



Software de dimensionamiento de pavimentos bituminosos

Manual de uso

© CEMOSA 2017





ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	. 5
2.	OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN	. 7
2.1.	Objeto	. 7
2.2.	Ámbito de aplicación	. 7
3.	ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN	. 9
3.1.	Esquema	. 9
3.2.	Bases de datos	10
4.	MÓDULOS DE INFORMACIÓN GENERAL	13
4.1.	Inicio de la aplicación	13
4.2.	Menú principal	14
4.3.	Creación de proyecto. Datos generales	16
4.4.	Geolocalización y datos climatológicos	17
5.	MÓDULO DE TRÁFICO	21
5.1.	Introducción	21
5.2.	Datos de entrada	21
5.3.	Sin datos de aforo	23
5.4.	Datos de aforo de genéricos o de cobertura	24
5.5.	Aforo continúo o de control	24
5.6.	Aforo completo con espectro de carga	26
5.7.	Metodología AASHTO	27
6.	MÓDULOS DE DIMENSIONAMIENTO	29
6.1.	Introducción	29
6.1.	Definición del modelo de firme	29
6.2.	Selección de tipología de ejes	31
7.	MÓDULO DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN	33
7.1.	Salida de resultados	33
7.2.	Validación de la sección de firme	33
8.	INFORME DE RESULTADOS	35
REFE	RENCIAS	37
GLOS	ARIO DE FIGURAS Y TABLAS	39
ACRÓ	NIMOS	40
ANEX	O I. Definiciones	41
ANEX	O II. Bases de datos	45
Par	ámetros para el cálculo del número de ejes equivalentes	45
Car	acterísticas de los vehículos pesados considerados	46
Car	acterísticas de los materiales incluidos en la aplicación	49





En pleno siglo XXI el uso de herramientas informáticas en el ámbito de la ingeniería es un hecho generalizado hasta tal punto que sería difícil encontrar cualquier proyecto en el que no se hiciesen uso de las mismas. Sin embargo, este desarrollo no ha sido homogéneo en los diferentes campos de la ingeniería civil. Mientras que en la ingeniería de estructuras o en la ingeniería hidráulica existen potentes herramientas software capaces de solucionar complejos problemas, en el ámbito de la ingeniería de carreteras es difícil encontrar un programa o aplicación que realice de forma eficiente el cálculo y dimensionamiento de pavimentos cubriendo todas las particularidades y fases del mismo, aún menos en lengua española.

Es en este punto, dentro del proyecto REPARA 2.0 cofinanciado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial –CDTI-, mediante el "Programa Estratégico de Consorcios de Investigación Empresarial Nacional -CIEN", se detecta esta necesidad y se propone la elaboración de una herramienta informática de cálculo que abarque las diferentes fases del proyecto de dimensionamiento de firmes.

De esta forma nace la aplicación REPARA Firmes que viene a cubrir esta carencia en las herramientas de informáticas de la ingeniería, y que integra en un único entorno todas las fases del dimensionamiento de secciones de firme. Se trata esta de una aplicación web multidispositivo que permite el acceso a la misma a través de cualquier navegador web.

Además, fruto de los resultados del proyecto REPARA 2.0, la aplicación permite el diseño de secciones con algunas de las nuevas tecnologías de mezclas recicladas fruto de los resultados de este proyecto.

El acceso a la aplicación se hace a través de un navegador web y está abierto a cualquier usuario a través de la dirección: https://firmes.cemosa.es





2 OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

2.1. OBJETO

El objeto de esta aplicación es el de ofrecer al proyectista una herramienta flexible de cálculo que permita el dimensionamiento y validación de secciones de firme de forma secuencial, en un entorno común y sin necesidad de usar aplicaciones adicionales.

El diseño de la aplicación está realizado de forma que de forma intuitiva, para que cualquier persona familiarizada con el dimensionamiento de firmes pueda recorrer secuencialmente las distintas etapas del cálculo de un pavimento.

La aplicación sin contener de forma explícita normativa, permite ser usada con casi cualquier prescripción o procedimiento de cálculo que esté basado en el método elástico multicapa. La amplia base de datos de materiales con sus respectivas leyes de fatiga, los distintos procedimientos para el cálculo de las solicitaciones de cálculo y la posibilidad de usar distintas configuraciones de ejes, otorga una flexibilidad y amplitud al cálculo que permite la validación de secciones de pavimento bajo una gran multitud de hipótesis diferentes.

Dada la flexibilidad de la aplicación, su uso permitirá superar los habituales y clásicos catálogos de secciones de firme, los cuales ofrecen soluciones preconcebidas y que en muchos casos pueden ser optimizadas.

Finalmente, una de las principales innovaciones de la aplicación radica en la forma de acceso a la misma, a través de un navegador web y su posibilidad de ser usada desde distintos tipos de dispositivos electrónicos como ordenadores, tabletas o teléfonos móviles. Esto amplia el horizonte de posibilidades al poder ser utilizada en diferentes situaciones, no restringiéndose su uso en una oficina de proyectos.

2.2. ÁMBITO DE APLICACIÓN

La aplicación está concebida el dimensionamiento de secciones de firme con pavimento bituminoso, incluyéndose aquí los que tradicionalmente se conocen como firmes flexibles, semiflexibles y semirrígidos.

La aplicación será usada para la validación de una sección de firme cualquiera que sea la normativa o legislación usada siempre que esté basada en el análisis por el método elástico multicapa.

Respecto a la determinación de las solicitaciones de tráfico, la aplicación permite la elección entre diversos criterios en función de la disponibilidad de datos, basados todos ellos en el concepto de eje equivalente de 13 t usado en España y la mayor parte de países de Europa. Complementariamente incluye el cálculo de las solicitaciones conforme la metodología de la AASHTO para el eje equivalente (*ESAL*) de 18 kips de forma que pueda ser usada también en los países donde está extendido este método como puedan ser los propios Estados Unidos o países iberoamericanos.

En búsqueda de una mayor aplicabilidad, se ha definido un módulo de configuraciones de carga que permite la elección y configuración de diversas tipologías de ejes como el tándem o trídem los cuáles no suelen ser utilizados en las normativas habituales pero que sin embargo pueden ser objeto de análisis particulares para casos excepcionales.

Junto a estas particularidades de cálculo, la aplicación incluye un amplio catálogo de materiales junto con sus características mecánicas y leyes de fatiga asociadas, abarcando los diferentes materiales usados en las capas de pavimento, capas de cimiento del firme y explanada.





3 ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN

3.1. ESQUEMA

La aplicación está diseñada en estructura modular, de modo que, de manera independiente y mediante un proceso secuencial se proceda al cálculo de los diferentes parámetros necesarios para el dimensionamiento del firme, de forma que el proceso finalice con la validación de una sección considerada.

El procedimiento se inicia con un formulario que permite la introducción de la información general del proyecto, y en el cuál se definen los principales datos identificativos del proyecto. A partir de ahí la serie de diferentes módulos (ver Figura 1) permiten un diseño asistido de los diferentes parámetros necesarios o complementarios para el cálculo.

Los módulos se corresponden con los siguientes procedimientos:

- Módulo de geolocalización: permite la localización del proyecto a través de la introducción de sus coordenadas geográficas, UTM, o directamente la dirección postal. Es un módulo asistido mediante la utilización de la herramienta Google™ Maps.
- Módulo de datos climatológicos: en el que se definen las principales características climáticas de la zona de proyecto. Además se encuentra asistido por mapas climáticos cargados en la propia aplicación y por la descarga de datos reales procedentes de diferentes estaciones agroclimáticas repartidas por el territorio nacional y que se encuentren en el entorno del proyecto.
- Módulo de tráfico: en este módulo se procede al cálculo de las solicitaciones de tráfico que condicionarán la sección de firme. Se trata de un módulo complejo en el que se permite la elección entre diferentes metodologías para la determinación del número de ejes equivalentes en función de los datos disponibles o de la normativa considerada.
- Módulo de definición de secciones de firme: donde se procede a la definición de la sección de firme distinguiendo entre la explanada y el paquete de firme propiamente dicho. Cuenta con una amplia base de datos de materiales que incluyen características mecánicas y leyes de fatiga de acuerdo a las principales normativas. Además destacan los materiales reciclados desarrollados durante el proyecto REPARA 2.0, facilitando la labor de diseño al proyectista.
- Módulo de definición del modelo de cargas: solicita información sobre el tipo de eje considerado en el dimensionamiento dando a elegir entre distintas tipologías de ejes. Permite la definición de distintas definiciones geométricas de los mismos y de las presiones de contacto.
- Módulo de resultados y validación del cálculo: en el que se muestran los resultados del cálculo elástico multicapa, y en donde tras aplicar los criterios de fatiga considerados para cada material y las solicitaciones de cálculo previamente calculadas, se valida o no la sección considerada.
- Informe final: descargable en formato pdf y donde se recoge todo el proceso de cálculo.



A nivel esquemático, la estructura y flujo del proceso definido en la aplicación es el que se muestra en la siguiente figura (Figura 1):



Figura 1. Esquema de funcionamiento de la aplicación

3.2. BASES DE DATOS

Partiendo del funcionamiento interno de cada uno de los distintos módulos definidos, y de los requisitos de los mismos, se ha diseñado una arquitectura para las diferentes bases de datos con las que ha de contar la aplicación, así como, las relaciones entre las mismas.

De esta forma se definen un total de 18 bases de datos dentro de la propia aplicación que permiten asistir al usuario durante las distintas fases del cálculo (ver Anexo II):

- Tipo de usuario
- Datos de proyecto
- Localizaciones
- Datos climatológicos
- Datos de tráfico
- Tipos de vehículos
- Espectros
- Distribución de espectros de carga
- Espectros para ejes dobles y triples
- Cargas ejes simples
- Cargas ejes dobles
- Cargas ejes triples
- Categorías de tráfico



- Modelos de carga
- Tipo de modelo de carga
- Capas de pavimento
- Materiales
- Leyes de fatiga

Cada una de las bases de datos contiene los diferentes parámetros necesarios para completar los cálculos correspondientes a los diversos módulos que componen la aplicación. Las interrelaciones entre las diferentes bases de datos se encuentran expresadas en el siguiente diagrama de clases UML (ver Figura 22).





Figura 2. Diagrama de clases UML de las distintas bases de datos de la aplicación



4 MÓDULOS DE INFORMACIÓN GENERAL

4.1. INICIO DE LA APLICACIÓN

La aplicación de cálculo de firmes bituminosos REPARA Firmes está implementado en forma de aplicación web, a la cual se accede a través de cualquier navegador web con solo introducir en el mismo la dirección de la misma, de igual forma que se haría para acceder a cualquier dominio.

La apariencia de la aplicación es la que se puede comprobar en la Figura 3. En este momento se presentan una serie de opciones:

- Usuario
- Contraseña
- Iniciar sesión
- Registrarse
- Acceder como invitado
- Idioma

La aplicación está concebida para el acceso como usuario registrado. Esto requiere la introducción de un usuario y una contraseña previo registro. Complementariamente ofrece la posibilidad de comenzar a acceder al mismo en la forma de invitado (*Acceder como invitado*), aunque en este caso la aplicación presenta una serie de limitaciones.



Figura 3. Inicio de la aplicación

El proceso de registro para acceder como usuario registrado se puede realizar desde esta pantalla inicial con solo teclear el botón verde *Registrarse*. Tras acceder al mismo, la aplicación solicita unos datos de registro para proceder al mismo. Estos están basados en formularios estándar de registro como los que se hacen en otras aplicaciones del entorno. Entre los mismos cabe destacar:

- Nombre de usuario
- Titulación
- Empresa
- Cargo
- Dirección



- ¿Cómo conoció el Software REPARA Firmes?
- Contraseña
- Correo electrónico

Además durante este trámite de registro se solicitará la elección del idioma en el que se quiera continuar con la aplicación, teniendo como posibilidades el español y el inglés como idioma predeterminado.

Una vez realizado el registro bastará con volver a la pantalla inicial, entrar con el usuario y contraseña elegida y pulsar el botón azul de *Iniciar sesión*.

4.2. MENÚ PRINCIPAL

Una vez completado el procedimiento de registro y el acceso a la aplicación vía usuario registrado, la aplicación presenta el menú general (Figura 4) en el que se presentan la siguiente serie de posibilidades:

- Crear proyecto
- Ver mis proyectos
- Ver datos personales
- Ayuda
- Eliminar usuario
- Cerrar sesión



Figura 4. Pantalla inicial

4.2.1. Crear proyecto

A través de la pestaña *Crear proyecto* se accederá a los diferentes módulos que componen el núcleo de cálculo de la aplicación en la forma que se definió en el capítulo anterior. La definición en profundidad de estos módulos requiere una mayor profundidad y será analizada en secciones posteriores.

4.2.2. Ver mis proyectos

La pestaña *Ver mis proyectos* (ver Figura 7) permite el acceso a un registro histórico de los diferentes proyectos realizados por el usuario. Dentro de la misma aparecen organizados por su nombre los diferentes proyectos previamente realizados. Junto al nombre es posible realizar una



serie de acciones sobre dichos proyectos como:

- descarga del informe de proyectos terminados a través de la pestaña Ver informe
- proceder a la eliminación del proyecto con la opción Eliminar
- editar proyectos ya finalizados
- completar proyectos que no están terminados

Además aparece el estado en el que se encuentra el proyecto distinguiendo entre proyectos completados o aquellos que no lo están. Es estos últimos se indica cuál sería el siguiente paso a realizar.

		C	em osa
	Ver m	is proyectos	
Q. p1		@ Completado	
Q p2		Completado	
Q p3		Completado	
Q p4		Completado	
Q p7		Completado	
Q p10		Completado	
Q p11		Completado	
Q p12		Completado	
Q p13		Completado	
p14	•	Siguiente paso: Localización	
		Volver	

Figura 5. Imagen de la sección Ver mis proyectos

El retorno al menú principal se hará mediante la pestaña inferior *Volver* o haciendo uso del menú superior.

4.2.3. Ver datos personales

Esta opción permite el acceso y visualización de los datos de registro personal que se introdujeron en la aplicación en el momento del registro junto con la modificación de los mismos (Figura 6).

La modificación de dichos datos es posible a través de la opción Editar.

El cambio de contraseña se realizará a través de la pestaña Cambiar contraseña.

El retorno al menú principal se volverá a realizar mediante la pestaña *Volver* o haciendo uso del menú superior.



♠ Menú principal	+ Crear proyecto	Mis proyectos	⊖ Cerrar sesión
Cálculo y dimensionamient	to de pavimentos flexibles		
	Datos persona	es	
	usuario		
	titulación		
	empresa/ institución		
	puesto de trabajo/ responsabilidad		
	dirección		
	correo electrónico		
	Editar		
	Cambiar contraseña		
	Volver		
	© CEMOSA 2017		

Figura 6. Imagen de la sección Ver datos personales

4.2.4. Ayuda

La sección de ayuda permite acceder a la visualización y descarga del manual de usuario de la aplicación.

4.2.5. Eliminar usuario

Esta opción permite eliminar la cuenta registrada lo que significará la pérdida de todos los proyectos registrados.

4.2.6. Cerrar sesión

El cierre y salida de la aplicación se hará a través de esta opción.

4.3. CREACIÓN DE PROYECTO. DATOS GENERALES

Una vez elegida la opción de realización de un nuevo cálculo, se procede a lanzar el diagrama de flujo o esquema de procedimiento de cálculo que aparece el primero de los pasos establecidos en el esquema general de proyecto que se presenta en la Figura 1.

El primer paso de dicho diagrama de flujo está basado en la consideración de unos datos generales o datos de partida, necesarios para la definición de la situación inicial de proyecto. Entre dichos datos se encuentran:

- Nombre de proyecto
- Descripción del proyecto
- Autor del proyecto
- Fecha de realización del proyecto
- Itinerario considerado para el cálculo del firme
- Observaciones

En la Figura 7 se puede comprobar gráficamente la apariencia en la que se presentan dichos datos dentro de la aplicación.



		Datos g	enerale	s del 1	proyecto		
Nombre:							
Proyecto de acondicion	iamiento y	mejora					
Descripción:							
Calculo de pavimento							
Autor:							
Proyectista							
Fecha:							
Jueves	20	/ 4	/ 2017	7	dd/mm/yyyy	1	
Itinerario:							
Madrid-Granada							
Observaciones:							
		Guardar	cambios				

Figura 7. Imagen del módulo de datos generales del proyecto

Una vez completados todos los campos, la pestaña *Guardar cambios* permite guardar los cambios establecidos y mediante la flecha de forma secuencial se podrá proseguir con la siguiente fase del diagrama de flujo de la aplicación.

4.4. GEOLOCALIZACIÓN Y DATOS CLIMATOLÓGICOS

4.4.1. Localización

Una vez introducidos los datos generales de proyecto, y tras guardar los cambios, el siguiente paso de la aplicación conduce al módulo de geolocalización y determinación territorial del ámbito de actuación del proyecto de firmes.

Esta localización tiene una importancia crucial en el dimensionamiento de la sección de firme puesto que dependiendo de la climatología o condicionantes atmosféricos a los que se vea sometidos el pavimentos, las propiedades de los materiales podrán variar y de esta forma el diseño se verá afectado. Estos condicionantes climáticos determinarán a su vez la validez o no del uso de diferentes tipologías de pavimento, como por ejemplo puedan ser los pavimentos drenantes en zonas de altas precipitaciones o aquellos en los que la disponibilidad de cierto material desaconseje su uso.

Una vez accedido a este módulo de cálculo, la aplicación solicita la introducción de una serie de identificadores que permitirán la determinación y geolocalización del ámbito de actuación del proyecto de firmes. La información requerida se puede introducir de dos formas diferentes, bien a través de completar una serie de campos de información que se definirán a continuación o bien mediante la selección de la ubicación en un mapa real (ver Figura 8).

La primera de las opciones requiere completar una serie de campos entre los que se encuentran:

- Identificación de la carretera o vial: en el que se deberá de incluir la nomenclatura y codificación de la vía existente o en proyecto para la que se va a realizar el dimensionamiento del pavimento
- *Puntos kilométricos (PKs)*: en los que se definirán los puntos kilométricos iniciales y finales de la actuación en el formato XXX + XXX.
- Término municipal
- Provincia



 Coordenadas: en el apartado se podrán introducir tanto las coordenadas geográficas o las coordenadas UTM. Será posible cualquiera de las dos tipologías de coordenadas puesto que la aplicación realiza la traducción instantánea de unas a las otras de forma recíproca.

dentificación de la carretera o vi		
	al:	
Camino de Ronda		
Puntos kilométricos (PKs):		
121 + 0	111 + 0	
érmino municipal:		
Granada		
rovincia:		
Granada, España		
Coordenadas:		
Geográficas.		UIM. Y. AMERICA YOU Y. AMERICA 1
3/ 1/10 1/504	UNUS	
-3 * 35 * 44,	52 👌 🕐 E 💿 🕷 🛛 Becar per currel madre gar	apalitas 🛛 Zona: 30 💿 N 🔘 S 🗎 Berar per Constantis UNV
Latitud: 37,1806214	Longitud: -3,612366599999973	Becor un d'augu
Mape Soldine	Correct of Flores, 147, 14219 floands, Egon	Zersgoza Bercelon Inngrar 0 Spaña Valencia Istoret - State - State Spaña Valencia Istoret - State - State - State Malacea Istoret - State - State - State - State - State - State Malacea
Mapa Solution	Corrisor Constant Con	Zersgoza Legendo Legendo Der Contactors Legendo Der Contactors Der Conta
Maya Tabilite	Common de la common Common de la common Com	Arrison Arr

Figura 8. Imagen del módulo de localización de la aplicación

Respecto a la selección de la localización mediante un mapa, la aplicación utiliza la tecnología de Google™ Maps de forma que simplemente con la selección sobre el mapa se completen los campos de información requeridos, así como, las coordenadas geográficas y UTM.

Una vez completado el proceso de localización, de nuevo una pestaña permite guardar los datos y continuar con el proceso de cálculo.

4.4.2. Datos climatológicos

El módulo se complementa con la introducción de los datos climatológicos que vendrán asociados al entorno territorial del proyecto.

De esta forma la aplicación presenta una nueva pantalla en donde a través de la conexión con diferentes estaciones climáticas en el entorno del proyecto, se pueden importar los datos referentes a temperaturas medias en verano, temperaturas medias en invierno, histórico de precipitaciones, junto con un climograma en el que se puede ver la evolución histórica anual de temperaturas y precipitaciones (ver Figura 10).

Además, se presentan una serie de mapas climáticos del Instituto Geográfico Nacional [1] que emergerán cuando el usuario cliquea sobre las variables de temperatura y precipitación anual.





Figura 9. Mapas climáticos usados en la aplicación

La información climatológica se considera esencial a la hora de ajustar los valores de los módulos de deformación de las distintos materiales bituminosos considerados en el cálculo, y a la hora de considerar la utilización de determinados tipos de mezclas drenantes. A su vez permite la inclusión en el informe de información acerca del clima en el entorno de la zona de proyecto, lo cual puede facilitar labores complementarias al proyectista como puedan ser la determinación de las redes de drenaje.



Figura 10. Imagen del módulo de importación de datos climatológicos





5 MÓDULO DE TRÁFICO

5.1. INTRODUCCIÓN

El módulo de tráfico de la aplicación REPARA Firmes es uno de los más complejos y relevantes de la propia aplicación, ya que desde el punto de vista funcional permite determinar uno de los parámetros críticos del proyecto como son las solicitaciones de tráfico de proyecto. Estas solicitaciones vendrán dadas a través del número de ejes equivalentes, el cuál será posteriormente utilizado como criterio para validar o no la sección de firme considerada.

Como particularidad y novedad, el procedimiento implementado en la aplicación permite el cálculo del número de ejes equivalentes según distintas metodologías en función de los datos de partida de los que se disponga en el momento del dimensionado. Estas metodologías abarcan desde la hipótesis de una total ausencia de datos de entrada, hasta la disponibilidad de aforos completos considerado espectros de carga. Además, complementariamente y teniendo en cuenta el carácter global de la ingeniería de hoy en día, se presenta el método de la norma AASHTO de cara al dimensionamiento de secciones en países en donde dicha normativa tenga vigencia.

5.2. DATOS DE ENTRADA

En primer lugar, la aplicación solicita unos datos generales de entrada comunes (Figura 11), junto con la determinación del límite de capacidad de la vía el cual está basado en el *High Capacity Manual HCM – 2000* [2] bajo las hipótesis de 50% de camiones, factor de hora punta – FHP – igual a la unidad, la proporción de tráfico medio diario en el periodo de análisis o *k-factor* igual a 0,10 y el reparto por carriles en una proporción de 60/40 (ver anexo II).

Este primer formulario es común para todos los procedimientos de cálculo y en el mismo se solicitan una serie de datos de entrada:

- Año de proyecto: año en el que se realice el proyecto de firmes
- Año de puesta en servicio: año en el que esté previsto la apertura del tramo dimensionado
- Periodo del proyecto: periodo o vida útil estimada del firme de proyecto
- *Tipo de vía:* distinguiendo a través de un menú desplegable entre red principal (o red básica), red secundaria con arcén (o red complementaria) y red secundaria sin arcén.
- *Tipo de tramo:* distinguiendo entre llano, ondulado o montañoso.
- *Límite de capacidad de la vía*: que se calculará de acuerdo a las hipótesis anteriormente expuestas o que bien podrá ser directamente introducido por el usuario
- Método de cálculo: en el que se puede elegir entre las diferentes metodologías de cálculo que se definirán a continuación.



	Tráfico
	Datos generales de entrada
Año del proyecto:	
Año puesta en servicio:	
Periodo del proyecto:	afios
Tipo de vía:	
Tipo de tramo:	•
Límite de capacidad de la vía:	veh/día
Método de cálculo para la determinación de ejes equivalentes:	· ·

Figura 11. Datos generales de entrada para el cálculo de ejes equivalentes

De cara a la determinación de las solicitaciones de cálculo, la aplicación considera los siguientes métodos de determinación de ejes equivalentes:

- Caso 1: no se disponen de datos de aforo por lo tanto se calculan los ejes equivalentes a partir de la clasificación de tráficos.
- Caso 2: se disponen de datos de aforo procedentes de una estación de cobertura, basados en el valor de la intensidad media diaria (IMD) a partir de un único aforo anual.
- Caso 3: se disponen de datos de aforo de una estación permanente (aforo continuo) o de una estación de control, que permite evaluar la intensidad teniendo en cuenta los ciclos y fluctuaciones de tráfico –diario, semanal y anual- así como las tendencias a largo plazo.
- Caso 4: se disponen de datos de aforo de una estación permanente que cuenta con equipos de última generación que permiten determinar los espectros de carga por eje.
- Caso 5: se realiza el cálculo de acuerdo a la normativa americana presentada en la AASHTO [1] por la cual se deduce el valor de los ejes equivalentes expresados en 18/kips ESAL.

Una vez elegido el método y completado el resto de campos, de nuevo una pestaña permite guardar los datos y continuar con el proceso de cálculo.

El proceso de cálculo estará basado en el concepto de tráfico equivalente de proyecto (*TP*), que vendrá dado por la siguiente expresión:

$$TP = IMD_p \cdot CE \cdot 365 \cdot F \cdot \gamma_t$$

dónde:

- *IMD_p* es la intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de apertura al tráfico
- CE es el coeficiente de equivalencia de los vehículos pesados en número de aplicaciones del eje equivalente de 13 t
- F es el factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados
- γ_t es el coeficiente de seguridad por mayoración de cargas establecido en 1,10.

Una de las novedades de esta aplicación se basa en la consideración del agotamiento por capacidad de la vía en la determinación de las solicitaciones de tráfico. En este sentido El primero se corresponde al cálculo directo sin considerar el agotamiento por capacidad de la vía, y el segundo se tiene la particularidad de que lo considera en el cálculo dicho parámetro. Si debido al crecimiento del tráfico en algún momento de la vida útil del firme se alcanza el límite de capacidad de la vía, el cuál fue previamente determinado, el algoritmo considera que dicho crecimiento no se puede seguir dando por lo que considera el tráfico constante hasta el año de finalización de la vida



útil del pavimento, por lo que el valor es inferior al dato que no tiene en cuenta dicho límite. La aplicación permite la opción de elegir cuál de los dos parámetros tomar de referencia y continuar el proceso.

5.3. SIN DATOS DE AFORO

En el caso de la elegir la opción *Sin datos de aforo,* la aplicación requiere de la información genérica para la determinación del número de ejes equivalente en forma de expresión basada en una tasa anual constante de crecimiento de la forma:

$$IMD_{futura} = IMD_{actual} \cdot (1+F)^n$$

Donde:

n es la vida estimada o periodo de proyecto

F es el la tasa anual media de crecimiento o factor de crecimiento

Para ello se presenta un formulario (ver Figura 12) en el que se requieren de los siguientes datos:

- *Categoría de tráfico:* categoría de vehículos pesados basado en las categorías (T00, T0, T1,...) de la IMDp de la instrucción de carreteras IC 6.1 [2].
- Tasa anual media de crecimiento
- *Tipología del firme:* distinguiéndose entre firme con base bituminosa o granular, firme con base tratada con cemento o firme con pavimento de hormigón vibrado (ver anexo).

El *Periodo de proyecto,* necesario para el cálculo ya ha sido introducido en la pantalla anterior *Datos generales de entrada.*

	Tráfico			
Sin datos de aforo				
	Categoría de tráfico: Tasa anual de crecimiento: Tipo de firme: Firme con base	Too 2 bituminosa o granular		
	Calcular y guardar			
	Datos guardados			
Número de ejes equivalentes (N)				
Sin considerar el agotarniento por capacidad:		23.020.693		
Considerando agotamiento por capacidad de la	Considerando agotamiento por capacidad de la carretera:			

Figura 12. Imagen del método de cálculo Sin datos de aforo

Una vez completados dichos campos, pulsando el botón *Calcular y guardar* se procede al cálculo del número de ejes equivalentes.

Este presenta dos valores diferentes para dicho número de ejes equivalentes. El primero se corresponde al cálculo directo sin considerar el agotamiento por capacidad de la vía, y el segundo se tiene la particularidad de que considera en el cálculo dicho parámetro. Por tanto, si debido al crecimiento del tráfico en algún momento de la vida útil del firme se alcanza el límite de capacidad de la vía, el cuál fue previamente determinado, el algoritmo considera que dicho crecimiento no se puede seguir dando por lo que considera el tráfico constante hasta el año de finalización de la vida útil del pavimento, por lo que el valor es inferior al dato que no tiene en cuenta dicho límite. Esta particularidad también se encuentra presente en el resto de métodos de cálculo de tráfico.

La aplicación permite la opción de elegir cuál de los dos parámetros tomar de referencia y



continuar el proceso con tan solo pulsar la opción Guardar N y continuar.

5.4. DATOS DE AFORO DE GENÉRICOS O DE COBERTURA

La opción de cálculo *Datos de aforo de genéricos (o de cobertura)* está basada en los resultados obtenidos por una estación del tipo cobertura en la que se estima la IMD a partir de un único aforo anual como mínimo y de duración no superior a las 24 horas. De cara al análisis del pormenorizado de los resultados se suelen realizar recuentos manuales que permiten identificar la composición del tráfico.

En el caso de elegir esta opción la aplicación solicita una serie de campos necesarios (ver Figura 13) para el cálculo como:

- Intensidad media diaria o IMD: intensidad de tráfico que pasa por una sección de carretera dada durante 24 horas
- Porcentaje de vehículos pesados: porcentaje de vehículos pesados sobre el total de vehículos que atraviesan una sección de carretera durante un día.
- Tasa anual de crecimiento
- Tipo de firme: con la misma distinción que se hacía para la opción Sin datos de aforo
- *Tipo de vía:* donde aparece un menú desplegable que clasifica las mismas en función del número de carriles y el sentido de circulación (ver anexo) y que permitirá realizar una distribución del tráfico, para la determinación del tráfico en el carril de proyecto.

	Tráfico					
			Datos de af	oro genéricos		
	Intensidad media dia	ria (IMD):	5000	%		
	Porcentaje de vehícu	los pesados:	2	%		
	Año de datos de afor	0:	1999			
	Tasa anual de crecim	iento:	5			
	Tipo de firme:	Firme con base bitumir	nosa o granular			•
	Tipo de vía:	Calzada de dos carriles	es por sentido de circulación 🔹		•	
Calcular y guardar						
				guardados		
Número de ejes equivalentes (N)						
Sin considerar el agot	amiento por capacida	d:	3	83.443		
Considerando agotamiento por capacidad de la carretera: 383.443						

Figura 13. Imagen del método de cálculo Datos de aforo genéricos

La salida de la aplicación de nuevo vuelve a presentar los dos valores de ejes equivalentes en función de si se considera o no el límite de capacidad de la vía. Para continuar el proceso, basta con seleccionar el valor de número de ejes equivalentes y pulsar la opción *Guardar N y continuar*.

5.5. AFORO CONTINÚO O DE CONTROL

Esta opción presenta la posibilidad de usar los datos de aforo obtenidos a través de campañas intensas en campo y que estén fundamentados en los datos y coeficientes de fluctuación procedentes de una estación permanente, de una estación de control.

En este caso, la cantidad de datos requeridos por la aplicación aumenta de forma sustancial ya que se trata de una tipología más completa, en la que se produce un conteo pormenorizado de vehículos en función de su tipología y en la que se determinan una serie de coeficientes relacionados principalmente con las variaciones o fluctuaciones de tráfico en distintos puntos del



día, la semana o el mes.

Esta opción presenta un aspecto como el que se puede comprobar en la Figura 14. Respecto a los datos solicitados por la aplicación son:

- Año de datos de aforo: año en el que se toman los datos de aforo
- Mes de aforo: mes en el que se realiza el aforo
- Duración del aforo: duración en horas del aforo
- Tasa anual de crecimiento
- Tipo de vía: de igual forma que para los casos anteriores
- *Factor N o de nocturnidad para mes de aforo:* factor de fluctuación de tráfico entre el día y la noche obtenido por medio de una estación de aforo permanente o de control.
- Factor L o variación mensual para mes de aforo: factor de fluctuación de tráfico entre diferentes meses obtenido por medio de una estación de aforo permanente o de control.
- *Factor S o de sábados y domingos para mes de aforo:* factor de fluctuación de tráfico entre días laborales y fines de semana obtenido por medio de una estación de aforo permanente o de control.
- Datos de aforo: en forma de tabla en la que se introducirán el número de vehículos procedentes del conteo de cada una de las distintas categorías en el intervalo de tiempo del aforo.

	Tráfico	
	Aforo de cobertura	
Año de datos de aforo:		
Mes de aforo:		
Duración del aforo:		
Tasa anual de crecimiento:	%	
Tipo de vía:		*
Factor N o coeficiente de no	octurnidad para mes de aforo:	
Factor L o variación mensu	al para mes de aforo:	
Factor S o de sábados y do	mingos para mes de aforo:	
	Datos de aforo	
Tipo de vehículo	Clase de vehículo	Nº de vehículos pesados totales
Autobuses	Autobus Crase A o B	
Autobuses	Autobus urbano (Clase I)	
Autobuses	Autobus interurbano (Clase II)	
Vehiculos a motor	Vehiculo a motor 2 ejes	
Vehiculos a motor	Vehiculo a motor 3 ejes	
Vehiculos a motor	Vehículo a motor rígido 4 ejes	
Tráileres	Tráiler de cuatro ejes (1-1-2)	
Tráileres	Tráiler de más de cuatro ejes (1-1-3)	
Tráileres	Tráiler de más de cuatro ejes (1-2-3)	
Trenes de carretera	Tren de carretera de 4 ejes	
Trenes de carretera	Tren de carretera de >4 ejes (1-2-1-1)	
Trenes de carrelera	Tren de carretera de > 4 ejes (1-2-1-2)	
	Calcular y guardar	

Figura 14. Imagen del método de cálculo Aforo de control

Una vez completados dichos campos, el cálculo de nuevo vuelve a presentar el número de ejes equivalentes considerado y sin considerar el agotamiento por capacidad de la vía, de forma que se selecciona la opción considerada y se pueda continuar con el proceso de dimensionamiento del firme.



5.6. AFORO COMPLETO CON ESPECTRO DE CARGA

En el caso de seleccionar la opción *Aforo completo con espectro de carga* la aplicación presentará la posibilidad de realizar el cálculo a través de la introducción de datos procedentes de un aforo de última generación, en el que a través de un sensor de presión u otra clase de dispositivo, la estación de aforo es capaz de registrar y obtener el espectro de carga completo por eje del total de vehículos que circulan por la vía.

En esta opción el formulario de entrada de datos es el más extenso y está orientado a la determinación del coeficiente de equivalencia –CE– real de los vehículos pesados en número de aplicaciones del eje equivalente de 13 t. Para las otras metodologías, este coeficiente se estima en 0.6 para firmes con pavimento bituminoso y en su caso base granular, 0.8 para firmes con bases tratadas con cemento y 1 para firmes con pavimento de hormigón.

En el caso de vías con una especial incidencia de vehículos pesados, es posible que el valor medio de este coeficiente varíe sensiblemente respecto a los valores anteriormente expresados, por lo que el cálculo del valor real es muy recomendable, en especial si se disponen de los espectros de carga necesarios para su determinación.

De esta manera esta opción solicita los siguientes parámetros:

- Año de datos de aforo
- Tasa anual de crecimiento
- Intensidad media diaria (IMD)
- Porcentaje de vehículos pesados
- Porcentaje de vehículos pesados en carril de proyecto
- Ejes simples pesados
- Ejes dobles pesados
- Ejes triples pesados

Además se solicita la distribución (reparto porcentual) de ejes por tipologías y en los intervalos considerados por la aplicación. Este campo debe de ser completado por el porcentaje de cada categoría de eje con carga dentro del intervalo respecto al total de los mismos en la misma categoría.



Tráfico						
Aforo completo con espectros de carga						
Al actualizar el método o datos del nuevo método	Al soluzilizar el metodo de obloulo para la determinación de ejec equivalentes, el método de obloulo seleccionado anteriormente no es válido, por favor complete los datos del nuevo método de obloulo seleccionado .					
Año de datos de aforo:						
Tasa anual de c	recimiento:		%			
Intensidad medi % vehículos pes	ia diaria (IMD): sados:	9	Ejes simples pesa 6 Ejes dobles pesa	dos:		
% vehículos pes	sados carril proyecto	:	6 Ejes triples pesad	los:	j l	
		Distr	ibución porcentual			
Carga por eje	Eje simple	Carga por eje	Eje dobie	Carga por eje	Eje triple	
0-3	1	0-3	8	06	7	
345	2	3-5	5	6-8	1	
547	3	5-7	2	8-10	6	
7-9	4	7-9	4	10-12	5	
9-11	3	9-11	2	12-14	8	
11-13	5	11-13	10	14-16	1	
13-15	ū	\$ 13-15	5	16-18	6	
15-17	8	15-17	9	18-20	7	
17-19	5	17-19	1	20-22	2	
19-21	4	19-21	9	22-24	5	
21-23	5	21-23	2	24-26	1	
23-25	4	23-25	8	26-28	6	
25-27	1	25-27	3	28-30	5	
Distribución de cargas por intervalos intervalos de cargas intervalos de cargas intervalos de cargas Distribución de cargas por intervalos intervalos de cargas Distribución de cargas por intervalos Distribución de cargas Distribución de cargas por intervalos Distribución de cargas por						
		c	alcular y guardar			

Figura 15. Imagen del método de cálculo Aforo completo con espectros de carga

Al completar estos campos, una serie de gráficas dinámicas permiten la visualización de los mismos.

Siguiendo la línea del resto de metodologías el número de ejes equivalentes se presentará sin considerar y teniendo en cuenta el agotamiento por capacidad de la vía.

5.7. METODOLOGÍA AASHTO

Complementariamente a los métodos expuestos, la aplicación presenta la posibilidad de realizar el cálculo mediante la metodología propuesta por la normativa AASHTO [2].

Esta es sustancialmente diferente a las metodologías anteriores, ya que se basa en un concepto de eje equivalente diferente, el denominado ESAL w18 y en un conteo de vehículos basados en los vehículos americanos.

Para la realización del cálculo la aplicación solicita la siguiente información:

- Año de datos de aforo: año en el que se realizó el aforo
- Mes: mes en el que se realizó el aforo



- Tasa anual de crecimiento: tasa anual media de crecimiento del tráfico estimada
- Periodo de análisis: periodo de vida de proyecto en años
- Coeficiente de variación estacional y diario: según AASHTO
- SN estimado: número estructural (structural number) estimado según AASHTO
- Servicialidad terminal: según AASHTO

Además se solicita los datos de aforo según distintas categorías de vehículos considerados según la AASHTO. En este sentido, sería necesario completar dichos campos con el número de vehículos registrados diariamente en el carril de proyecto.

		Tráfico
	Cálculo de ejes	equivalentes según norma AASHTO
Al actualizar el método de cálculo para la determinació	n de ejes equivalentes, el mètodo d	e cálculo seleccionado anteriormente no es válido, por favor complete los datos del nuevo mêtodo de cálculo seleccionado
	Año de datos de aloro: Mes: Tasa anual de crecimiento Periodo de analisis: Coeficiente de variación e SN estimado: Servicialidad terminal:	b: %
		Datos de aforo
	Tipo de vehículo	Nº vehículos diarios en carril de proyecto
	Sedanes	
	Pick Up	
	Microbús	
	Bus	
	C2	
	C3	
	13-52	
	13-53	
		Calcular y guardar

Figura 16. Imagen del método Cálculo de ejes equivalentes según norma AASHTO

Una vez completados dichos campos, con tan solo pulsar la pestaña *Calcular y guardar*, la aplicación muestra en esta ocasión el número de ejes equivalentes según la AASHTO los cuáles están referidos al eje de 18 kips (8.1647 t), denominándose ESAL w18.



6 MÓDULOS DE DIMENSIONAMIENTO

6.1. INTRODUCCIÓN

Tras el proceso de cálculo de las solicitaciones de tráfico, el siguiente paso dentro del diagrama de flujo de trabajo de la aplicación (ver Figura 1) es la definición de los módulos de dimensionamiento compuestos por el módulo de definición del modelo de firme y el módulo de definición del modelo de cargas o tipo de eje.

El módulo de definición del modelo de firme presenta la opción de definir la estructura y composición del paquete de firme en estudio. Se tratará de una definición a nivel de número de capas, propiedades mecánicas, espesores de capa, leyes de fatiga, etc. Sobre este esta composición se procederá a realizar el cálculo elástico multicapa con el que obtener los valores de deformaciones y tensiones que permitirá la validación o no para el tráfico considerado.

En el módulo de definición del modelo de cargas se permite elegir diversas configuraciones para distintas tipologías de ejes, dando a elegir entre la consideración de rueda individual, eje simple, eje doble o eje trídem.

6.1. DEFINICIÓN DEL MODELO DE FIRME

6.1.1. Definición de la explanada o cimiento del firme

Para la definición de la estructura del firme, la aplicación comienza solicitando una clasificación de la explanada o cimiento del firme sobre el que se dimensionará la carpeta asfáltica.

La aplicación presenta por defecto la opción de seleccionar las explanadas presentadas en la instrucción de carreteras I.C.-6.1 [3]. Además se permite la introducción de cualquier otro tipo de explanada con solo modificar los valores del Módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Definición de la estructura del firme				
Definición de la	explanada o cimiento de	firme		
Categoría de explanada:	Explanada E1 🔹	Personalizado		
Módulo de Young:	60 MPa			
Coeficiente de Poisson:	0.4			
Ley de fatiga:	$\varepsilon_{z} = 2,16\cdot 10^{-2}\cdot N^{-0,28}$			

Figura 17. Imagen del formulario Definición de la explanada o cimiento del firme

A su vez, si se selecciona una de las explanadas de la norma, junto con las propiedades mecánicas como son el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson, aparece la ley de fatiga por defecto considerada y que será utilizada para la validación de la sección.

6.1.2. Definición del paquete de firme

Una vez definida la explanada, la aplicación prosigue con la definición de la sección de firme. Para realizar dicha definición, la aplicación solicita previamente de la determinación del número de capas a considerar. Una vez se introduce el número total de capas, aparece una tabla a completar en la que se definen una a una cada una de dichas capas. La definición de cada capa incluye:

- *Tipo de capa*: distinguiendo entre capa de rodadura, capa intermedia, capa de base y otras tipologías no bituminosas (zahorras, suelocementos, suelos estabilizados, gravacementos, etc.).



- Denominación: donde se podrá elegir entre el catálogo de materiales almacenados en la base de datos de la aplicación (e.g. AC 16 D) o bien si se selecciona la opción Personalizado se podrá introducir un nuevo material jutno a sus carácterísticas.
- Espesor: espesor en centímetros de la capa
- Módulo de Young: expresado en megapascales (MPa).
- Coeficiente de Poisson
- Ley de fatiga: para cada material a fin de evaluar la capacidad de resistencia a fatiga tras un determinado número de cargas cíclicas.

La aplicación cuenta con amplia base de datos que incluye la mayoría de tipologías de materiales usados en la construcción de carreteras, incluyendo mezclas bituminosas, zahorras y materiales tratados con cemento. Cada material catalogado tiene asociado valores mecánicos y ley de fatiga, de esta forma el usuario solo tiene que seleccionar el material e introducir el espesor de la capa. Estos valores pueden ser modificados por el usuario a través de la pestaña *Personalizado,* a la vez que es posible incorporar algún nuevo material que no aparezca en la base de datos.

El diseño de la base de datos está parcialmente asistido, de forma que configuraciones erróneas o que no cumplan los estándares sean notificadas mediante mensajes de alerta. A su vez, una ventana gráfica dinámica permitirá la visualización completa de la sección considerada como se comprueba en la siguiente figura (Figura 18).

				Delilicioli	ער ום כטוונ		IIIIIe	
Defini	ción de la	exp	lanada o c	<mark>cimiento del</mark> 1	firme			
Categoria	i de explanada:	Expl	anada E1		•			
Módulo d	de Young:		60 M	Pa				
Coencien	te de Poisson:		0,4					
Defini	ción del p	aqu	ete de firm	ie				
Número d	ie capas: 4	•						
						Madelada	Coel.	
	Tipo de capa	1	Denor	ninación	Espesor (cm)	Young (MPa)	Poisson	Ley de fatiga
Capa1	Rodadura	•	AC 16 D	. (5	6000	0,	No aplica
Capa2	Base	•	AC 32 S	•	10	6000	0,	$\epsilon_r = 6,443 \cdot 10^{.3} \cdot N^{.027343}$
Capa3	Otra (No MB)	•	Zahorra artificial	sobre explanada 🔹 🖯	25	360	0,	No aplica
Capa4	Otra (No MB)	•	Gravacemento	•	25	20000	0,	$\sigma_i(MPa) = 1,30 \cdot (1-0,065 \cdot logN)$
				Paquete	e de firme c	onsiderad	D	
				80				
			5	60	AC 1	6 D		
			oeclage		AC 1	12 8		
			the film	40		ure explanada e		
			ness of					
			btal thb	20	Gravace	smento	_	
			P					
				o				-





6.2. SELECCIÓN DE TIPOLOGÍA DE EJES

Una de las novedades más importantes de la aplicación es la posibilidad de elección del modelo de cargas considerado en el cálculo. Este modelo de cargas se basa en la consideración del tipo de eje. La mayoría de programas y aplicaciones solo permiten la opción del simple o de rueda gemela doble [4]. En cambio la aplicación REPARA Firmes implementa un rango más amplio de tipologías de ejes, de forma que el usuario sea capaz de optar entre los diversos modelos entre los que se encuentran:

- Rueda individual
- Eje simple
- Eje tándem
- Eje trídem







La elección de uno u otro modelo dependerá del vehículo pesado patrón considerado en la normativa de referencia. Además, la definición del modelo de eje elegido se completa a través de una serie de parámetros como son:

- Distancia entre las ruedas del eje
- Distancia del eje
- Presión de contacto
- Radio de la rueda circular equivalente

Los valores por defecto para cada uno de los parámetros anteriores serán los que aparecen en la Instrucción de firmes de carreteras de Andalucía [5], con una presión de contacto 0.8 MPa, radio de huella de rueda 11.35 cm y distancia entre centros de ruedas de 37.5 cm. Estos podrán ser modificados por el usuario para ser adaptados a las diversas normativas existentes.

Cada modelo de cargas tendrá asociado al mismo una serie de puntos en los que se realizará la



evaluación de los parámetros mecánicos necesarios para la determinación del número de ejes admisibles de la sección. Estos se han determinado en función de los puntos en donde es esperable que los parámetros mecánicos críticos adquieran sus valores máximos. En la siguiente tabla se puede comprobar la coordenada y descripción de dichos puntos en función del modelo de carga considerado.

Modelo de carga	Puntos de Evaluación	Coordenada X	Coordenada Y	Descripción
Rueda individual	1	0	0	Bajo carga única
Eje simple	1	0	0	Bajo carga 1
	2	a/2	0	Entre cargas
Eje tándem	1	0	0	Bajo carga 1
	2	a/2	b/2	Centro de cargas
	3	a/2	0	Entre carga 1 y 2
	4	0	b/2	Entre carga 1 y 3
	1	0	0	Bajo carga 1
	2	0	b	Bajo carga 3
Eje trídem	3	a/2	0	Centro de cargas
	4	a/2	0	Entre cargas 1 y 2
	5	0	b/2	Entre cargas 1 y 3

Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje



7 MÓDULO DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN

7.1. SALIDA DE RESULTADOS

Una vez realizado el cálculo, la aplicación expone en pantalla los resultados obtenidos para los parámetros deformación vertical unitaria, deformación radial unitaria y tensión máxima (este parámetro solo para materiales tratados con cemento) en la cota superior e inferior de cada una de las capas que forman la sección y en los diferentes puntos de evaluación (Tabla 1) los cuáles dependerán del modelo de cargas seleccionado.

La forma de presentación de los resultados viene organizada para cada uno de los puntos de evaluación para el modelo de cargas seleccionado (ver Figura 20).

Tipo de eje: Eje simple		
Punto de evaluación 1: Bajo rueda 1 Coordenadas: x=0; y=0		
Denominación Cota εt εz σt	Tipo de capa	
AC 22 S 0,00 -7,62e-5 -2,75e-5	Rodadura	Capa1
0,11 1,18e-5 -6,46e-5		
AC 32 S 0,11 7,15e-5 -8,43e-5	Base	Capa2
0,26 7,87e-5 -7,18e-5		
Zahorra artificial sobre explanada E2 0,26 1,13e-4 -1,80e-4	Otra (No bituminosa)	Capa3
0,51 7,96e-5 -1,17e-4		
Explanada E2 0,51 8,00e-5 -1,86e-4	Explanada	Capa4
Punto de evaluación 2: Entre cargas Coordenadas. x=a/2; y=0		
Denominación Cota εt εz σt	Tipo de capa	
AC 22 S 0,00 -2,69e-5 4,07e-5	Rodadura	Capa1
0,11 1,30e-6 2,07e-6		
AC 32 S 0,11 2,28e-5 -5,04e-6	Base	Capa2
0,26 8,00e-5 -6,35e-5		
	Otra (No bituminosa)	Capa3
Zahorra artificial sobre explanada E2 U,26 1,18e-4 -1,69e-4		
Zahorra artificial sobre explanada E2 0,26 1,168-4 -1,698-4 0,51 8,368-5 -1,258-4		
0,11 1,30e-6 2,07e AC 32 S 0,11 2,28e-5 -5,04e 0,26 8,00e-5 -6,35e	Base Otra (No bituminosa)	Capa2 Capa3

Figura 20. Salida de resultados de la aplicación

7.2. VALIDACIÓN DE LA SECCIÓN DE FIRME

En base a estos resultados la aplicación selecciona los valores más desfavorables y aplica los criterios de fatiga obteniendo el valor de ejes equivalentes admisibles por la sección considerada. Con estos calculados, y utilizando el valor de los ejes admisibles provenientes del módulo de tráfico, calcula un factor de seguridad que deberá de ser superior a 1 para todos los criterios de fatiga considerados a fin de validad la sección.



	Evaluación				
Criterio de fatiga	Ejes máximos de cálculo según criterio (N')	Coeficiente de seguridad respecto a ejes calculados			
Fatiga de la mezcla bituminosa	9.902.889	N'/N = 1,4			
Fatiga del cimiento del firme	18.641.234	N'/N = 2,6			
Fatiga para material tratado con cemento	0	N'/N = 0,0			
Constitution (Black					

Figura 21. Evaluación de validación de la sección

Una vez obtenida una sección válida con solo pulsar la opción *Finalizar proyecto* se guardará todo el procedimiento de cálculo para que el usuario registrado pueda posteriormente volver a revisarlo si lo deseara (ver Figura 5) y se procederá a dar paso a la generación del informe de resultados.



8 INFORME DE RESULTADOS

La aplicación REPARA Firmes presenta la opción, una vez alcanzada la validación de una sección de firme, de obtener un informe final de resultados en donde se recojan todas las diversas etapas seguidas durante el proceso de dimensionamiento. Este informe, en forma de anejo de proyecto, permite la recopilación de hipótesis, parámetros, validaciones, etc. de forma que su análisis permitirá chequear rápidamente toda la metodología utilizada.

Para su visualización y descarga, tras pulsar la pestaña *Finalizar proyecto* dentro del módulo de validación aparecerá una nueva pantalla como la que se comprueba en la Figura 22.



Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe

Al pulsar sobre la pestaña *Descargar informe* se visualizará en pantalla un archivo en formato *pdf* que se podrá descargar y guardar en el equipo que se esté utilizando para la realización del cálculo.

Si en cambio, lo que se desea es salir, bastará con pulsar la pestaña *Menú principal* para volver al menú principal de la aplicación.





REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Fomento. Gobierno de España, «https://www.ign.es/espmap/mapas_clima_bach/Mapa_clima_13.htm,» 2017.
- [2] Transportation Research Board, Highway capacity manual, National Research Council, 2000.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Mechanical-Empirical Pavement Design guide, 2008.
- [4] Ministerio de Fomento, Norma 6.1 IC Secciones de firme de la Instrucción de Carreteras, Gobierno de España, 2003.
- [5] Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía, Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía ICAFIR, Sevilla, 2007.
- [6] Ministerio de Fomento, «Norma 6.3 IC Rehabilitación de firmes de la Instrucción de Carreteras.,» Gobierno de España, 2003.
- [7] Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX), «NLT-349/90. Medida de módulos dinámicos de materiales para carreteras,» 1990.
- [8] C. M. Kesaree, «Theoretical stress distribution in an elastic multi-layered medium,» Iowa State University, 1964.
- [9] Y. H. Huang, «Pavement Analysis and Design. 2nd edition.,» Prentice Hall, 2004.





GLOSARIO DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Esquema de funcionamiento de la aplicación	.10
Figura 2. Diagrama de clases UML de las distintas bases de datos de la aplicación	.12
Figura 3. Inicio de la aplicación	.13
Figura 4. Pantalla inicial	.14
Figura 5. Imagen de la sección Ver mis proyectos	.15
Figura 6. Imagen de la sección Ver datos personales	.16
Figura 7. Imagen del módulo de datos generales del proyecto	. 17
Figura 8. Imagen del módulo de localización de la aplicación	.18
Figura 9. Mapas climáticos usados en la aplicación	.19
Figura 10. Imagen del módulo de importación de datos climatológicos	.19
Figura 11. Datos generales de entrada para el cálculo de ejes equivalentes	.22
Figura 12. Imagen del método de cálculo Sin datos de aforo	.23
Figura 13. Imagen del método de cálculo Datos de aforo genéricos	.24
Figura 14. Imagen del método de cálculo Aforo de control	.25
Figura 15. Imagen del método de cálculo Aforo completo con espectros de carga	.27
Figura 16. Imagen del método Cálculo de ejes equivalentes según norma AASHTO	.28
Figura 17. Imagen del formulario Definición de la explanada o cimiento del firme	.29
Figura 18. Vista de la ventana de la aplicación donde se define la estructura del firme	.30
Figura 19. Esquemas de los ejes considerados: a) rueda individual; b) eje simple; c) eje tándem eje trídem	; d) .31
Figure 20. Solido do recultados do la oplicación	.33
rigura 20. Salida de resultados de la aplicación	
Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección	.34
Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe	. 34 . 35
Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9]	. 34 . 35 . 53
Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9] Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado	. 34 . 35 . 53 . 55
Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9] Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje	. 34 . 35 . 53 . 55 . 32
Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9] Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje Tabla 2. Categorías de tráfico [4]	. 34 . 35 . 53 . 55 . 32 . 45
 Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9] Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje Tabla 2. Categorías de tráfico [4] Tabla 3. Cálculo de la capacidad máxima de una vía [2] 	. 34 . 35 . 53 . 55 . 32 . 45 . 45
 Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9] Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje Tabla 2. Categorías de tráfico [4] Tabla 3. Cálculo de la capacidad máxima de una vía [2] Tabla 4. Coeficientes de asignación por carriles 	.34 .35 .53 .55 .32 .45 .45 .45
 Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9] Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje Tabla 2. Categorías de tráfico [4] Tabla 3. Cálculo de la capacidad máxima de una vía [2] Tabla 4. Coeficientes de asignación por carriles Tabla 5. Coeficientes de equivalencia a ejes de 13 toneladas 	.34 .35 .53 .32 .45 .45 .45 .45
 Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe. Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9]. Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado. Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje Tabla 2. Categorías de tráfico [4] Tabla 3. Cálculo de la capacidad máxima de una vía [2] Tabla 4. Coeficientes de asignación por carriles Tabla 5. Coeficientes de equivalencia a ejes de 13 toneladas. Tabla 6. Tipos de vehículos considerados por normativa europea y española 	.34 .35 .53 .55 .32 .45 .45 .45 .46
 Figura 20. Salida de resultados de la aplicación Figura 21. Evaluación de validación de la sección Figura 22. Imagen de la opción de descarga de informe. Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9]. Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado. Tabla 1. Puntos de evaluación en los distintos modelos de eje Tabla 2. Categorías de tráfico [4] Tabla 3. Cálculo de la capacidad máxima de una vía [2]. Tabla 4. Coeficientes de asignación por carriles Tabla 5. Coeficientes de equivalencia a ejes de 13 toneladas. Tabla 6. Tipos de vehículos considerados por normativa europea y española Tabla 7. Tipos de vehículos considerados por normativa AASHTO [3] 	.34 .35 .53 .55 .45 .45 .45 .45 .46 .46 .48



ACRÓNIMOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC	Asphalt concrete
CDTI	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
CE	Coeficiente de equivalencia
CIEN	Consorcios de Investigación Empresarial Nacional
ESAL	Equivalent Single Axle Load
FHP	Factor de hora punta
IMD	Intensidad media diaria
IMD_{p}	Intensidad media diaria de vehículos pesados
HCM	High Capacity Manual
MPa	Megapascal
Ν	Número de ejes equivalentes de proyecto
PK	Punto kilométrico
PDF	Portable Document Format
SN	Structural number
TP	Tráfico de proyecto
UML	Unified Modeling Language
UTM	Universe Transverse Mercator



ANEXO I. Definiciones

Año horizonte: año al que se refieren determinadas prognosis de situaciones relacionadas con el servicio público viario.

Automóvil: vehículo de motor que circula sin carriles y sin conexión a una fuente exterior de energía. De esta definición se excluyen los ciclomotores, los vehículos para personas con discapacidad y los tractores y demás maquinaria agrícola.

Berma: franja longitudinal, afirmada o no, comprendida entre el borde exterior del arcén y la cuneta o arista interior de talud más próxima a la plataforma.

Calzada: parte de la carretera destinada a la circulación de vehículos. Se compone de uno o de varios carriles

Capa de base: capa del firme situada debajo del pavimento cuya misión es eminentemente estructural.

Capa intermedia: capa de un pavimento de mezcla bituminosa situada debajo de la capa de rodadura.

Capa de rodadura: capa superior o única de un pavimento de mezcla bituminosa.

Carril de proyecto: carril por el que en una calzada circula el mayor número de vehículos pesados.

Categorías de explanada: tipos de explanada que se establecen, en función de su capacidad resistente, a los efectos de dimensionamiento de la sección estructural del firme.

Categorías de tráfico pesado: intervalos que se establecen, a los efectos del dimensionamiento de la sección estructural del firme, para la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD_p).

Explanada: superficie sobre la que se apoya el firme, no perteneciente a su estructura

Firme flexible: firme constituido por capas granulares no tratadas y por un pavimento bituminoso de espesor inferior a 15 cm (puede ser un tratamiento superficial).

Firme semiflexible: firme constituido por capas de mezcla bituminosa, de espesor total o superior a 15 cm, sobre capas granulares no tratadas.

Firme semirrígido: firme constituido por un pavimento bituminoso de cualquier espesor sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos, con espesor conjunto de éstas igual o superior a 20 cm para la IC-6.1 [3] o de 18 cm para la IC-6.3 [5].

Gravacemento: mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y excepcionalmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes de carretera.

Ley de fatiga: expresión matemática que permite estimar el número de aplicaciones de carga que un material puede soportar hasta su agotamiento, en función de un determinado parámetro característico de su comportamiento estructural.

Mezcla bituminosa abierta en frío: combinación de una emulsión bituminosa, áridos con un contenidos de finos muy reducido y aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas de una película de ligante. Su proceso de fabricación no implica calentar el ligante ni los áridos, y su puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

Mezcla bituminosa de alto módulo: mezcla bituminosa en caliente en la que el valor del módulo dinámico a veinte grados Celsius (20°C), según la NLT-349 [6], es superior a once mil megapascales (11.000 MPa).



Mezcla bituminosa en caliente: combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas de una película de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Mezcla bituminosa discontinua en caliente: mezcla bituminosa en caliente para capas de rodadura cuyos áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso.

Módulo de elasticidad: en un material de comportamiento esencialmente elástico es el cociente entre la tensión aplicada en un ensayo uniaxial y la deformación unitaria producida en el mismo eje.

Pavimento: parte superior de un firme, que debe resistir los esfuerzos producidos por la circulación, proporcionando a ésta una superficie de rodadura cómoda y segura.

Periodo de servicio: periodo de tiempo considerado para el proyecto y dimensionamiento de la rehabilitación estructural de un firme.

Plataforma: zona de la carretera destinada al uso de los vehículos, formada por la calzada, la mediana, los arcenes y las bermas afirmadas.

Reciclado en central: técnica de reciclado en la que los materiales levantados se llevan a una central de fabricación para mezclarlos, en caliente, con una cierta proporción de materiales de aportación.

Reciclado in situ: técnica de reciclado en la que los materiales levantados para su aprovechamiento no se trasladan fueran de la carretera

Reciclado: rehabilitación de un firme consistente en el levantamiento, normalmente por fresado, de los materiales que han estado en servicio, su mezcla con materiales de aportación y su aplicación en el mismo lugar o en otro diferente.

Reconstrucción parcial del firme: eliminación parcial y reposición del firme existente que no afecta a la totalidad del espesor.

Reconstrucción total del firme: sustitución completa del firme existente por otro de nueva construcción en la totalidad de un tramo, o zona de la carretera.

Rehabilitación estructural: aumento de la capacidad estructural del firme existente, adecuándola a las condiciones previsibles de tráfico durante su vida útil.

Rehabilitación superficial: restauración o mejora de las características superficiales de un firme. A diferencia de la rehabilitación estructural, no tiene por objeto aumentar la capacidad resistente del firme, aun cuando en determinados casos pueda mejorarla.

Reposición del firme: eliminación en una zopa de la capa o capas deterioradas del firme hasta la profundidad necesaria, sustituyéndolas por otra u otras de materiales adecuados, que pueden no ser los del firme existente.

Suelocemento: mezcla homogénea de materiales granulares (zahorra, suelo granular o productos inertes de desecho), cemento, agua y eventualmente aditivos realizada en central, que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes de carretera.

Terraplén: parte de la explanación situada sobre el terreno natural.

Terreno natural: terreno existente bajo la capa vegetal.

Vehículo pesado: a los efectos de la instrucción de carreteras 6.1-IC, se incluyen en esta denominación los camiones de carga útil superior a 3 tn de más de 4 ruedas y sin remolque; los camiones con uno o varios remolques; los vehículos articulados y los vehículos especiales; y los vehículos dedicados al transporte de personas con más de 9 personas.



Vida residual: periodo de tiempo que le queda de vida útil a un firme o a alguna de sus capas.

Vida útil: período de tiempo en el que el firme (o la capa del firme considerada) no presenta una degradación estructural generalizada.

Zahorra: material granular, de granulometría continua, utilizada como capa de firme. Se denomina zahorra artificial al constituido por partículas total o parcialmente trituradas. Zahorra natural es el material formado básicamente por partículas no trituradas.





ANEXO II. Bases de datos

PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES

Categoría de tráfico pesado	IMDp (mínima)	IMDp (máxima)	IMDp (cálculo)	Coeficiente de mayoración de tráfico [5]			
Т00	4000	-	8000	1,2			
то	2000	4000	4000	1,2			
T1	800	2000	2000	1,2			
T2	200	800	800	1,1			
T31	100	200	200	1,1			
T32	50	100	100	1,1			
T41	25	50	50	1			
T42	0	25	25	1			

Tabla 2. Categorías de tráfico [4]

Tabla 3. Cálculo de la capacidad máxima de una vía [2]

Tipo de vía		Tipo de tramo	
	Llano	Ondulado	Montañoso
Red principal	9000	4000	2000
Red secundaria (con arcén)	7000	3000	1500
Red secundaria (sin arcén)	5000	2000	1000

Tabla 4. Coeficientes de asignación por carriles

Tipo de vía	Porcentaje sobre carril de proyecto
Calzada de dos carriles y con doble sentido de circulación	0,5
Calzada de dos carriles por sentido de circulación	1
Calzada de tres o más carriles por sentido de circulación	0,85



Tabla 5. Coeficientes de equivalencia a ejes de 13 toneladas

Tipo de firme	Coeficiente de equivalencia
Firme con base bituminosa o granular	0.6
Firme con base tratada con cemento	0.8
Firme con pavimento de hormigón vibrado	1

Tabla 6. Valores habituales del factor-k [2]

Tipo de zona en estudio	Valor
Urbanizada	0.091
Urbana	0.093
Transición/ urbana	0.093
Rural desarrollada	0.095
Rural sin desarrollar	0.100

CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS PESADOS CONSIDERADOS

Tipo de vehículo	Clase de vehículo	Peso eje (tn.)	Tipo de eje
	de vehículoClase de vehículoPeso eje (tn.)TipAutobus Clase A o B11,55Autobus Clase A o B105Autobus urbano (Clase I)135Autobus interurbano (Clase II)105Autobus interurbano (Clase II)12,65Vehículo a motor 2 ejes85Vehículo a motor 2 ejes85	Simple	
		10	Simple
Autobusos	Autobus urbano (Clase I)	13	Simple
Autobuses		10	Simple
	Autobus interurbano	12,6	Simple
	(Clase II)	10	Simple
	Vehículo a motor 2 ejes	8	Simple
Vehículos a motor		10	Simple
	Vehículo a motor 3 ejes	8	Simple

Tabla 7. Tipos de vehículos considerados por normativa europea y española

Tipo de vehículo	Clase de vehículo	Peso eje (tn.)	Tipo de eje
		18	Tándem
	Vehículo a motor rígido 4 ejes	16	Tándem
		16	Tándem
		8	Simple
	Tráiler de cuatro ejes	11,5	Simple
	(•••-)	18	Tándem
		8	Simple
Trailers	Tráiler de más de cuatro ejes (1-1-3)	11,5	Simple
		20	Trídem
		8	Simple
	Tráiler de más de cuatro ejes (1-2-3)	11	Tándem
		21	Trídem
		8	Simple
	Tren de carretera de 4	10	Simple
	ejes (1-1-1-1)	9	Simple
		9	Simple
		8	Simple
	Tren de carretera de más	18	Tándem
Trenes de carretera	de 4 ejes (1-2-1-1)	7	Simple
		7	Simple
		8	Simple
	Tren de carretera de más	18	Tándem
	de 4 ejes (1-2-1-2)	6	Simple
		8	Tándem

Clase de vehículo	Tipo de eje	Peso eje (tn.)	Peso eje (kips)
Sadanas	uloTipo de ejePesSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleTándemSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleSimpleTándemSimpleSimpleSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleSimpleSimpleTándemSimpleTándemSimpleTándemSimpleSimpleSimpleTándemSimple<	0,5	1,1023
Seudiles	Simple	0,5	1,1023
Pick Up	Simple	0,5	1,1023
FICK OP	Simple	1	2,2046
Microbus	Simple	1	2,2046
MICIODUS	Simple	2,8	6,1729
Rus	Simple	5	11,0231
Bus	Simple	7	15,4324
C2	Simple	7	15,4324
62	Simple	11	24,2508
C3	Tándem	16	35,2440
65	Simple	7	15,4324
	Tándem	17	37,4786
T3-S2	Tándem	14	30,8647
	Simple	6	13,2227
	Simple	7	15,4324
T3-S3	Tándem	18	39,6832
	Trídem	25	55,1156

Tabla 8. Tipos de vehículos considerados por normativa AASHTO [3]



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES INCLUIDOS EN LA APLICACIÓN

Denominación	Naturaleza	Тіро	Capa de rodadura	Capa base	Resto de capas	Explanada	Módulo de deformación	Coeficiente de Poisson	Ley de fatiga	Espesor mínimo (cm)	Espesor máximo (cm)
AC 16 D	Mezcla bituminosa	Densa	Si	-	-	-	6000	0,33	4	5	10
AC 22 D	Mezcla bituminosa	Densa	Si	-	-	-	6000	0,33	4	5	10
AC 16 S	Mezcla bituminosa	Semidensa	Si	Si	-	-	6000	0,33	4	5	15
AC 22 S	Mezcla bituminosa	Semidensa	Si	Si	-	-	6000	0,33	4	5	15
AC 32 S	Mezcla bituminosa	Semidensa	Si	Si	-	-	6000	0,33	4	5	15
AC 22 G	Mezcla bituminosa	Gruesa	-	Si	-	-	5000	0,33	3	7	15
AC 32 G	Mezcla bituminosa	Gruesa	-	Si	-	-	5000	0,33	3	7	15
AC 22 S MAM	Mezcla bituminosa	Mezcla de alto módulo	-	Si	-	-	11000	0,3	5	7	13
BBTM 8A	Mezcla bituminosa	Discontinua	Si	-	-	-	4000	0,35	-	2	3

Tabla 9. Base de datos de materiales utilizada en la aplicación



Denominación	Naturaleza	Тіро	Capa de rodadura	Capa base	Resto de capas	Explanada	Módulo de deformación	Coeficiente de Poisson	Ley de fatiga	Espesor mínimo (cm)	Espesor máximo (cm)
BBTM 11A	Mezcla bituminosa	Discontinua	Si	-	-	-	4000	0,35	-	3	-
BBTM 8B	Mezcla bituminosa	Discontinua	Si	-	-	-	4000	0,35	-	2	3
BBTM 11B	Mezcla bituminosa	Discontinua	Si	-	-	-	4000	0,35	-	3	-
PA 16	Mezcla bituminosa	Drenante	Si	-	-	-	4000	0,35	-	4	-
PA 11	Mezcla bituminosa	Drenante	Si	-	-	-	4000	0,35	-	4	-
AF 8	Mezcla bituminosa	Abierta	Si	-	-	-	1500	0,35	3	-	3
AF 12	Mezcla bituminosa	Abierta	Si	-	-	-	1500	0,35	3	4	5
AF 20	Mezcla bituminosa	Abierta	Si	-	-	-	1500	0,35	3	6	7
AF 25	Mezcla bituminosa	Abierta	Si	-	-	-	1500	0,35	3	8	-
Zahorra natural	Material granular	-	-	-	Si	-	350	0,35	-	15	30
Zahorra artificial sobre	Material	Zahorra	-	-	Si	-	180	0,35	-	15	30



Denominación	Naturaleza	Тіро	Capa de rodadura	Capa base	Resto de capas	Explanada	Módulo de deformación	Coeficiente de Poisson	Ley de fatiga	Espesor mínimo (cm)	Espesor máximo (cm)
explanada E1	granular	artificial									
Zahorra artificial sobre explanada E2	Material granular	Zahorra artificial	-	-	Si	-	360	0,35	-	15	30
Zahorra artificial sobre explanada E3	Material granular	Zahorra artificial	-	-	Si	-	600	0,35	-	15	30
Suelo seleccionado tipo 2	Material granular	Suelo	-	-	Si	-	150	0,35	-	-	-
Suelo seleccionado tipo 3	Material granular	Suelo	-	-	Si	-	200	0,35	-	-	-
Suelo seleccionado tipo 4	Material granular	Suelo	-	-	Si	-	250	0,35	-	-	-
Todo-uno	Material granular	-	-	-	Si	-	350	0,35	-	-	-
Suelo estabilizado S- EST1	Material granular	Suelo estabilizado	-	-	Si	-	100	0,35	-	25	30
Suelo estabilizado S- EST2	Material granular	Suelo estabilizado	-	-	Si	-	200	0,3	-	25	30



Denominación	Naturaleza	Тіро	Capa de rodadura	Capa base	Resto de capas	Explanada	Módulo de deformación	Coeficiente de Poisson	Ley de fatiga	Espesor mínimo (cm)	Espesor máximo (cm)
Suelo estabilizado S- EST3	Material granular	Suelo estabilizado	-	-	Si	-	1000	0,25	-	25	30
Suelocemento SC-3	Material tratado con conglomerante hidráulico	Suelocemento SC-3	-	-	Si	-	2000	0,25	8	20	30
Suelocemento SC-4	Material tratado con conglomerante hidráulico	Suelocemento SC-4	-	-	Si	-	8000	0,25	9	20	30
Gravacemento	Material tratado con conglomerante hidráulico	Gravacemento	-	-	Si	-	20000	0,25	10	20	25
Explanada E1	Explanada	Categoría baja	-	-	-	Si	60	0,4	11	-	-
Explanada E2	Explanada	Categoría media	-	-	-	Si	120	0,4	11	-	-
Explanada E3	Explanada	Categoría alta	-	-	-	Si	300	0,4	11	-	-



ANEXO III. Modelo de cálculo implementado

El programa Repara Firmes usa como modelo de cálculo el método elástico multicapa [8] a fin de determinar el estado tensodeformacional en las distintas capas que conforman el firme.

El modelo de cálculo implementado se basa en la teoría clásica de la elasticidad [6] en donde la función de tensión ϕ cumple:

$$\nabla^4 \phi = 0$$

La cuál es asumida por cada una de las capas. Para sistema con distribución simétrica axial de la tensión:

$$\nabla^{4} = \left(\frac{\partial^{2}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}}\right) \left(\frac{\partial^{2}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}}\right)$$

en la que r y z son las coordenadas cilíndricas para las direcciones radiales y verticales respectivamente. Una vez que la función de tensión es definida, las tensiones y desplazamientos pueden ser determinados por:



Ya que es una ecuación diferencial de cuarto orden, las tensiones y los desplazamientos necesitarán de cuatro constantes de integración que serán determinadas a partir de las condiciones de contorno y de continuidad.

Si se hace $\rho = r / H\rho = r / H\gamma$ y $\lambda = z / H\lambda = z / H$ en el que *H* es la distancia desde la superficie hasta la parte superior de la capa inferior, como se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas [9]



Por sustitución se puede verificar fácilmente que:

$$\phi_i = \frac{H^3 J_o(m\rho)}{m^2} \Big[A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} + C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-(\lambda - \lambda_{i-1})} \Big]$$

La cual es la función de tensiones para la capa *i* que cumple la ecuación inicial, en la que J_o es la función de Bessel de primera especie y orden 0; *m* es un parámetro, y *A*, *B*, *C* y *D* son constantes de integración que será determinadas por las condiciones de continuidad y contorno. El índice *i* variará desde 1 hasta *n* y se refiere a los valores de la correspondiente capa *i*.

Sustituyendo la anterior expresión en las expresiones previas:

$$(\sigma_z^*)_i = -mJ_o(m\rho) \{ [A_i - C_i(1 - 2\nu_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i + D_i(1 - 2\nu_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \}$$

$$(\sigma_r^*)_i = \left[mJ_o(m\rho) - \frac{J_1(m\rho)}{\rho} \right] \left\{ [A_i + C_i(1+m\lambda)]e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i(1-m\lambda)] \times e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \right\} \\ + 2v_i mJ_0(m\rho) \left[C_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \right]$$

$$(\sigma_t^*)_i = \frac{J_1(m\rho)}{\rho} \{ [A_i + C_i(1+m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i(1-m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} + 2v_i m J_0(m\rho) [C_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}]$$

$$(\tau_{rz}^*)_i = mJ_1(m\rho)\left\{ [A_i + C_i(2\nu_i + m\lambda)]e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - [B_i - D_i(2\nu_i - m\lambda)]e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \right\}$$

$$(\omega^*)_i = -\frac{1+v_1}{E_i} J_0(m\rho) \{ [A_i - C_i(2-4v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - [B_i + D_i(2-4v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \}$$

$$(u^*)_i = -\frac{1+v_i}{E_i} J_1(m\rho) \{ [A_i + C_i(1+m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i(1-m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \}$$

En la que $\sigma_z \sigma_z$ es la tensión vertical o dirección *z*, σ_r es la tensión en la radial o dirección *r*, σ_t es la tensión tangencial o en la dirección *t*, τ_{rz} es el cortante; ω es el desplazamiento en la vertical o en la dirección; *u* es el desplazamiento radial o en la dirección; y J_1 es la función de Bessel de primera especie y orden 1. El índice *i* indica la capa *i*. La * significa que las tensiones y desplazamientos no son los debidos a una carga uniforme *q* distribuida sobre un área circular de radio *a*, sino debido a una carga vertical igual a $-mJ_0(m\rho)$, como puede ser visto en alguna de las ecuaciones anteriores, cuando los términos dentro de los paréntesis son iguales a 1.

Para encontrar las tensiones y desplazamientos debidos a una carga q distribuida en un área circular de radio *a*, se utiliza el desarrollo de la transformada de Hankel. Si R^* es la tensión o el desplazamiento en las ecuaciones anteriores debido a una carga $-mJ_0(m\rho)$ y R es lo mismo debido a la carga q, considerando la tensión negativa y haciendo $\alpha = a/H\alpha = a/H$, se tiene que:

$$R = q\alpha \int_0^\infty \frac{R^*}{m} J_1(m\alpha) \, dm$$

El algoritmo definido para obtener las soluciones se basa en el siguiente esquema (Figura 24.).





Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo implementado