciones	25
Figura 21. Introducción de Respuestas del Pavimento	26
Figura 22. Parámetros de entrada – Modelos de desempeño: Fatiga	27
Figura 23. Cálculo del factor C	28
Figura 24. Parámetros de entrada – Modelos de desempeño: Deformación permanente	29
Figura 25. Resumen de resultados – Fatiga	30
Figura 26. Resumen de resultados – Deformación permanente	31
Figura 27. Localización del archivo de Excel	32
Figura 28. Introducción de parámetros climáticos	33
Figura 29. Selección del perfil	34
Figura 30. Características granulométricas y de plasticidad	35
Figura 31. Resultados de saturación	36

GUÍA DEL USUARIO

Copyright©2013 por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

Desarrollado por

Unidad de Materiales y Pavimentos. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA).

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Universidad de Costa Rica.

Esta es la primer versión desarrollada por el estudiante José Pablo Vargas Hernández, como trabajo final de graduación para obtener el título de licenciatura en ingeniería civil, bajo la dirección del Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D, MSc y la supervisión de la Ing. Paulina Leiva Padilla. Debido a su naturaleza, esta versión será mejorada y actualizada en versiones posteriores que se pondrán a disposición en el centro de descarga de la UMP-PITRA-LanammeUCR.

Derechos de Autor

El software descrito en este documento está protegido por la ley de los derechos de autor y puede ser obtenido únicamente por medio de su descarga en la página web oficial del LanammeUCR. El propietario de los derechos no permite la transferencia comercial a terceros, tanto del software, como del presente manual, ni la fotocopia o reproducción por cualquier medio, sin la previa autorización del LanammeUCR. Deberá reconocerse el uso del presente manual, en cualquier publicación en la que se haga uso.

Descargo de responsabilidad

El presente manual está elaborado para usuarios profesionales de la ingeniería civil calificados, con juicio y experiencia en la ingeniería de pavimentos. Este documento le ayudará al usuario con la comprensión del funcionamiento del software, sin embargo, esto no exime al usuario de hacer el análisis debido de los datos introducidos y obtenidos. Los desarrolladores no se hacen responsables de daños directos o indirectos, causados o incidentales, que surjan de la posibilidad o no del uso de la interfaz.

Para contactos:

Página web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr> / Correo electrónico: dirección.lanamme@ucr.ac.cr

Soporte técnico e información general: paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr

Teléfono: 506-2511-2500 / Fax: 506-2511-4440

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

400 metros norte de Muñoz y Nanne, San Pedro.

CP-11501-2060, San José, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de pavimentos costarricenses hasta la actualidad se basó principalmente en las metodologías empíricas desarrolladas por la Sociedad Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte en el año 1993..

Dicha metodología se basa en correlaciones que además de ser empíricas, han sido desarrolladas para pavimentos típicos de una región específica de los Estados Unidos, que no reflejan la realidad costarricense.

Es por esta razón, que el LanammeUCR pretende tomar la batuta para generar una metodología renovada, introduciendo complementariamente a las metodologías antes mencionadas, los conceptos mecánicos que caracterizan a las estructuras de pavimentos, bajo características similares a las contempladas en la nueva guía de diseño mecanístico-empírica estadounidense, pero personalizada a las condiciones propias de Costa Rica. En este aspecto resalta la importancia de investigaciones asociadas en la generación de modelos propios, labor que actualmente forma parte de las investigaciones en desarrollo del LanammeUCR.

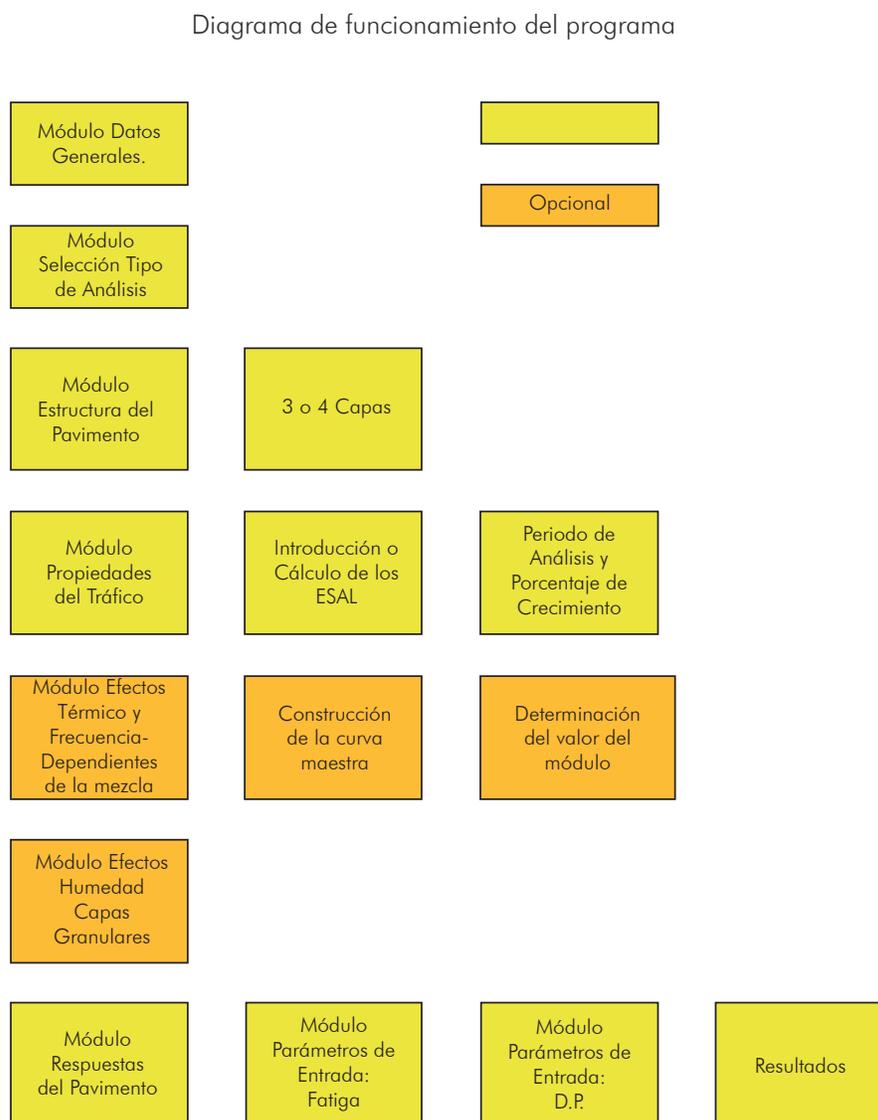
Por medio del presente trabajo se presenta una plataforma inicial que se ha logrado desarrollar, para la confección de las herramientas de cómputo necesarias para dicha guía. La herramienta por sí sola permite a consultores interesados en su utilización realizar análisis específicos de desempeño bastante preciso; sin embargo, como toda herramienta de su naturaleza, será mejorada en versiones posteriores.

2. INTERFAZ DE CÁLCULO

CR-ME es una interfaz gráfica de cálculo, diseñada de forma que interactúe de una manera amigable con el usuario, de manera, sea sencilla su aplicación y uso.

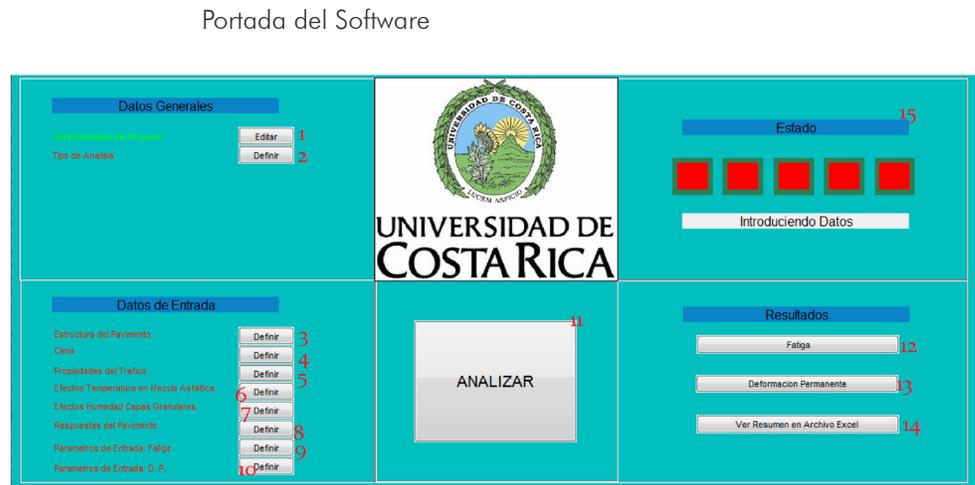
Esta cuenta con 7 módulos generales de entrada de datos, asociados con información general del proyecto, tráfico y carga, geometría y propiedades mecánicas de la estructura, condiciones climáticas y desempeño. La Figura 1 se muestra un esquema general del funcionamiento de la interfaz.

Figura 1.



En la Figura 2, se muestra la configuración de la pantalla de inicio del programa, donde se numera y explica posteriormente, cada uno de los módulos mencionados.

Figura 2.



De la figura anterior:

1. Módulo de Datos Generales/Características del Proyecto.
2. Módulo de tipo de análisis.
3. Módulo de estructura del pavimento.
4. Módulo de clima.
5. Módulo de propiedades del tráfico.
6. Módulo de efectos de temperatura en la mezcla asfáltica/curva maestra.
7. Módulo de efectos de la humedad en las capas granulares.
8. Módulo de respuestas del pavimento.
9. Módulo de parámetros de entrada: Desempeño a la fatiga.
10. Módulo de parámetros de entrada: Desempeño a la deformación permanente.
11. Botón para realizar análisis de desempeño.
12. Botón para abrir la ventana resumen de los resultados del análisis de desempeño a la fatiga.
13. Botón para abrir la ventana resumen de los resultados del análisis de desempeño a la fatiga.
14. Botón para la creación de un archivo resumen de Microsoft Excel (formato XLS).

A continuación se explicará con más detalle cada uno de los módulos mencionados anteriormente.

2.1 Módulo de Datos Generales

En esta pantalla, se solicita al usuario información general que identifique el proyecto en diseño, al picar el botón "Editar", al lado de "Características generales del proyecto" se abre la ventana de introducción de datos como la que se muestra en la Figura 3, donde se pueden anotar datos como: nombre del proyecto, localización, ingeniero en sitio, encargado de diseño, analista y fecha. Debe notarse que al iniciar el análisis este es el único módulo que puede ser utilizado. No es necesaria la introducción completa de los datos para la ejecución del software.

Figura 3.

Introducción de Datos Generales

Nombre de Proyecto 1

Localización 2

Ingeniero en Sitio 3

Encargado de Diseño 4

Analista 5

Fecha 6

Atras 7

Aceptar 8

2.2 Módulo de Selección: Tipo de Análisis

Luego de la introducción de los datos generales, el botón correspondiente al módulo siguiente, "Tipo de Análisis", aparece disponible, al presionar un click en ese botón, la interfaz de la Figura 4 aparece.

Figura 4.

Selección del Tip de Análisis

The image shows a software interface with a light blue background. It contains three vertical dropdown menus on the left side. The first menu is labeled 'Análisis Climático' and has a red '1' next to its arrow. The second menu is labeled 'Propiedades de la mezcla asfáltica' and has a red '2' next to its arrow. The third menu is labeled 'Propiedades de las capas granulares' and has a red '3' next to its arrow. At the bottom right, there are two buttons: 'Atras' and 'Aceptar'. A red '4' is placed above the 'Atras' button, and a red '5' is placed below the 'Aceptar' button.

Para la cual, considerando los números en rojo de la Figura 4:

1. Menú desplegable respecto a la consideración de un análisis climático, por medio de las siguientes opciones:

- No realizar análisis climático: No se toma en cuenta el análisis climático.
- Cálculo de perfiles climáticos a partir de registro anual: Se toma en cuenta la variación estacional de la temperatura, generando perfiles climáticos con comportamientos de temperatura similares.

2. Menú desplegable correlacionado con la caracterización del análisis a realizar al material de mezcla asfáltica, que contiene las siguientes opciones:

- Valor único introducido por el usuario: El usuario decide calcular por su parte el valor por introducir.
- Valor único calculado a partir del ensayo de módulo dinámico: Se toma en cuenta un valor módulo de la mezcla considerando únicamente una temperatura que será introducida más adelante.
- Valor(es) calculado(s) a partir del ensayo de módulo dinámico y de acuerdo a parámetros climáticos: Se toma en cuenta la variabilidad del módulo de la mezcla con respecto a una cantidad de temperaturas igual a la cantidad de perfiles climáticos que el usuario define. La temperatura es calculada automáticamente a partir de dichos datos de temperatura.

3. Menú desplegable que muestra los diversos modos en que se puede tomar en cuenta la influencia de la humedad en las capas granulares en el análisis, contiene las siguientes opciones:

- Valor introducido por el usuario y único por capa: No se toma en cuenta la humedad en las capas granulares.

- Valores introducidos por el usuario y dependientes del perfil climático para cada capa-Introducción Directa de Saturación.

2.3 Módulo de Estructura del Pavimento.

Posterior a la selección del tipo de análisis, es necesario introducir los datos propios de la estructura. Al completar el módulo anterior es posible picar el botón correspondiente, que muestra ventana de la Figura 5.

Figura 5.

Características de la vía

The image shows a software dialog box titled "Características de la vía". It has a light blue background. At the top, there is a blue header with the text "Seleccione la Cantidad de Capas" and a dropdown menu below it showing a hyphen "-" and a red number "1" to its right. Below that is another blue header "Seleccione el Tipo de Vía" with a dropdown menu showing a hyphen "-" and a red number "2" to its right. At the bottom, there are two buttons: "Atras" on the left and "Aceptar" on the right, with a red number "3" below the "Atras" button and a red number "4" above the "Aceptar" button.

Donde:

1. Menú desplegable que contiene la cantidad de capas de la estructura a analizar, para este estudio solamente existe la opción de realizar análisis para 2 configuraciones de estructura:

- 3 capas: Carpeta, Base, Sub-rasante.
- 4 capas: Carpeta, Base, Sub-base, Sub-rasante.

2. Menú desplegable que brinda la opción de seleccionar el tipo de vía a utilizar de acuerdo a las siguientes opciones (clasificación propuesta por la guía AASHTO93):

- Interestatal (Rutas Nacionales).
- Rutas Primarias.
- Otras (Rutas rurales)

4. Guarda los datos y continúa con la ventana de la Figura 6, de acuerdo a la cantidad de capas seleccionadas en la ventana anterior.

Figura 6.

Entrada de datos - 3 capas

Parametros de la Estructura del Pavimento

Estructura del Pavimento	Espesor (in)	Modulo Resiliente (psi)	Razon de Poisson
Carpeta Asfáltica	<input type="text"/> 2	<input type="text"/> 4	<input type="text"/> 7
Base	<input type="text"/> 3	<input type="text"/> 5	<input type="text"/> 8
Subrasante	<input type="text"/>	<input type="text"/> 6	<input type="text"/> 9

Profundidad hasta estrato rocoso (in) 1

Atras 10 Aceptar 11

Donde:

1. Profundidad hasta el estrato rocoso: Profundidad donde se puede considerar que no existe influencia de la carga aplicada. Si no se conoce se puede asumir 60 pulgadas.

2. Espesor carpeta asfáltica.
3. Espesor Base.
4. Módulo resiliente carpeta asfáltica.
5. Modulo resiliente base granular.
6. Módulo resiliente sub-rasante.
7. Razón de Poisson carpeta asfáltica.
8. Razón de Poisson base granular.
9. Razón de Poisson sub-rasante.
10. Botón para salir de la ventana.
11. Botón para completar la ventana.

2.3.1 Cálculo de Espesores Metodología AASHTO 93

Si el usuario decide hacer la predicción de los espesores por medio del uso de la metodología AASHTO 93, para la verificación del desempeño, puede dirigirse a la pantalla de inicio, seleccionar el menú “Herramientas” y luego “Cálculo de espesores AASHTO 93”, donde se le desplegará la ventana que se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Herramienta de cálculo AASHTO 93

Capa	Módulo Resiliente (psi)	Coeficiente Estructural	Espesor (pulg.)
Carpeta		5	8
Base	2	6	9
Subbase	3	7	10
Subrasante	4		

Other parameters: Cambio Serviciabilidad (PSI) 11, Ejes Equivalentes (WTE) 12, Confiablez 0.93, Desviación Estándar (So) 14, Calcular 15.

Donde:

1. Lista que contiene la cantidad de capas a utilizar (Nuevamente, 3 o 4 capas).
2. Módulo resiliente de la base.
3. Módulo resiliente de la sub-base.
4. Módulo resiliente de la sub-rasante.
5. Coeficiente estructural de la carpeta asfáltica.
6. Coeficiente estructural de la base granular.
7. Coeficiente estructural de la sub-base granular.
8. Espesor calculado de la carpeta (Aparece luego de picar el botón 15, teniendo toda la información de entrada).

9. Espesor calculado de la base (Aparece luego de picar el botón 15, teniendo toda la información de entrada).
10. Espesor calculado de la sub-base (Aparece luego de picar el botón 15, teniendo toda la información de entrada).
11. Cambio de serviciabilidad esperado en el periodo de análisis.
12. ESAL o Ejes equivalentes de 18 000 libras de diseño.
13. Lista que contiene diversos porcentajes de confianza con su respectivo valor de la variable estadística Z.
14. Desviación estándar. (Si no se conoce el valor puede utilizarse 0.5 como valor para Costa Rica).
15. Botón para realizar calculo de espesores.

Cuando el usuario pasa de considerar 3 o cuatro capas, los ítems de introducción de datos cambian de la misma forma.

2.4 Módulo de clima

Posterior a la finalización del módulo de introducción de los datos de la estructura, el módulo de “Caracterización del clima” se vuelve disponible. Dependiendo de la modalidad escogida en el módulo “Tipo de Análisis”, el resultado de picar en el botón puede variar. Si se ha decidido no tomar en cuenta el clima, la ventana de la Figura 8 aparece.

Figura 8.

Advertencia de módulo excluido

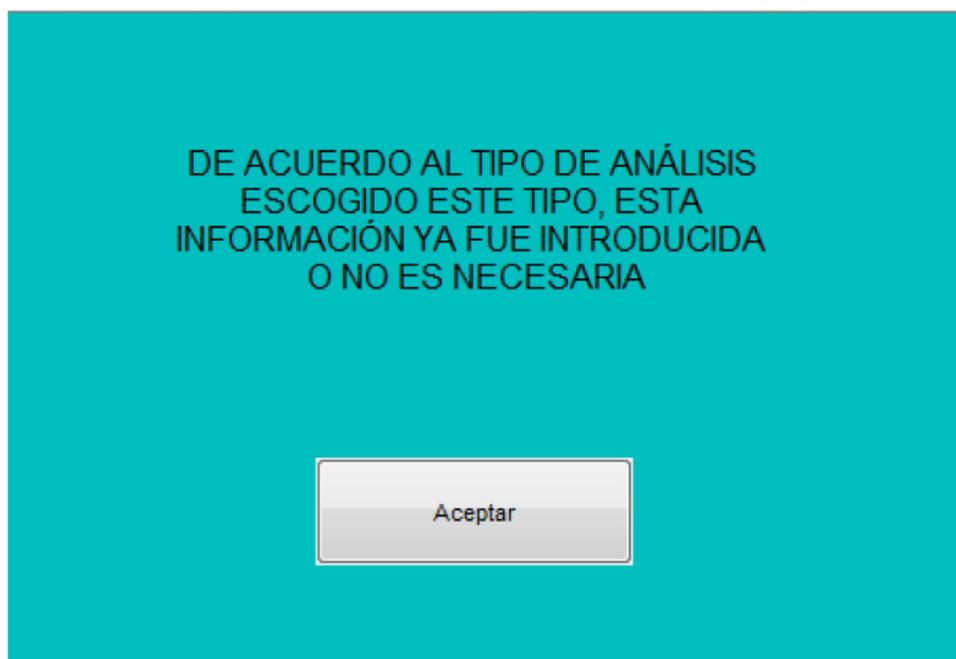
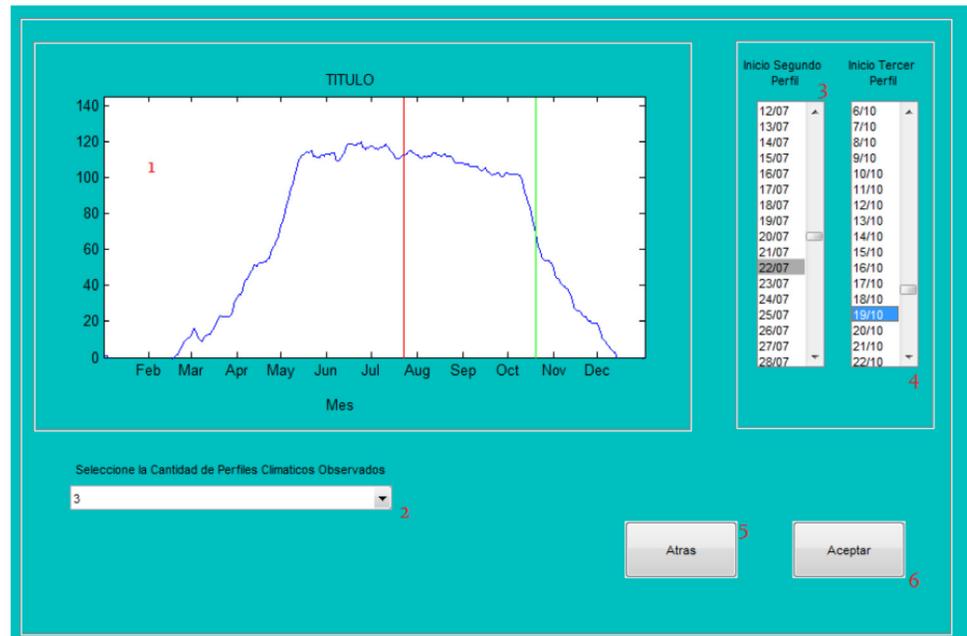


Figura 10.

Selección de perfiles climáticos



Donde:

1. Representación de las diferencias medias de temperatura a partir de los datos introducidos en la ventana anterior.
2. Lista que contiene el número de perfiles que el usuario considera existen según lo mostrado en 1. De acuerdo a la figura anterior existen 3 perfiles, un perfil al inicio del año con pendiente creciente, un perfil al segundo tercio del año con una pendiente relativamente constante y un perfil al final del año con una pendiente decreciente.
3. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del primer perfil.
4. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del segundo perfil.
5. Sale de la ventana.
6. Sale de la ventana y guarda los datos.

2.5 Módulo del Tráfico

Posteriormente a la finalización del módulo de clima, el "Módulo tráfico" se vuelve disponible, este módulo tiene la función de recolectar la información relacionada con la cantidad y características de los vehículos que transitarán el proyecto en cuestión, cuando se pica el botón "Editar" correspondiente, aparece la ventana de la Figura 11.

Figura 11.

Introducción de datos de tráfico

Propiedades del Trafico

Velocidad Promedio 1

Tipo de Pulso de Carga 2

Presion de Inflado (psi) 3

Configuracion de Ejes 4

5 6

Donde:

1. Se debe introducir la velocidad promedio en millas por hora de los vehículos que transitan la carretera en el proyecto en cuestión.
2. Lista que contiene la representación de la forma del pulso de carga que aplican los vehículos en un punto específico, si la carpeta cuenta con más de 15 cm se trata de un pulso triangular, si cuenta con menos, se trata de un pulso sinusoidal.
3. Se debe introducir la presión de inflado en psi.
4. Botón que al picarse presenta la ventana de la Figura 12, cuyo objetivo es introducir los ejes equivalentes de diseño:
5. Sale de la ventana.
6. Sale de la ventana después de haber incluido todos los datos (incluyendo botón 4).

Figura 12.

Introducción de Ejes Equivalentes de Diseño (ESAL)

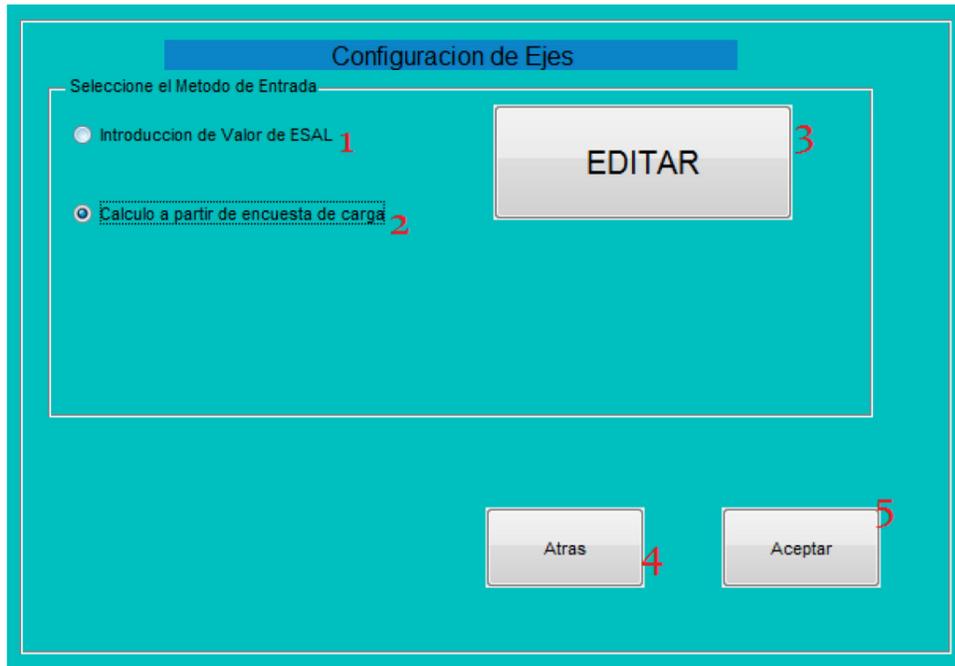
Donde:

- 1 y 2. Seleccionador exclusivo (no se pueden seleccionar los dos) que permite escoger la forma en la que se introducen los datos de tráfico. Si se escogió introducir directamente (marcado con el número 1) se presentan la interfaz anterior, con los siguientes elementos:
3. Introducción directa de los ejes equivalentes de 18 000 que se estima pasarán por la vía en cuestión en el periodo de diseño.
4. Periodo de análisis.
5. Porcentaje de crecimiento anual del tráfico.
6. Sale de la ventana.
7. Sale de la ventana y guarda los datos.

Si el usuario en lugar de escoger la introducción directa del ESAL, escoge su cálculo al no conocer el valor, la ventana cambia como se muestra en la Figura 13.

Figura 13.

Introducción de Ejes Equivalentes de Diseño (ESAL)



Donde:

- 1 y 2. Seleccionador exclusivo (no se pueden seleccionar los dos) que permite escoger la forma en la que se introducen los datos de tráfico. Si se escogió calcular el valor del ESAL, aparecen los siguientes elementos:
3. Abre la ventana de la Figura 14 que permite calcular el valor del ESAL.
4. Sale de la ventana.
5. Sale de la ventana y guarda los datos (requiere presionar botón marcado por 3 e introducir los datos solicitados).

10. Sale de la ventana y guarda los datos, requiere haber calculado el ESAL y obtenido un valor numérico al presionar 6.

Dependiendo de los parámetros del usuario, el cálculo de los ejes equivalentes de 18 000 libras se puede realizar en 1 o 2 ventanas, sin embargo se debe respetar el principio de programación que indica que cada ventana debe ser alimentada con valores correctos de acuerdo con lo que el usuario desee. Al ir alimentando y cerrando las ventanas se concluye el módulo de tráfico, para la continuación del análisis.

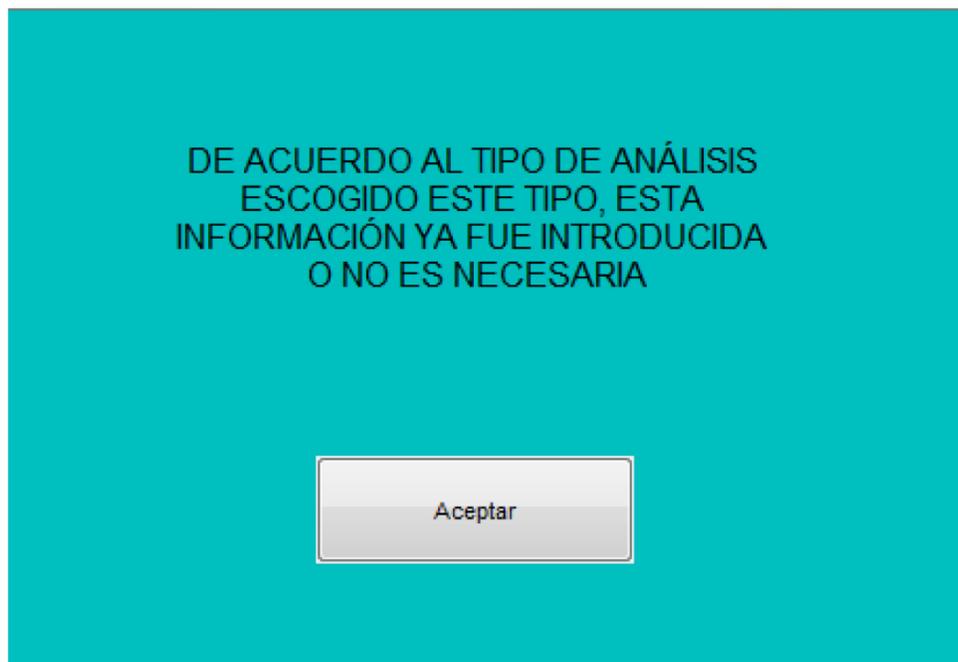
La introducción de la velocidad corresponde a la necesidad del cálculo de la frecuencia en la condición en que se elija calcular la curva maestra, es por eso que la velocidad solo aparecerá para ser introducida si en el módulo de selección del “Tipo de análisis” se indica el cálculo de dicha curva.

2.6 Módulo de efectos de temperatura en la mezcla asfáltica/curva maestra

Cuando se pica el botón correspondiente del módulo “Clima”, dependiendo del tipo de análisis establecido por el usuario existen varias ventanas que pueden aparecer, si no se decide considerar los efectos dependientes de los factores térmicos y de frecuencia de la mezcla asfáltica, aparece la ventana de la Figura 15.

Figura 15.

Advertencia de Módulo Excluido



Se debe picar en el botón “Aceptar” y el siguiente módulo se vuelve disponible, sin embargo, si el usuario escogió tomar en cuenta las características dependientes de factores térmicos y de frecuencia de la mezcla asfáltica, pero no introdujo los efectos del clima, la aparece la ventana de la Figura 16.

Figura 16.

Introducción directa de la temperatura

The image shows a software interface with a teal background. On the left, the text "Temperatura del Aire (°C)" is displayed. To its right is a white rectangular input field with a red number "1" at its end. Below the input field are two buttons: "Atras" on the left and "Aceptar" on the right. A red number "2" is positioned above the "Atras" button, and a red number "3" is positioned below the "Aceptar" button.

Donde:

1. Se introduce la temperatura media del aire en el proyecto en cuestión.
2. Se sale de la figura.
3. Se sale de la figura y se guardan los datos.

Si el usuario decidió introducir los datos del clima como se indico anteriormente, la ventana anterior no se muestra, ya que los valores de temperatura ya están calculados desde su introducción en el módulo de clima. En este caso, se hacen necesarios los datos del ensayo del módulo dinámico AASHTO P 61-10, empezando por la ventana de la Figura 17, esta ventana fue desarrollada por la Ing. Paulina Leiva para la Interfaz IModin y acoplada para este proyecto. (Leiva, 2013).

Figura 17.

Introducción de datos - Ensayo de Módulo Dinámico

DATOS DE ENTRADA

Ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias

	Temperatura (F)	Frecuencia (Hz)	Módulo(ksi)	Ángulo de fase (°)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7			1	
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Formato de importación de datos de ensayo de excel 4

Importación de datos de ensayo de excel 5

Datos de volumetría del modelo (Hirsh)

VMA 2

VFA 3

Calcular 6

Donde:

1. Cuadro de valores correspondientes al ensayo del módulo dinámico.
2. Introducción del valor del parámetro VMA (Voids in the Mineral Aggregate, por sus siglas en inglés): vacíos en el agregado mineral.
3. Introducción del valor del parámetro VFA (Voids Filled with Asphalt, por sus siglas en inglés): vacíos llenos con asfalto.
4. Antes de poder presentar los resultados en el cuadro indicada por 1 en esta ventana, es necesario introducirlos en un archivo de Excel, al picar en este botón se abre dicho archivo para su edición y posterior guardado.
5. Posterior a la inclusión de los datos del ensayo en cuestión, este botón permite la importación para el uso de MATLAB, y su muestra en el cuadro 1.
6. Luego de haber importado los datos y tener los valores de VMA y VFA, este botón permite calcular la curva maestra de la mezcla asfáltica. Cierra la ventana.

Posterior a la finalización de la ventana anterior, se presentan una serie de ventanas de verificación, estas ventanas nos indican la calidad de los datos y por consiguiente la calidad de la curva generada. El resultado final corresponde al presentado por la ventana de la Figura 18.

Figura 18.

Resultados - Cálculo de Curva Maestra



Donde:

1. Menú desplegable que contiene una lista que permite calcular el módulo para cada uno de los perfiles climáticos escogidos. En caso de que no se haya decidido tomar en cuenta el clima, solamente será válido escoger el perfil 1, el cual corresponde a la temperatura introducida a inicios del módulo.

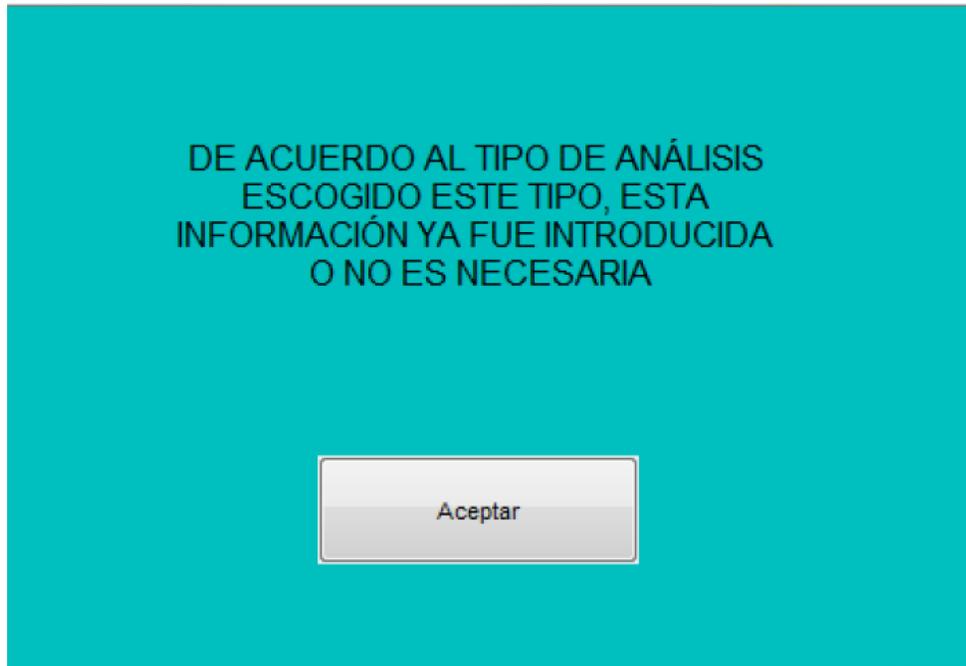
Cada vez que se seleccione cada uno de los perfiles climáticos, la temperatura de análisis y la frecuencia utilizadas para su cálculo, se indican en 2 y 3 respectivamente. El módulo resultante para el perfil 1, perfil 2 y perfil 3 serán colocados en 4, 5 y 6. Si un perfil no ha sido definido y se selecciona en la lista, una advertencia indicara que dicho perfil no aplica.

2.7 Módulo de efectos de la humedad en las capas granulares

Cuando este módulo ha sido completado, el correspondiente al análisis de la saturación presente en las capas granulares "Efecto Humedad Capas Granulares" se vuelve disponible. Dependiendo de lo indicado en el módulo Tipo de Análisis, aparecerán diferentes ventanas al picar el botón correspondiente a este módulo. Si se ha decidido no tomar en cuenta la humedad en las capas granulares, se la ventana de la Figura 19.

Figura 19.

Advertencia de módulo excluido



Al picar en el botón “Aceptar” y el siguiente módulo se vuelve disponible, sin embargo, si el usuario escogió tomar en cuenta la humedad en las capas granulares, aparece la ventana de la Figura 20.

Figura 20.

Introducción de Saturaciones

Por favor introduzca los valores que según su criterio ingenieril corresponden a la saturación (%) de las capas granulares del pavimento y su descripción de acuerdo al tamaño de las partículas

		Saturación Óptima	Primer perfil	Segundo Perfil	Tercer Perfil
Base	1	4	7	10	13
Subbase	2	5	8	11	14
Subrasante	3	6	9	12	15

Atras 16 Aceptar 17

Los menús desplegables indicados en 1, 2 y 3 contienen la clasificación de los materiales en “finos” y “gruesos”, si el 50% del material o más queda retenido en la malla número 4 debe indicarse como un material grueso, en caso contrario, debe indicarse como un material fino.

2.8 Módulo de Respuestas del Pavimento

Posterior a la modificación de los parámetros mecánicos de cada capa, se hace necesario evaluar las respuestas elásticas de la estructura para la evaluación de los modelos de desempeño.

Al picar sobre el botón “Editar”, del módulo “Respuestas del pavimento”, se abre la ventana de la Figura 21.

Figura 21.

Introducción de Respuestas del Pavimento

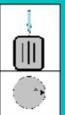
Los datos a continuación corresponden a los parámetros de entrada para la herramienta externa de análisis de multicapa elástica (ELSYMS, 3DMOVE) que usted debe realizar y cuyos parámetros de salida son necesarios para el análisis.

Por favor al finalizar el análisis, indicar los valores necesarios en la columna "Valor"

Presión de inflado (psi)

Carga (lbs)

Radio de zona de contacto (in)



	Profundidad z (in)	x (in)	y (in)	Respuesta Buscada	Valor
1	1	0	0	Def. Vertical	5
2	2	0	0	Def Horizontal	6
3	3	0	0	Def Vertical	7
4	4	0	0	Def Vertical	8

Capa	Esesor (in)	Modulo Resiliente (psi)	Razon de Poisson
Carpeta	9	13	14
Base	10	11	15
Subrasante	Semi-infinito	12	16

NOTA: Para hacer uso del ELSYMS, es necesario contar con un sistema operativo de 32 bits. En caso de no contar con este tipo de sistema operativo, se presenta el link de descarga y un tutorial para la utilización del software 3D MOVE para nuestros propósitos.

ANALIZAR CON ELSYMS

Ver tutorial 3DMOVE

Atras

Aceptar

Esta ventana aparecerá tantas veces como perfiles se hayan definido, debido a que las propiedades de la estructura cambian con el perfil climático por el cambio en los valores de temperatura a lo largo del año.

Como se indicó anteriormente se requieren las respuestas en los puntos críticos, por lo cual la gran cantidad de elementos en esta ventana son de información para introducir en el programa de análisis de elemento finito o multicapa elástica escogido.

Los elementos del 1 al 4 corresponden a las profundidades de los puntos de análisis. Los elementos del 5 al 8 corresponden a las respuestas (todas deformaciones unitarias) buscadas, que fueron obtenidas del análisis de multicapa elástica o elemento finito. Los elementos del 9 al 12 corresponden a los módulos resilientes y los elementos del 13 al 16 corresponden a las razones de Poisson de las capas, nuevamente para su introducción en el programa.

Se recomienda para el uso de esta ventana utilizar un software de cálculo de respuestas de los pavimentos, como: 3D Move, Elsym5, EVERSTRESS, BISAR, entre otros.

2.9 Módulo de parámetros de entrada: Desempeño a la fatiga

Posterior a la introducción de las respuestas elásticas, los últimos pasos para el análisis de desempeño corresponden a la introducción de parámetros faltantes en los modelos definidos para la predicción del desempeño. Para este momento la gran mayoría de los parámetros necesarios han sido introducidos, tal y como se ve en la siguiente figura que corresponde a la ventana perteneciente al modulo: parámetros de entrada: Desempeño a la Fatiga.

Figura 22.

Parámetros de entrada - Modelos de desempeño: Fatiga

The screenshot shows a software interface for calculating fatigue performance parameters. The window title is "Parámetros Para la Evaluación del Comportamiento de Fatiga". On the left, there are several input fields and a button, numbered 1 through 8:

- 1: Deformación Elastica (Elastic Deformation) - Varía de acuerdo al perfil climático (Varies according to the climatic profile)
- 2: Modulo resiliente (psi) (Resilient Modulus) - Varía de acuerdo al perfil climático (Varies according to the climatic profile)
- 3: Factor de Corrección C (Correction Factor C) - Calculador (Calculator)
- 4: Espesor Carpeta (in) (Pavement Thickness)
- 5: Porcentaje Crecimiento (%) (Percentage Increase)
- 6: Periodo de Analisis (años) (Analysis Period)
- 7: Ejes de Diseño (Design Axles)
- 8: Modelo de fatiga (Fatigue Model) - dropdown menu

In the center, there are mathematical formulas:

- 9:
$$N_f = 0.00437 \cdot A_1^2 \cdot C \left(\frac{1}{\sigma_r} \right)^{3.992} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$
- 10:
$$k'_1 = \frac{1}{0.000358 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.053 \cdot \ln(10.56)}}}$$

On the right side, there are two more formulas for the Correction Factor C:

- 9:
$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{2.8 \cdot \ln(10.56)}} \right) \cdot \left(\frac{1}{60} \right)$$
- 10:
$$FC = \left(\frac{1000}{1 + e^{2.8 \cdot \ln(10.56)}} \right) \cdot (10.56)$$

At the bottom right, there are two buttons: "Atras" (Back) and "Aceptar" (Accept).

Al generarse la ventana, si se han introducido los valores de forma correcta, automáticamente se presentan los valores representados por 1, 2, 4, 5, 6, 7. El elemento numerado con el 8 es un menú desplegable que le permite al usuario utilizar la ecuación de fatiga generada en laboratorio por el LanammeUCR -versión que será mejorada en futuras investigaciones, ya que aún no ha sido ajustada a campo-; y la ecuación de la MEPDG USA, el factor C de corrección que aparece en este caso, permite ajustar a campo la ecuación calibrada para fatiga, según esta metodología.

Figura 23.

Cálculo del factor C

Calculo del Factor C

Contenido Efectivo de Asfalto (%) **1**

Porcentaje de Vacios (%) **2**

Calcular **3**

Factor C **4**

Aceptar **5**

Los parámetros de entrada 1 y 2 deben introducirse antes de picar en el botón 3. Cuando se realiza esta acción, se mostrará el factor calculado.

2.10 Módulo de parámetros de entrada: Desempeño con respecto a la deformación permanente

Similar al módulo anterior, al seleccionar el botón "Editar" de la opción "Parámetros de Entrada: D.P.", se despliega la ventana que aparece en la Figura 24, correspondiente a los parámetros necesarios para predicción del desempeño a deformación permanente.

Figura 24.

Parámetros de entrada - Modelos de desempeño:
Deformación permanente

The screenshot shows a software interface for calculating permanent deformation. It is divided into four input panels on the left, a central calculation area, and two buttons at the bottom right.

- Panel 1:** Parameters for the evaluation of the permanent deformation of the asphalt pavement. Inputs: Respuesta Elastica (1), Temperatura (°F) (2), Espesor Carpeta (in) (3), Repeticiones de carga (4), Temperatura Promedio del Aire (°C) (5).
- Panel 6:** Parameters for the evaluation of the permanent deformation of the subgrade. Inputs: Deformación Elástica (6), Profundidad hasta estrato freático (in) (7).
- Panel 8-11:** Parameters for the evaluation of the permanent deformation of the base. Inputs: Espesor Capa (in) (8), Respuesta Elastica (9), Profundidad Nivel Freático (in) (10), Repeticiones de carga (11).
- Panel 13-14:** Parameters for the evaluation of the permanent deformation of the subbase. Inputs: Espesor Capa (in) (13), Respuesta Elastica (14), Repeticiones de carga (14).

The central calculation area contains the following equations and values:

$$IPI = \sum_{i=1}^{n_{carpeta}} \frac{a_i^2}{b_i^2}$$

$$\frac{a_i}{b_i} = 10^{(0.00015 \cdot T_i + 0.000001 \cdot T_i^2)}$$

$$k = (C_1 - C_2 \cdot \log(p)) \cdot 0.328196^{T_{avg}}$$

$$C_1 = -0.2133 \cdot H_{f,avg} + 2.4965 \cdot H_{f,avg} - 17.242$$

$$C_2 = 0.0173 \cdot H_{f,avg} - 1.7331 \cdot H_{f,avg} - 27.428$$

$$\log \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_c} \right) = -0.61119 - 0.017638 \cdot H_{f,avg}$$

$$\log \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_c} \right) = \frac{(\log(\sigma_p \cdot a_i^{0.5}) - \log(\sigma_c \cdot a_i^{0.5}))}{2}$$

$$C_1 = 10^{\left(\frac{\log(\sigma_p \cdot a_i^{0.5})}{\log(\sigma_c \cdot a_i^{0.5})} \right)}$$

$$H_{f,avg} = 10^{\left(\frac{\log(\sigma_p \cdot a_i^{0.5})}{\log(\sigma_c \cdot a_i^{0.5})} \right)}$$

$$\delta = \int_{p=0}^{p_{max}} \frac{R_{max}(z)}{k} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-k R_{max}(z)}}{k} \right) \Big|_{p=0}^{p_{max}}$$

Buttons at the bottom right are labeled "Atras" (15) and "Aceptar" (16).

Todos los elementos del 1 al 14 serán automáticamente cargados, excepto el 10 el cual corresponde al nivel freático (m).

2.11 Módulo de resultados

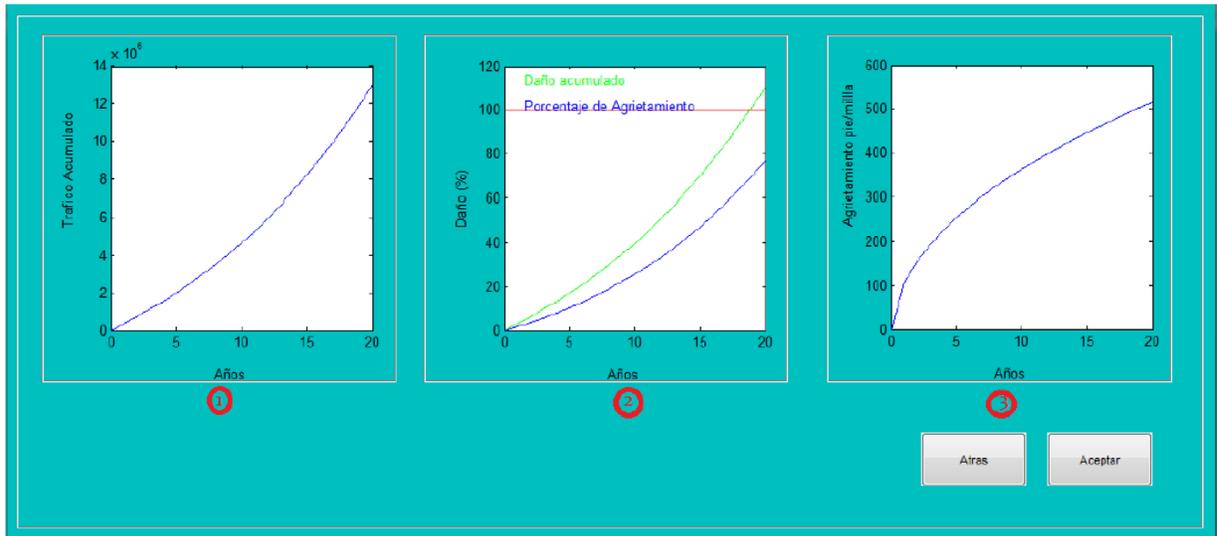
Cuando se han introducido los datos de entrada de cada módulo, al presionar el botón “ANALIZAR” en la pantalla de inicio, se efectuará el análisis completo del diseño realizado.

Para confirmar la ejecución del análisis se puede observar la barra de estado localizada en la esquina superior derecha del menú de inicio. Al terminar el análisis, la sección de resultados en la esquina inferior derecha se vuelve disponible.

Presionando el botón “Fatiga” es posible observar un resumen corto de los resultados del análisis por fatiga, como el que se muestra en la Figura 25.

Figura 25.

Resumen de resultados - Fatiga



Donde:

1. Gráfico resumen del tráfico acumulado a lo largo del periodo de estudio. (A los 20 años es equivalente a el valor de ESAL)
2. Grafico que muestra el daño acumulado y el porcentaje de área agrietada.
3. Gráfico que muestra el área agrietada (pie/milla) a lo largo del periodo de análisis.

2.12 Módulo de resultados: Deformación permanente

De la misma forma en que se hizo visible el resumen de resultados de fatiga, el resumen de resultados correspondiente al análisis de la deformación permanente se muestra como en la Figura 26.

Figura 26.

Resumen de resultados - Deformación permanente



Donde:

1. Clasificación de la deformación actual de acuerdo a los parámetros definidos por la Administración Federal de Carreteras de E.E. U.U. (Federal Highway Administration).
2. Clasificación de la deformación actual de acuerdo a los parámetros definidos por AASHTO de E.E. U.U.
3. Sale de la ventana.

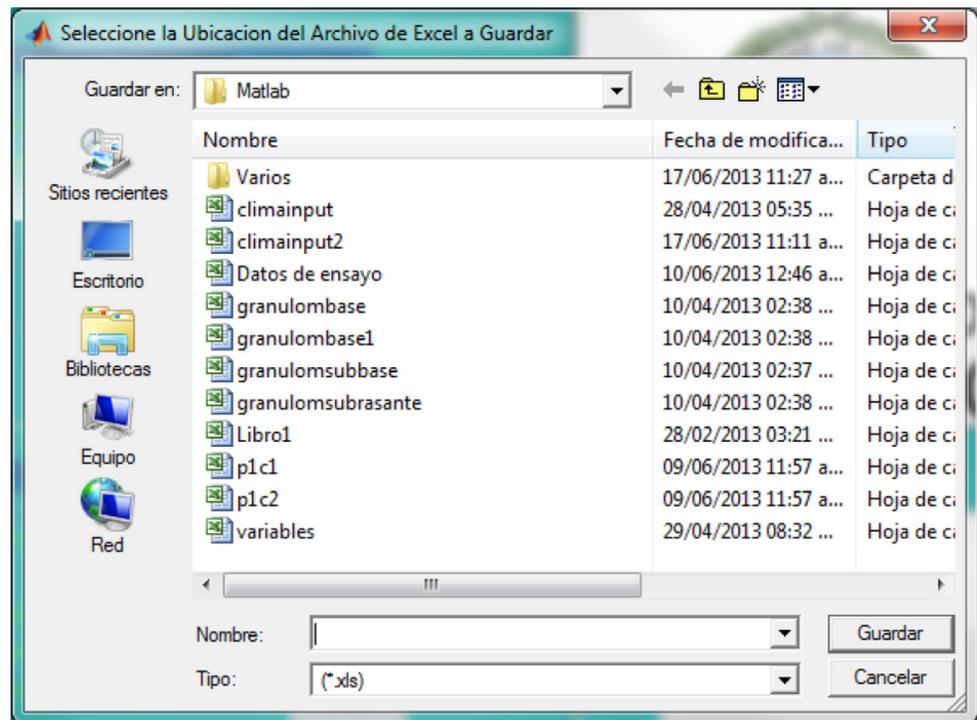
2.13 Módulo de resultados: Resumen en Excel

Como último botón se muestra la opción "Ver Resumen en Archivo Excel", al presionar este botón el programa generará un archivo de Excel con el resumen de la totalidad de los parámetros de entrada y salida del programa.

Cuando se presiona el botón, se debe escoger el nombre del archivo y la localización del archivo resumen como en la venta de la Figura 27.

Figura 27.

Localización del archivo de Excel



Posteriormente a la escogencia del nombre, el programa durará aproximadamente un minuto generando el archivo resumen.

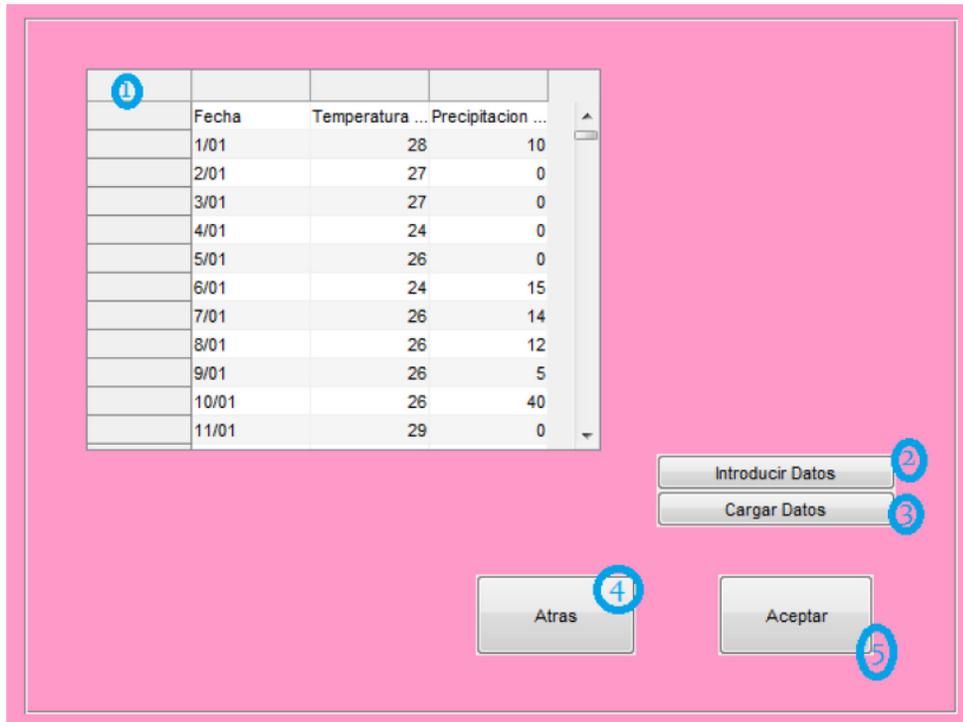
2.14 Herramienta de Determinación de Saturación de Capas Granulares

Para la determinación de la saturación de las capas granulares de desarrolló una herramienta basada en la teoría utilizada por la guía MEPDG (Esta sección en específico requiere mejoras que serán consideradas en versiones posteriores del software).

De forma similar al módulo de clima anteriormente presentado, la primera entrada de esta herramienta corresponde a los registros climáticos (Figura 28).

Figura 28.

Introducción de parámetros climáticos



Donde:

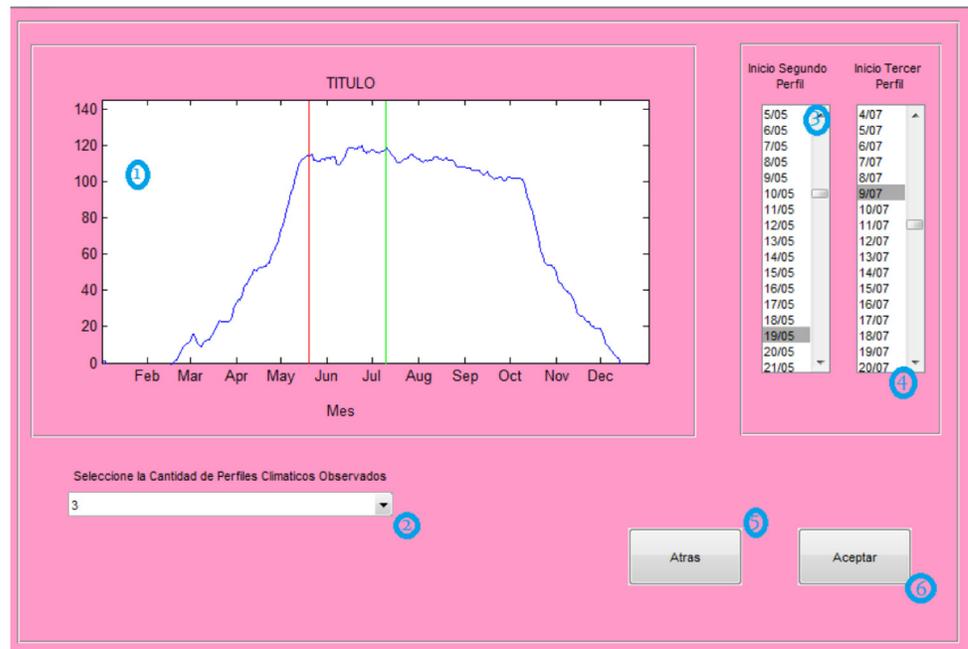
1. Cuadro de datos de información del clima, debe llenarse con la información de temperatura media diaria (°C) y precipitación (°F) para todos los días del año. Para esto se debe inicialmente introducir los datos en el botón siguiente.
2. Introducir datos: Abre el archivo de Excel destinado para introducir los datos de clima. Deben introducirse datos de todos los días del año de estudio. Posteriormente a la introducción de los datos se pica el botón marcado con el número 3.
3. Cargar datos: Al picar este botón se importan los datos introducidos en el archivo de Excel para ser introducidos en la memoria propia del programa. Al presionar este botón los datos se vuelven visibles en el cuadro 1.
4. Sale de la ventana.
5. Sale de la ventana para continuar con la siguiente.

Cuando se termina de introducir datos en la ventana anterior y se presiona el botón “Aceptar”, se presenta una ventana cuyo objetivo es determinar perfiles climáticos por medio de la metodología estadística de las diferencias medias.

La forma de determinar dichos perfiles consiste en delimitar periodos dentro del año que cuenten con pendiente similar. En la Figura 29 se muestra la forma en que se muestra esta pantalla.

Figura 29.

Selección del perfil



Donde:

1. Representación de las diferencias medias de temperatura a partir de los datos introducidos en la ventana anterior.
2. Lista que contiene el número de perfiles que el usuario considera existen según lo mostrado en 1. De acuerdo a la figura anterior existen 3 perfiles, un perfil al inicio del año con pendiente creciente, un perfil al segundo tercio del año con una pendiente relativamente constante y un perfil al final del año con una pendiente decreciente.
3. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del primer perfil.
4. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del segundo perfil.
5. Sale de la ventana.
6. Sale de la ventana, continua con la siguiente y guarda los datos.

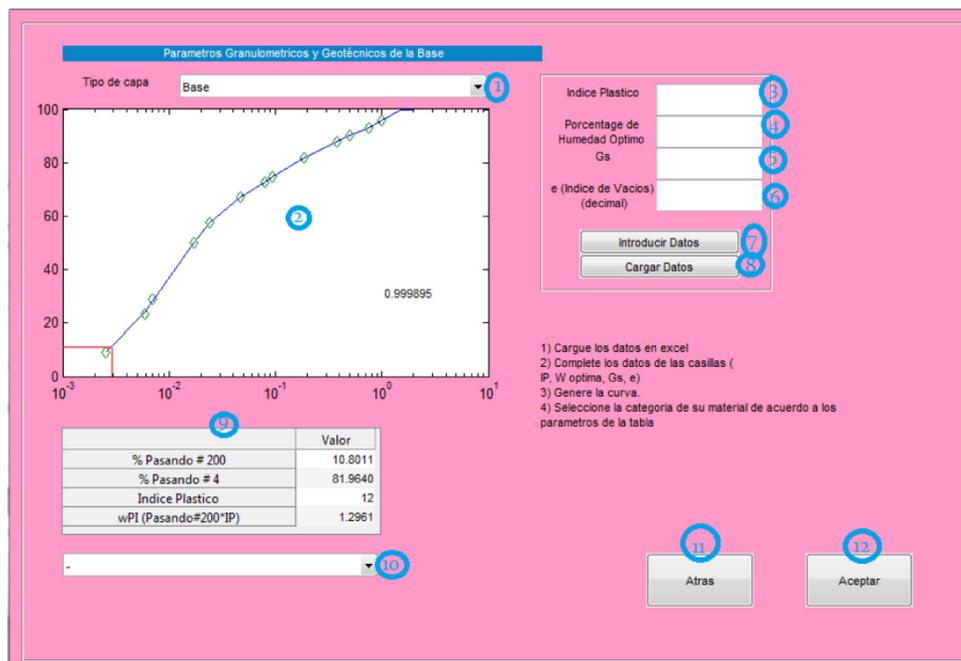
Posteriormente a la introducción de los datos climáticos, descrita en las 2 ventanas anteriores, se procede a introducir los datos característicos del material. Es necesario contar con la siguiente información para realizar el análisis:

- Plasticidad del material.
- Curva granulométrica.
- Porcentaje de humedad óptimo
- Gravedad específica
- Índice de vacíos

Esta información es introducida por medio de la ventana de la Figura 30.

Figura 30.

Características granulométricas y de plasticidad



Donde:

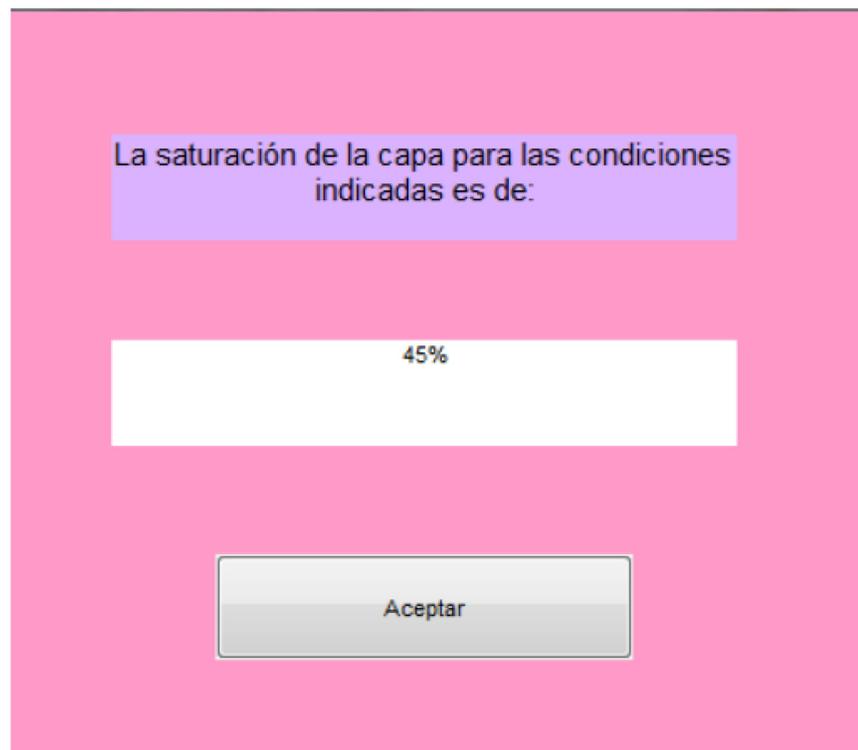
1. Tipo de material a analizar: Existen 2 clasificaciones de materiales para efectos de esta teoría: a) bases b) sub-bases y sub-rasantes.
2. Curva granulométrica.
3. Índice plástico del material.

4. Porcentaje de humedad óptimo.
5. Gravedad específica.
6. Índice de vacíos del material.
7. Introducir datos: Abre el archivo de Excel destinado para introducir los datos de granulometría del material (% pasando y diámetro de las aberturas de la malla), en el anexo 5 se muestran capturas de este archivo.
8. Posterior a la edición del archivo de Excel, este botón se pica para generar la curva granulométrica.
9. Cuadro resumen de las características del material, generada a partir de los datos introducidos en 1-7.
10. Lista que contiene varios modelos de material correspondientes a las figuras 10 y 11, varía de acuerdo a la selección realizada en 1.
11. Sale de la ventana.
12. Sale de la ventana y guarda los datos.

Posterior a la finalización de la entrada de datos se presenta una ventana que contiene el resultado del cálculo de la saturación del material en cuestión para su posterior utilización en el módulo de clima, como se muestra en la Figura 31.

Figura 31.

Resultados de saturación



BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures . Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. Developing Dynamic Modulus Master Curves for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).
- Barksdale, R. G. (1971). Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing. Highway Research Board.
- Barrantes, R., Sibaja, D., & Porras, J. (2008). Desarrollo de Herramientas de Gestión con Base en la Determinación de Índices Red Vial Nacional. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica: LANAMME - UCR.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design 2nd. Edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Lanamme-UCR. (2008). Informe de Evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica. San José, Costa Rica: Lanamme-UCR.
- Loría Salazar, L. G. (2011). Evaluation of New and Existing Test Methods to Assess Recycled Asphalt Pavement Properties for Mix Design. Nevada, Reno.: University of Nevada, Reno.
- Mena, F. (2012). Evaluación y comparación de las respuestas para el comportamiento de un pavimento flexible, usando la teoría de multicapa elástica, viscoelasticidad y Elemento Finito. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- NCHRP, N. C. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design, Part 1. Introduction. Champaign, Illinois: NCHRP.
- Ulloa, Á., Allen, J., & Badilla, G. (2007). Determinación de factores camión en pavimentos de Costa Rica. Revista Infraestructura Vial , 28-37.
- Vargas, J.P: (2013). Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica. Trabajo final de graduación para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Wahr, D. C. (2007). Comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño AASHTO 93, la Normativa Chilena vigente y la guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica NCHRP 1-37A. Infraestructura Vial #18 .
- WeatherUnderground.com. (20 de Enero de 2013). <http://www.wunderground.com/history/airport/MRPV/2013/06/26/DailyHistory.html>. Recuperado el 2013
- Witzak, M., Zapata, C., & Houston, W. (2006). NCHRP 1-40D Final Report, Models Incorporated Into the Current Enhanced Integrated Climatic Model. Arizona State University.
- Xiaodi, H., Fujie, z., & Sheng, H. (2010). Proposed Loading Waveforms and Loading Time Equations for Mechanistic-Empirical Pavement Design and Analysis. Journal of Transportation Engineering.
- Yavuzturk, C., & Ksaibati, K. (2002). Assesment of Temperature Fluctuations In Asphalt Pavements Due to Thermal Environmentl Conditions Using a Two-Dimensional, Transient Finite Difference Approach. Wyoming, E.E.U.U: Department of Civil and Architectural Engineering