

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil

Estudio de la seguridad de estructuras de firmes  
propuesta por la Norma 6.1 y 6.2 -IC

Autor: Antonio Campos Vázquez

Tutor: Blas González González

**Dep. de Construcciones Arquitectónicas 1**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil

# **Estudio de la seguridad de estructuras de firmes propuesta por la Norma 6.1 y 6.2 -IC**

Autor:  
Antonio Campos Vázquez

Tutor:  
Blas González González

Dep. Construcciones Arquitectónicas 1  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado: Estudio de la seguridad de estructuras de firmes propuesta por la Norma 6.1 y 6.2 -IC

Autor: Antonio Campos Vázquez

Tutor: Blas González González

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*

*A mis compañeros, y en  
especial a Javier.*

*A Alfredín, por su  
ánimo y apoyo  
continuo.*



## RESUMEN

El título ‘Estudio de la seguridad de estructuras de firmes según la Norma 6.1 y 6.2 IC’, hace referencia a estas dos normas, pero finalmente sólo se han evaluado las secciones flexibles de la Norma 6.1 IC. ya que por Orden FOM/3460/2003, de 28 de Noviembre, por la que se aprueba la Norma 6.1 IC, Secciones de Firme, de la Instrucción de Carreteras (BOE de 12 de Diciembre de 2.003) , quedó derogada la Orden de 23 de mayo de 1989, en la que se aprobó la Instrucción 6.1 y 6.2 <<Secciones de Firme>> a la que este título hace referencia.

Durante la fase preliminar de la redacción del trabajo se detectó esta incorrección, pero no se modificó por estar ya registrado en la Plataforma de TFG de la ETSI. Las Normas de TFG no permiten la modificación del título y se ha optado por mantenerlo a fin de evitar una demora en el proceso administrativo del TFG.

El estudio pretende llevar a cabo la evaluación de la seguridad de las estructuras de firmes propuestas por la Norma 6.1 IC mediante la formulación de Factores de Seguridad cociente de dos magnitudes: Número de Ejes Acumulados Admisibles y el Número de Ejes Acumulados de Tráficos de Proyecto.

Para la definición del Número de Ejes Acumulados de Tráficos de Proyecto se propondrán unas hipótesis de cargas de tráfico particulares de este estudio.

Para el cálculo del Número de Ejes Admisibles de cada estructura elegida, primeramente se calcularán tensiones y deformaciones, en los modelos de estructuras seleccionadas de la Norma, mediante el empleo de distintos programas (WESLEA, DEPAV e ICAFIR). Los resultados obtenidos serán los nuevos inputs en la aplicación de unos modelos de deterioro, obteniéndose el Número de Ejes Acumulados que será capaz de soportar la estructura.

Se llevará a cabo un análisis de los resultados obtenidos y se expondrán las conclusiones del estudio.

El último apartado propone ‘nuevas líneas de trabajo’ que se han concebido durante la elaboración de este estudio.



INDICE	
Contenido	
RESUMEN	9
INDICE	11
ÍNDICE DE TABLAS	15
INDICE DE ILUSTRACIONES	17
1. OBJETO DEL TRABAJO FIN DE GRADO	21
2. OBJETIVO DEL ESTUDIO	23
3. METODOLOGÍA A DESARROLLAR	25
3.1. FASES	25
3.2. BIBLIOGRAFÍA	25
4. RESEÑA DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS	27
4.1. Modelos de respuesta. Ecuaciones tenso-deformacionales	27
4.1.1. Reseña histórica	27
4.1.2. Macizo semi-infinito. Modelo de Boussinesq	27
4.1.3. Estructura Multicapa	29
4.2. Modelos de deterioro. Criterios de fallo	30
4.2.1. Número de ejes equivalentes	31
4.2.2. Fatiga de materiales	32
4.3. Propuesta para TFG	36
5. ESTUDIO DE LAS APLICACIONES INFORMÁTICAS A EMPLEAR	39
5.1. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE	39
5.2. WESLEA	40
5.2.1. Antecedentes	40
5.2.2. Manejo del programa	41
5.3. DEPAV	44
5.3.1. Antecedentes	44
5.3.2. Manejo del programa	44
5.4. ICAFIR 2006	46
5.4.1. Antecedentes	46
5.4.2. Manejo del programa	46
6. ESTUDIO DE LAS VARIABLES A UTILIZAR	49
6.1. DEFINICIÓN DE CARGA TIPO DE NEUMÁTICO. HUELLA (Fase 3a)	49
6.1.1. Generalidades sobre la Carga Tipo	49
6.1.2. Propuesta para el TFG	50
6.2. DEFINICIÓN DEL TRÁFICO DE PROYECTO (Fase 3b)	53
6.2.1. Análisis de las Normativas	54
6.2.2. Propuesta para el TFG	55

6.3. MODELIZACIÓN DEL CIMIENTO (Fase 3c)	59
6.3.1. Tipo de Explanada	59
6.3.2. Propuesta para el TFG	64
6.4. Estudio de las limitaciones de comparar estructuras de cimiento de la Norma 6.1 IC con las de la Instrucción Andaluza (Fase 3.d).	67
6.5. MODELIZACIÓN DE LOS MATERIALES DEL FIRME (Fase 3.e)	69
6.5.1. Análisis de las Normativas y Métodos	69
6.5.2. Propuesta de materiales del firme para el TFG	77
7. SECCIONES DE ESTUDIO (Fase 4)	79
7.1. Secciones de firme elegida	79
7.2. Estructuras completas	79
8. ANÁLISIS DE SECCIONES DE LA NORMA 6.1 IC. (Fase 5)	81
8.1. Análisis Tipo 1 (Fase 5.1)	83
8.1.1. Categoría de Tráfico T31	83
8.1.2. Categoría de Tráfico T32	86
8.1.3. Categoría de Tráfico T41	89
8.1.4. Categoría de Tráfico T42	92
8.2. Estudio de la homogenización de variables para los Análisis Tipo 2 y 3. (Fase 5.2)	95
8.3. Análisis Tipo 2 (Fase 5.3)	99
8.3.1. Categoría del Tráfico T31	100
8.3.2. Categoría de Tráfico T32	101
8.3.3. Categoría de Tráfico T41	102
8.3.4. Categoría de Tráfico T42	103
8.4. Análisis Tipo 3 (Fase 5.4)	105
Categoría de Tráfico T31	105
Categoría de Tráfico T32	106
Categoría de Tráfico T41	107
Categoría de Tráfico T42	108
9. CONCLUSIONES (Fase 6)	109
Resumen	109
Nuevas líneas de trabajo	110
ANEJOS	111
ANEJO I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEJO II. ORDEN FOM/3460/2003, de 28 de Noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1 IC <<Secciones del firme>>, de la Instrucción de Carreteras.	115
ANEJO III. MODELOS ANALÍTICOS DE LA MECÁNICA DE FIRMES	117
Modelo de Burmister	117
ANEJO IV. TRÁFICO DE PROYECTO	119

IV.1 Número Acumulado de Ejes Equivalentes	119
IV.2 Evolución del Tráfico de Proyecto	120
ANEJO V. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS	125
ANEJO VI. SECCIONES DE ESTRUCTURAS DE FIRMES	127
IV.1) Secciones de la Norma 6.1 IC	127
IV.2) Secciones de estudio	129
ANEJO VII. RESULTADOS WESLEA ANÁLISIS TIPO 1	131
ANEJO VIII. RESULTADOS DEPAV ANÁLISIS TIPO 1	147
ANEJO IX. RESULTADOS ICAFIR. ANÁLISIS TIPO 2	161
ANEJO X. RESULTADOS WESLEA ANÁLISIS TIPO 3	171
ANEJO XI. RESULTADOS DEPAV ANÁLISIS TIPO 3	185



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Leyes de fatiga dadas por la Norma 6.1 IC para materiales del Firme (Tabla 5) .....	37
Tabla 2 Tabla resumen de la actualización de los Métodos Analíticos.....	39
Tabla 3 Categorías del Tráfico dada por la Norma 6.1 IC .....	54
Tabla 4 Categorías del Tráfico dadas por la Tabla 3.1 de la Instrucción Andaluza .....	54
Tabla 5 Valores del Coeficiente de equivalencia para el cálculo del TP de ICAFIR .....	55
Tabla 6 Tabla-resumen con los valores de N acumulado de vehículos equivalentes para una solución con base granular, CE=0.6 .....	56
Tabla 7 Distribución temporal del Número de Ejes Acumulados de Proyecto para Categoría de Tráfico T32 .....	57
Tabla 8 Categorías de explanada dados por la norma 6.1 IC.....	59
Tabla 9 Resumen de tipos de suelo dados por la Norma 6.1 IC .....	60
Tabla 10 Tipos de materiales para cimiento dado por ICAFIR.....	61
Tabla 11 Categoría del cimiento en función de las Categorías del Tráfico según ICAFIR.....	62
Tabla 12 Caracterización del cimiento del Firme dado por la Instrucción (Tabla 5.15).....	62
Tabla 13 Valores de los módulos de elasticidad para suelos de alta capacidad soporte y materiales granulares según ICAFIR.....	63
Tabla 14 Valores de los parámetros elásticos dados por ICAFIR para suelos tratados con ligantes hidráulicos .....	63
Tabla 15 Propiedades mecánicas de la explanada a analizar .....	65
Tabla 16 Tipos y especificaciones del suelo estabilizado in situ. Tabla 512.4 del PG3 .....	66
Tabla 17 Modelización de los materiales de cimiento de propuesta en el TFG .....	66
Tabla 18 Parámetros elásticos para la explanada.....	67
Tabla 19 Valores mínimos del módulo de compresibilidad de zahorras según el PG3 (Dirección General de Carreteras, 2015).....	69
Tabla 20 Valores del coeficiente de paso entre módulos elásticos por tongadas dados por ICAFIR..	70
Tabla 21 Valores de los parámetros elásticos para materiales granulares tratados con ligantes hidráulicos .....	71
Tabla 22 Ecuaciones de fatiga para metriales tratados con cemento dado por ICAFIR.....	72
Tabla 23 Valores de parámetros elásticos para materiales estabizados con ligantes hidráulicos.....	72
Tabla 24 Parámetros para la determinación de las leyes de fatiga en materiales .....	73
Tabla 25 Valores de los parámetros elásticos dados por ICAFIR para los distintos tipos de Mezclas Bituminosas .....	74
Tabla 26 Coeficientes de variación de los parámetros elásticos en función de la época climática según Instrucción andaluza .....	74
Tabla 27 Ecuaciones de fatiga para mezclas bituminosas dada por la Instrucción andaluza .....	75
Tabla 28 Espesores dados por la Norma 6.1 IC para Mezclas Bituminosas (Tabla 6) (Fomento., 2003) .....	77
Tabla 29 Resultados Análisis Tipo 1 para 3131 .....	83
Tabla 30 Resultados Análisis Tipo 1 para 3121 .....	84

Tabla 31 Resultados Análisis Tipo 1 para 3111 .....	84
Tabla 32 Resultados Análisis Tipo 1 para 3231 .....	86
Tabla 33 Resultados Análisis Tipo 1 para 3221 .....	86
Tabla 34 Resultados Análisis Tipo 1 para 3211 .....	87
Tabla 35 Resultados Análisis Tipo 1 para 4131 .....	89
Tabla 36 Resultados Análisis Tipo 1 para 4121 .....	89
Tabla 37 Resultados Análisis Tipo 1 para 4111 .....	90
Tabla 38 Resultados Análisis Tipo 1 para 4231 .....	92
Tabla 39 Resultados Análisis Tipo 1 para 4221 .....	92
Tabla 40 Resultados Análisis Tipo 1 para 4211 .....	93
Tabla 41 Resumen de los Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T31 .....	100
Tabla 42 Resumen de los Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T32 .....	101
Tabla 43 Resumen de Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T41 .....	102
Tabla 44 Resumen de los Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T42 .....	103
Tabla 45 Resumen de Factores de Seguridad para los Análisis Tipo 2 y 3 para T31 .....	105
Tabla 46 Resumen de Factores de Seguridad para los Análisis 2 y 3 para T32 .....	106
Tabla 47 Resumen de los Factores de Seguridad para los Análisis Tipo 2 y 3 para T41 .....	107
Tabla 48 Resumen de los Factores de Seguridad para los Análisis Tipo 2 y 3 para T42 .....	108
Tabla 49 Parámetros dados para la relación entre el módulo elástico y el CBR. ....	125
Tabla 50 Parámetros para el cálculo de fatiga en suelos .....	125

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Propuestas de secciones dadas por la Norma 6.1 IC (Figura 2.1) .....	23
Ilustración 2 Difusión del esfuerzo en el macizo semi-indefinido de Boussinesq .....	28
Ilustración 3 Modelo Multicapa.....	29
Ilustración 4 Modelización para un sistema tricapa .....	30
Ilustración 5 Esfuerzos de flexión en Mecánica de Firmes.....	31
Ilustración 6 Esquema de capas con ejemplos de leyes de fatiga .....	32
Ilustración 7 Diferentes ensayos para materiales ligados hidráulicamente (Reyes Lizcaino, 2003)...	36
Ilustración 8 Interfaz del programa WESLEA .....	41
Ilustración 9 Módulo Input de Estructura de Capas en WESLEA .....	42
Ilustración 10 Configuración de carga en WESLEA .....	43
Ilustración 11 Cuadro 'Puntos de Localización' dados por WESLEA .....	43
Ilustración 12 Hoja de resultados dada por WESLEA.....	44
Ilustración 13 Presentación programa DEPAV .....	45
Ilustración 14 Interfaz de usuario del programa DEPAV .....	45
Ilustración 15 Hoja de resultados DENPAV .....	46
Ilustración 16 Nuevo proyecto en ICAFIR. Opción de Pavimento Bituminoso y Pavimento de Hormigón .....	47
Ilustración 17 Interfaz del programa ICAFIR.....	47
Ilustración 18 Diferentes tipo de rueda. De izquierda a derecha. 1, Rueda Gemela Estándar o Dual Tire. 2, Rueda gemela pequeña. 3, Super super single tire. 4 Rueda simple o super single Tire .....	49
Ilustración 19 Opciones de modelos de carga tipo .....	50
Ilustración 20 Carga tipo dada por ICAFIR 2006 .....	51
Ilustración 21 Ejemplo de cálculo de Ejes Equivalentes de eje simple de 8.2 tn dados por Pavement Engineering (El-Korchi, 2009) .....	53
Ilustración 22 Evolución de los Tráficos de T32 bajo distintas hipótesis de carga .....	57
Ilustración 23 Figura 1 de la Norma 6.1 IC.....	60
Ilustración 24 Definición del Cimiento para el TFG. ....	64
Ilustración 25 Secciones de Catálogo de Firme de la Figura 2.2 de la Norma 6.1 IC que se emplearán para el análisis .....	79
Ilustración 26 Estructuras del firme flexible a analizar de la Norma 6.1 IC para Tráfico elevado (Figura 2.1) .....	79
Ilustración 27 Estructuras del firme a analizar de la Norma 6.1 IC para Tráfico Bajo (Figura 2.2) ...	80
Ilustración 28 Leyes de fatiga por hundimiento de la superficie de explanada .....	126



## NOTACIÓN

$a$	Radio de la carga de la huella circular o semieje en la dirección $x$ de la carga de la huella elíptica
$d$	Separación entre centros de rueda de semieje
$h$	Espesor de la capa
$h_i$	Espesor de la capa $n$
$n$	Número de Capas / Años de vida útil del firme
$q$	Presión de la carga
$w$	Desplazamiento vertical
$w_0$	Deflexión de la superficie
$w_s$	Desplazamiento del suelo
$x,y,z$	Cordenadas cartesianas de un punto
$E$	Módulo de Young de la capa
$E_i$	Módulo de Young de la capa $i$
$E_s$	Módulo de Young de un macizo semiinfinito
$N_{\text{diseño}}$	Número de Ejes Acumulados de Proyecto
$N_{\text{adm}}$	Número de ciclos admisibles
$P$	Peso total de la carga
$T$	Temperatura
$\epsilon_T$	Deformación de tracción en la capa bituminosa
$\bar{\epsilon}_T$	Deformación de tracción admisible en la capa bituminosa
$\epsilon_z$	Deformación vertical del cimiento
$\bar{\epsilon}_z$	Deformación vertical admisible del cimi
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_r$	Esfuerzo radial de tracción
$\sigma_x$	Esfuerzo de tracción según $x$
$\sigma_y$	Esfuerzo de tracción según $y$
$\sigma_z$	Esfuerzo vertical
$\bar{\sigma}_z$	Esfuerzo vertical admisible
$\tau$	cizallamiento



## 1. OBJETO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El título ‘Estudio de la seguridad de estructuras de firmes según la Norma 6.1 y 6.2 IC’ hace referencia a estas dos normas, pero finalmente sólo se han evaluado las secciones de firmes flexibles de la Norma 6.1 IC. ya que por Orden FOM/3460/2003, de 28 de Noviembre, por la que se aprueba la Norma 6.1 IC, Secciones de Firme, de la Instrucción de Carreteras (BOE de 12 de Diciembre de 2.003) , quedó derogada la Orden de 23 de mayo de 1989, en la que se aprobó la Instrucción 6.1 y 6.2 <<Secciones de Firme>> a la que este título hace referencia.

Durante la fase preliminar de la redacción del trabajo se detectó esta incorrección, pero no se modificó por estar ya registrado en la Plataforma de TFG de la ETSI. Este registro, se hizo con carácter de urgencia en Agosto de 2.016 por tener previamente el alumno un proyecto asignado de otro Departamento y que era necesario anular. Dado que ha sido adjudicado por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1 según el formulario emitido por la Plataforma de TFG de la ETSI, y las Normas de TFG no permite la modificación del título se ha optado por mantenerlo a fin de evitar una demora en el proceso administrativo del TFG.

Este trabajo requerimiento del programa del Grado de Ingeniería Civil de la Universidad de Sevilla impartido en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, computa como 12 ECTS dentro del formato de 240 ECTS de los estudios oficiales y se lleva a cabo al final del periodo académico, en el segundo semestre del cuarto curso (8º semestre) para demostrar la capacidad del alumno para afrontar un proyecto completo de su autoría.

La elección de este proyecto se debe a la intención de combinar los conocimientos adquiridos en las dos Especialidades del Grado cursadas (48 ECTS cada una), Transportes y Servicios Urbanos, donde se profundiza en las infraestructuras de transporte, especialmente Carreteras y Ferrocarril, y la de Construcciones Civiles, más enfocada a la Ingeniería de Estructuras y Cimentaciones.

Este trabajo tiene un doble objetivo, el principal que es el de profundizar sobre la rama del conocimiento de la Mecánica de Firmes, y una secundaria que es la de estar en condiciones de afrontar un problema ingenieril, sobre dimensionamiento de firmes en las carreteras.



## 2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

En España se viene diseñando carreteras desde hace más de dos décadas mediante el empleo de normativa nacional, que, basadas en métodos empíricos realizados a lo largo de los años por distintas instituciones (Ministerio de Fomento, CEDEX...etc.), introduce un manual para el diseño de estructuras de firme de uso pleno en la profesión. En el Anejo I se recoge la Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, en la que se aprueba la norma 6.1 IC <<Secciones de Firme>> donde se recoge todo el catálogo de secciones de firme (tanto firmes flexibles y semirrígidos como firmes rígidos) que permite la Instrucción de Carreteras en España.

Un resumen de esta norma llevaría a considerar que la elección de la estructura de firme se basaría en escoger a partir de unas tablas de doble entrada (véase Ilustración 1 y ANEJO IV.1) Secciones de la Norma 6.1 IC) alguna de las secciones propuestas que cumplan con los requisitos de nuestro proyecto.

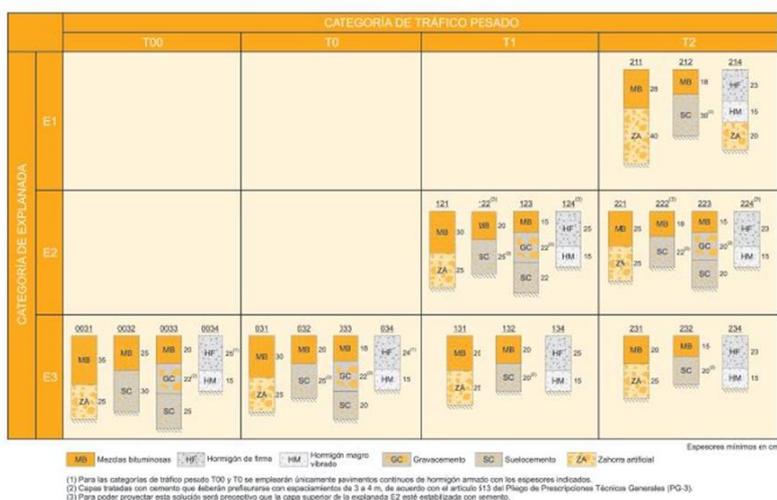


FIGURA 2.1. CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME PARA LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2, EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE EXPLANADA

Ilustración 1 Propuestas de secciones dadas por la Norma 6.1 IC (Figura 2.1)

Dejar claro en este punto del estudio que, aunque la norma establece secciones de firme de tipo flexibles, semirrígido y rígido, sólo se han analizado las propuestas de tipo flexibles, por ser éstas las soluciones tradicionales en el diseño de carreteras y para las que los modelos y aplicaciones informáticas empleadas en este estudio tienen una respuesta adecuada. Las soluciones de firmes semirrígidos y rígidos, al emplear materiales con ligantes hidráulicos (suelocemento y gravacemento los semirrígidos y hormigones los rígidos) presentan particularidades respecto al cálculo, y por ello se ha decidido apartarlos del estudio.

En el diseño racional de firmes, los métodos analíticos permiten, a partir de las ecuaciones de teorías multicapa, la obtención del estado tenso-deformacional de espesores de capas del firme para unos determinados materiales y para una serie de solicitaciones de carga.

Por otro lado, existe un análisis temporal en cuanto a la vida del firme que implementan modelos de deterioro, con leyes de fatiga de los materiales cuyo output es un periodo de vida útil traducido en un Número de Ejes Acumulados ( $NE_{adm}$ ) que la estructura es capaz de soportar.

Las computadoras permiten llevar a cabo toda la capacidad de cálculo necesaria para que estos modelos se vayan implantando progresivamente.

Nuestro objetivo en este trabajo es:

1. Determinar para secciones flexibles propuestas por el Catálogo de la Norma 6.1 IC la carga máxima que puede soportar en Número de Ejes de 13 tn. ( $NE_{adm}$ )

2. Determinar el coeficiente de seguridad como relación entre el Número de Ejes Equivalentes Admisibles por la Estructura y el Número de Ejes Acumulados de Proyecto.

### 3. METODOLOGÍA A DESARROLLAR

#### 3.1. FASES

##### 1. Reseña de los métodos analíticos.

Exposición de la formulación de los métodos analíticos y propuesta de los criterios de fallo a emplear en este estudio.

##### 2. Estudio de las aplicaciones informáticas a emplear.

En base al Trabajo Fin de Grado ‘Estudio comparado de los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes y su evolución’, realizado en 2.015 por Javier Villanueva Mena-Bernal, se llevará a cabo una búsqueda de las aplicaciones informáticas y de sus manuales. El resultado de esta búsqueda tiene que ser el de encontrar programas de uso libre que permitan su empleo en este proyecto.

##### 3. Analizar las variables de estudio siguientes en cada programa:

3.a. Cómo se modeliza la carga de neumático tipo. Huella.

3.b. Cómo se modeliza el Tráfico de proyecto y vida de proyecto. Fijar el periodo de vida útil y crecimiento del tráfico (crecimiento constante y variable).

3.c. Cómo se modeliza el cimiento.

3.d. Estudiar las limitaciones de comparar estructuras de cimiento entre la Norma 6.1 IC y la Instrucción Andaluza, y su repercusión sobre la modelización de la explanada para cada uno de los análisis (Análisis Tipo 1, 2 y 3).

3.e. Cómo se modeliza el firme.

4. Fijar las secciones a estudiar basándonos en la Norma 6.1 IC. Para cada categoría de tráfico se escogerán las soluciones de firmes de la Norma y se fijará una única estructura de explanada (cimiento) de las posibles por simplificación del estudio.

5. Análisis de las estructuras, sometiénolas a un rango de carga (límite superior e inferior de tráfico de ejes equivalentes de 13 tn. para la vida útil de proyecto), tal y como establece la norma y se obtendrán el Número de Ejes Acumulados Admisibles por cada sección analizada (y su consecuente Factor de Seguridad) para los siguientes análisis:

5.1. Análisis Tipo 1. Cálculo tenso-deformacional mediante los programas WESLEA y DEPAV modelando la estructura como un multicapa completo y empleando los criterios de deterioro dados por la Norma 6.1 IC.

5.2. Estudio de la homogenización de variables para los Análisis Tipo 2 y 3.

5.3. Análisis Tipo 2. Cálculo tenso-deformacional mediante programa ICAFIR modelando la estructura con las limitaciones que impone la Instrucción Andaluza y empleando los criterios de deterioro dados por la Instrucción Andaluza.

5.4. Análisis Tipo 3. Cálculo tenso-deformacional mediante programa WESLEA y DEPAV modelando la estructura como en el Análisis Tipo 2, empleando los criterios de fallo dados por la Instrucción Andaluza y comparando los resultado con los del Análisis 2.

##### 6. Conclusiones del TFG.

#### 3.2. BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía consultada ha sido especificada en el ANEJO I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. Ha sido de especial utilidad el trabajo de recopilación de manuales y normativas por parte de J. Villanueva.

Principalmente se han seguidos dos fuentes, el libro titulado ‘Diseño Racional de Pavimentos’ del profesor F. A Reyes Vizcaino , que presenta enfoque general sobre el diseño analítico de pavimentos

y presenta una amplia caracterización de materiales tanto de parámetros elásticos como de leyes de fatiga . El segundo ha sido de bibliografía norteamericana titulado 'Pavement Engineering' de R. B. Mallick y T. El-Korchi, que es una libro de carácter general sobre Mecánica y Diseño de Firmes y del que se han obtenido los conocimientos sobre teoría del diseño de pavimentos.

## 4. RESEÑA DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS

En la Mecánica de Firmes existen dos grandes métodos para el dimensionamiento estructural que son los Métodos Empíricos, basados en modelos experimentales que han ido desarrollando distintos organismos dedicados a esta investigación (CEDEX español, SETRA francés, TRB británico, AASHTO norteamericano...etc.), y por otro lado los Métodos Analíticos, que, sobre esta base experimental, han ido desarrollando soluciones estructurales a partir de modelos matemáticos.

Estos modelos matemáticos tienen dos campos de estudio, por un lado, los **modelos de respuesta**, en tanto que simula qué respuesta tenso-deformacional instantánea ofrecerá una determinada estructura, y por otro lado los **modelos de deterioro**, los cuales tratan de prever cómo se comportará el material a fatiga con el transcurso del tiempo.

Los distintos modelos de respuesta que se han ido formulando con el tiempo han establecido las ecuaciones necesarias para conocer los estados de tensiones y deformaciones sobre las distintas capas del firme, lo que se expondrá en el apartado 4.1. Modelos de respuesta. Ecuaciones tenso-deformacionales.

En el apartado 4.2 Modelos de deterioro. Criterios de fallo, se hará un análisis sobre los modelos de deterioro y su forma de aplicación.

### 4.1. Modelos de respuesta. Ecuaciones tenso-deformacionales

#### 4.1.1. Reseña histórica

Los primeros modelos que se tienen son heredados de la Ingeniería Geotécnica y es la teoría dada por Boussinesq (1.885) para un sólido semiinfinito, homogéneo, isótropo y elástico lineal bajo un determinado valor de carga.

Durante todo el siglo XX se han ido publicando teorías para el diseño de firmes como la de Westergaard (1.926) para pavimentos de hormigón supuestos éstos como una placa elástica sobre un líquido denso o un lecho de resortes. Hogg (1.938) aplicó la losa elástica al semiespacio de Boussinesq. Es Burmister (1.943) quien revoluciona el dimensionamiento define un sistema multicapa tratado bajo una carga circular sobre un macizo semiinfinito de Boussinesq.

A partir de este momento se empiezan a proponer teorías de diseño y gracias a la revolución computacional de la informática, se empiezan a desarrollar aplicaciones informáticas que realizan los cálculos oportunos para que estos métodos empiecen a cobrar relevancia.

#### 4.1.2. Macizo semi-infinito. Modelo de Boussinesq

La cuestión de cómo se repartían las tensiones sobre un sólido semiinfinito ya la abordó Boussinesq a partir de un primer modelo de difusión con la profundidad del esfuerzo vertical  $\sigma_z$  (Ilustración 2, (Reyes Lizcaino, 2003), pg. 150). El modelo presenta hipótesis de elasticidad del macizo (definiendo E y  $\nu$ ), homogeneidad e isotropía.

*Formulación en tensiones:*

- Esfuerzo vertical.

$$\sigma_z = q_0 \left[ 1 - \frac{\left(\frac{z}{a}\right)^3}{\left(1 + \left(\frac{z^2}{a^2}\right)\right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

- Esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left( (1 + 2\nu) - \frac{2(1 + \nu)z}{[a^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} + \frac{z^3}{[a^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \right)$$

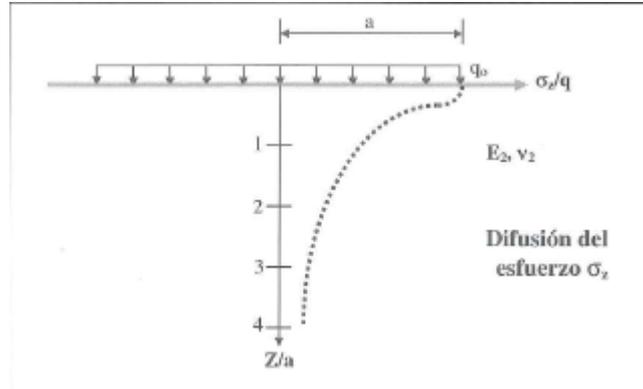


Ilustración 2 Difusión del esfuerzo en el macizo semi-indefinido de Boussinesq

La formulación siguiente se ha obtenido de la Referencia bibliográfica 5 del ANEJO I (Reyes Lizcaino, 2003).

*Formulación en deformaciones:*

*Modelo de Boussinesq con rueda simple*

La rueda sobre el macizo semiinfinito se esquematiza mediante una presión uniforme  $q$ , aplicada sobre un área circular de radio  $a$ .

El macizo semiinfinito se supone elástico, lineal, homogéneo e isótropo con módulo de Young  $E$  y de coeficiente de Poisson  $\nu$ .

- Los desplazamientos dentro del macizo a todo punto del eje de la carga a una profundidad  $z$  están dados por:

$$w = \frac{q}{E} \left( 2(1 - \nu^2)(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} - \frac{(1 + \nu)z^2}{[a^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} + (\nu + 2\nu^2 - 1)z \right)$$

- La deflexión en el macizo semiinfinito ( $z=0$ ) se define como

$$w_0 = 2 \frac{q}{E} a(1 - \nu^2)$$

*Modelo de Boussinesq para ejes gemelos*

La carga sobre el macizo semiinfinito se esquematiza para un eje gemelo de 130 kN.

El macizo semiinfinito se supone homogéneo, lineal, isotrópico, elástico y de módulo de Young  $E_s$  y coeficiente de Poisson  $\nu=0.25$ .

La deflexión en el centro del eje gemelo (130 kN) sobre macizo semi-indefinido elásticos, lineal, homogéneo e isótropo, con módulo de Poisson 0.25 y bajo carga de rueda ( $q=0.662$  MPa ;  $a=12.5$  cm y  $d=37.5$  cm) es:

$$w_c = \frac{11.800}{E}$$

donde  $w_c$  está en  $10^{-2}$  mm y  $E$  está en MPa.

### 4.1.3. Estructura Multicapa

Los modelos de n capas representan más fielmente la esquematización de las estructuras del firme. Una estructura habitual de firme se puede modelar mediante un esquema tricapa (suelo, base granular y pavimento asfáltico, Ilustración 3, obtenida del libro de (Reyes Lizcaino, 2003), pg. 161).

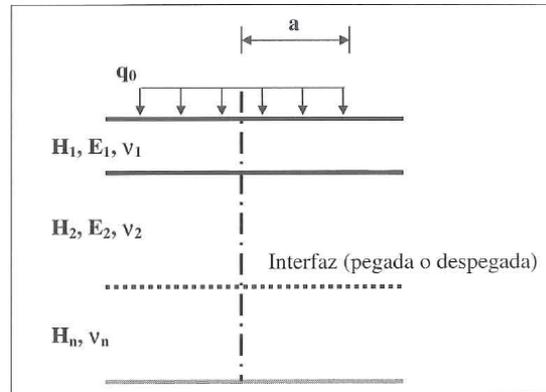


Ilustración 3 Modelo Multicapa

#### 4.1.3.1. Modelo de Burmister

En Diseño de Firmes, principalmente Flexibles y Semirrígidos, el modelo multicapa de Burmister es ampliamente utilizado. Se trata de un modelo de respuesta multicapa elástico lineal sobre un macizo semi-indefinido de Boussinesq. Las capas del firme se modelarían como capas horizontales, de espesor constante e indefinidas en su plano. Cada capa estará caracterizada por su módulo de deformación E y el coeficiente de Poisson  $\nu$ . El apoyo entre capas serán total o parcial. No se considerará el peso propio del material y las fuerzas de inercia y los efectos térmicos son despreciables.

#### Soluciones para sistemas de 3 capas

En este caso concreto, se resuelven las ecuaciones dadas por Burmister con un sistema en coordenadas cilíndricas  $(r, \theta, z)$  con origen en el centro del área cargada  $(q, a)$ .

Primeramente, se obtendrán los esfuerzos en las interfases 1 y 2 (véase Ilustración 4, obtenida de la Referencia Bibliográfica 7 de los apuntes de pavimentos del profesor Luis Vasquez (Universidad Nacional de Colombia).

- Interfase 1. Cálculo de deformaciones en la fibra inferior de las capas asfálticas. ( $\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_z + \sigma_r)]$ )
- Interfase 2.
  - En caso de firmes semirrígidos, análisis en la fibra inferior de las capas base para materiales tratados con ligantes hidráulicos  $[\sigma_r]$ .
  - Cálculo de deformación permanente en la parte superior de la subrasante ( $\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_r)]$ )

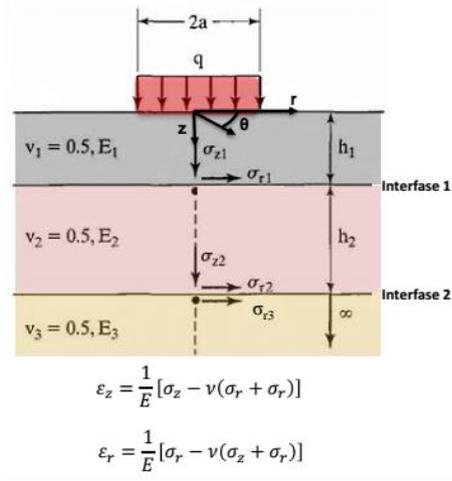


Ilustración 4 Modelización para un sistema tricapa

#### 4.1.3.2. Modelo de Odemark

Las soluciones gráficas y tabulares como las anteriores están limitadas hasta tres capas. Para un mayor número de capas, se pueden ‘unir’ materiales mediante la conversión de sus espesores a un valor equivalente de un material de referencia con igual rigidez a flexión.

El método de Odemark o de las Capas de Espesores Equivalentes (MET, por sus siglas en inglés), consiste en transformar un sistema definido por varias capas con sus módulos en un sistema equivalente donde todas las capas tengan el mismo módulo, y en el que las ecuaciones de Boussinesq puedan utilizarse.

Teniendo una expresión de la rigidez de la capa es del tipo:

$$Rigidez = \frac{IE}{(1 - \nu^2)}$$

Para que la rigidez se mantenga constante, la expresión se mantiene constante, con lo que se puede decir que:

$$\frac{h_{eq}^3 E_2}{(1 - \nu_2^2)} = \frac{h_1^3 E_1}{(1 - \nu_1^2)}$$

Donde despejando  $h_{eq}$  obtenemos el espesor equivalente. Nótese que es un método aproximado, y que se usa un factor de corrección para obtener una mejor aproximación de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad. En muchos casos, el módulo de Poisson suele considerarse igual para todos los materiales. Entonces al despejar el espesor equivalente tenemos:

$$h_e = f h_1 \left[ \frac{E_1}{E_2} \right]^{1/3}$$

$$\nu_1 = \nu_2$$

donde f es el coeficiente de corrección que depende del espesor de la capa, el ratio entre módulos, los módulos de Poisson y el número de capas de la estructura. Normalmente f toma valores de 0.9 para sistemas bicapa, 0.8 para multicapa, excepto para la primera interfaz, que es igual a 1.

## 4.2. Modelos de deterioro. Criterios de fallo

En el Diseño de Firmes se aceptan principalmente dos tipologías de fallo durante la vida útil de la carretera, el fallo en servicio y el fallo estructural. El fallo en servicio se deja ver cuando el pavimento no se encuentra en las condiciones adecuadas de comodidad y seguridad. Puede ser por motivos de

desgaste de la superficie del pavimento, por el esfuerzo rasante en zonas de frenada (donde pueden aparecer ondulaciones)...etc. Por otro lado, el fallo estructural se produce por un desgaste sucesivo en la cohesión de los materiales que conforman el firme.

Como es conocido en la Mecánica de Firmes, todas las capas superficiales se verán sometidas a flexión (Ilustración 5) ante el paso de una carga experimentando esfuerzos de compresión en superficie, y esfuerzos de tracción al fondo de la capa.

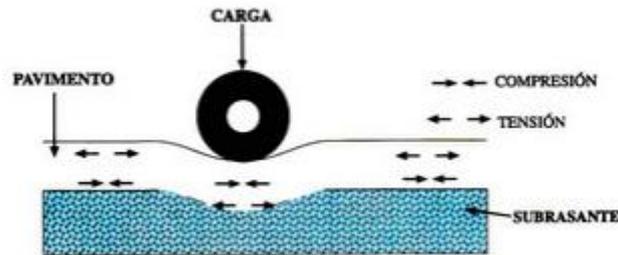


Ilustración 5 Esfuerzos de flexión en Mecánica de Firmes

Se produce el fallo estructural en el firme a raíz de someter éste a las repeticiones de carga impuestas por el tráfico, apareciendo grietas en la superficie del firme (piel de cocodrilo) o por deflexiones que pudieran aparecer en la zona de rodada de los vehículos (denominado 'rutting' en inglés). Se trata de fallos por fatiga, ya que el material va perdiendo su capacidad estructural con el paso del tiempo. Para prever cuánto aguantará el material con que se va a formar el firme, se pueden ensayar los materiales en laboratorio o in situ, para poder observar la respuesta del material ante ciclos de repeticiones de carga. De esta manera se podrá observar, cómo trabajando dentro del rango elástico, los materiales pueden fallar a lo largo del tiempo y formular sus leyes de fatiga.

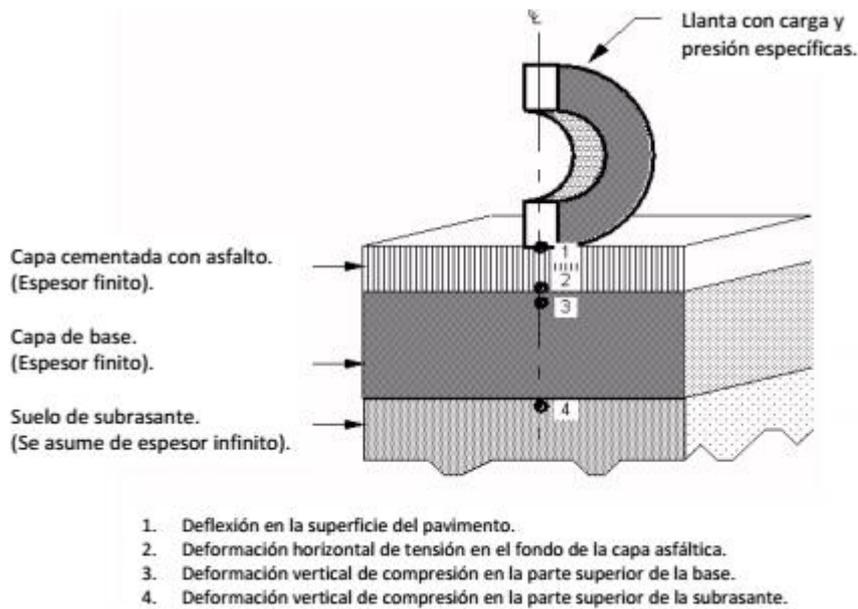
Estas leyes de fatiga vendrán dadas como una relación entre el número de ejes equivalentes acumulados (repeticiones de carga) y una variable dada en deformaciones en el caso de mezclas bituminosas y materiales granulares (que componen las estructuras de firmes flexibles).

Como se puede apreciar, este modelo no contempla el análisis plástico de los materiales antes de la rotura, si no que emplea la Teoría de la Elasticidad junto con un Criterio de Fatiga (siempre bajo rango elástico) para obtener la carga de tráfico (Nadm) que es capaz de soportar el material.

#### 4.2.1. Número de ejes equivalentes

Como se indicó anteriormente, las leyes de fatiga darán como resultado un número de ejes equivalentes, Nadm, que es capaz de soportar el material para una determinada carga de rueda tipo, (definiendo q, a y d) y obtenida estas leyes a partir de resultados experimentales en laboratorio y en base a la experiencia acumulada.

Es decir, la carga de rueda tipo genera sobre la estructura de firmes un estado tenso-deformacional bajo régimen elástico. La repetición de esta carga de manera pulsante, es lo que provoca que el material falle, modelizándose este fallo mediante unas leyes de fatiga, obteniéndose el número de ejes equivalentes admisible (Ilustración 6) o carga de tráfico que es capaz de soportar la estructura.



Ubicación	Respuesta	Razón de su empleo	Ejemplos (Asphalt Institute)
(1) Superficie del pavimento	Deflexión ( $u_z$ )	Empleada para imponer restricciones de carga durante el descongelamiento de primavera y en el diseño de sobrecapas.	$N_{admissible} = \left( \frac{25.64 \text{ mm}}{U_z} \right)^{4.196}$
(2) Fondo de la capa de mezcla asfáltica en caliente	Deformación horizontal de tracción ( $\epsilon_x$ ó $\epsilon_y$ )	Empleada para predecir la falla por fatiga en la mezcla asfáltica en caliente	$N_f = 0.414 \times \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.291} \times \left( \frac{1}{E_{HMA}(kPa)} \right)^{0.854}$
(3) Parte superior de una capa intermedia (base o subbase)	Deformación vertical de compresión ( $\epsilon_z$ )	Empleada para predecir la falla por ahuecamiento en la base o la subbase	$N_d = 1.365 \times 10^{-9} \times \left( \frac{1}{\epsilon_z} \right)^{4.477}$
(4) Parte superior de la subrasante	Deformación vertical de compresión ( $\epsilon_z$ )	Empleada para predecir la falla por ahuecamiento en la subrasante	$N_d = 1.365 \times 10^{-9} \times \left( \frac{1}{\epsilon_z} \right)^{4.477}$

Ilustración 6 Esquema de capas con ejemplos de leyes de fatiga

Con carácter general, se establecen los siguientes tipos de fallo para las estructuras de firme:

- Firmes Flexibles puede fallar de dos maneras:
  - Que la deformación horizontal por tracción  $\epsilon_t$  en la fibra inferior de las capas asfálticas, sometidas a flexotracción por las cargas de tráfico, supere cierto límite admisible, que pudiera provocar el agrietamiento del material.
  - Que la deformación vertical  $\epsilon_z$  por compresión de la explanada supere el límite admitido por ella, caso en el cual se presenta una deformación permanente y por consiguiente la del firme en su conjunto, en este caso se producirá hundimiento. Además, se podrá verificar que  $\sigma_z$  se mantenga dentro de los límites admisibles.
- En Firmes Semirrígidos además se puede producir el fallo por:
  - Esfuerzos de tracción  $\sigma_t$  en el seno de los materiales ligados con cemento, que puedan provocar la ruptura por agrietamiento de este tipo de materiales.

#### 4.2.2. Fatiga de materiales

##### 4.2.2.1. Mezclas Bituminosas

Los ensayos de fatiga se realizan en tracción por flexión sobre probetas trapezoidales empotradas en la base, repitiendo un nivel de esfuerzo o de deformación hasta la ruptura.

Los ensayos de fatiga se efectúan generalmente a deformación  $\epsilon$  constante. La curva de fatiga es lineal en escala logarítmica.  $\log(\epsilon)$  es función lineal del logaritmo del número de ciclos.

$$\varepsilon = AN^{-b}; \frac{1}{b} \text{pendiente de la curva} \approx 5 \text{ para mezclas bituminosas}$$

*A = deformación  $\varepsilon_0$  que se produce al millón de repeticiones del ensayo de fatiga a deformación constante*

Además, al tratarse de materiales viscoelásticos, sus propiedades mecánicas pueden variar en función de la temperatura. Para poder considerar este efecto sobre la vida del pavimento son de amplia aceptación las leyes de Miner sobre acumulación de daño que se exponen a continuación traducido del libro '*Pavement Engineering*' (El-Korchi, 2009):

## Leyes de Miner

El daño se define como el deterioro del pavimento debido a la acción del tráfico sobre distintas condiciones climáticas. Este daño no ocurre todo al mismo tiempo, pero sí progresivamente -o de forma más precisa, en incrementos- con el paso de cada vehículo o, expresado temporalmente, cada día durante su servicio. Considerese que el daño cada día no es siempre el mismo -puede ser mayor por ejemplo en días dónde la carga de tráfico pesado ha sido mayor o días más calurosos que hayan afectado a las capas asfálticas. Es por ello, que un acercamiento a esta realidad es la de considerar y medir el daño en cada uno de los incrementos considerando el tráfico más relevante (vehículos pesados) y las propiedades de las capas del firme (respetando las distintas condiciones climáticas), para ese incremento de tiempo (un periodo estival, por ejemplo).

El daño en cada incremento de tiempo puede formularse como:

$$D = \frac{n_i}{N_i}$$

donde  $n_i$  se calcula a partir del número de aplicaciones de carga y  $N_i$  es el número total de aplicaciones de carga que soporta la estructura para unas determinadas características mecánicas. Por lo que  $N_i$ , es diferente para los distintos periodos de tiempo.

El daño total en cualquier punto de la estructura vendrá dado por el sumatorio de todos los incrementos de daño a lo largo de todo el periodo de vida del firme, tal y como se indica a continuación (conocida como la hipótesis de Miner, 1945):

$$\text{Total Damage} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^o \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}}$$

Donde  $i, j$  y  $k$  son diferentes condiciones sobre el que el análisis de daño se lleva a cabo. Dichas condiciones pueden venir dadas a partir de distintos incrementos de tiempo (verano-invierno), tipos de tráfico (tráficos estivales-invernales). La idea básica de esta hipótesis es que para todos y cada uno de los incrementos de tiempo (esto es, para un único tipo de material junto con un tipo de condiciones climáticas). A mayor cantidad de condiciones consideradas en el cálculo de incrementos de tiempo, más preciso será el cálculo del daño sobre la estructura.

El daño total a lo largo del tiempo se puede relacionar a través de los esfuerzos, y los esfuerzos pueden ser expresados a partir de una expresión en el tiempo. Para un determinado tipo de esfuerzo, el daño total (referido a veces como daño acumulado) alcanza el valor unidad, se dice que se produce el fallo del pavimento (por ejemplo, por fisuración).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^o \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}} = 1 \text{ (Agotamiento del material)}$$

Desafortunadamente, los resultados experimentales arrojan que esta ley acumulativa no es del todo exacta. En el trabajo original de Miner, por ejemplo, el valor de acumulación de daño encontrado experimentalmente varía entre 0.61 y 1.45.

Esto puede deberse al orden de magnitud de la carga y a su momento de aplicación. Es por ello que si se empieza por aplicar niveles de esfuerzos más elevados, la duración de vida total es en general más débil que si se aplica antes los niveles de esfuerzo más bajos.

$$\text{Si } \sigma_1 > \sigma_2, \text{ la ruptura por fatiga se produce } \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} < 1$$

$$\text{Si } \sigma_1 < \sigma_2, \text{ la ruptura por fatiga se produce } \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} > 1$$

#### 4.2.2.2. Suelos

Independientemente de los ensayos de laboratorio, diferentes autores han buscado establecer el límite denominado deformación elástica  $\varepsilon_z$  (o esfuerzo vertical admisible) para un suelo, en calzadas de tipo flexibles.

Con la ayuda de modelos matemáticos y de diversos resultados de ensayos, se ha encontrado que la ecuación límite es de la forma:

$$\log \varepsilon_z = A - B \log N \quad \text{ó} \quad \varepsilon_z = AN^{-B} \quad [1]$$

Introducimos el valor del parámetro  $K = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{limite}}}$ , donde  $\sigma_1 - \sigma_3$  representa el esfuerzo desviador efectivo aplicado durante el triaxial y  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{limite}}$  el valor que conduce a la ruptura en la primera carga

Si se respeta la aplicación del esfuerzo desviador  $\sigma_1 - \sigma_3$  hasta la obtención de la deformación plástica  $\varepsilon_p$  fija (y que se relaciona con el hundimiento), se encuentra un número de ciclos  $N$  tales que:

$$\log K = A - B \log N$$

Sustituyendo  $K$  por  $\varepsilon_z$ , se tiene:

$$\log \sigma_1 - \sigma_3 = a + \log(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{limite}} - b \log N$$

Teniendo que  $\varepsilon_z = \frac{\sigma_1 - 2\nu_2\sigma_3}{E_2}$  en el caso de una carga circular,  $E_2$  y  $\nu_2$  designan el módulo, y el coeficiente de Poisson del suelo.

El esfuerzo  $\sigma_3$  es bajo comparado con  $\sigma_1$  y  $(\sigma_1 - \sigma_3) \approx E_2 \varepsilon_z$ , lo que permite escribir:

$$\log \varepsilon_z = a - \log E_2 + \log(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{limite}} - b \log N$$

Para un suelo dado  $[a - \log E_2 + \log(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{limite}}]$  es una constante, que llamaremos  $A$ , por lo cual se tiene:

$$\log \varepsilon_z = A - B \log N \quad \text{ó} \quad \varepsilon_z = AN^{-B}$$

Formulación obtenida de la Referencia Bibliográfica 5. (Reyes Lizcaino, 2003).

#### 4.2.2.3. Materiales tratados con ligantes hidráulicos

Los ensayos de fatiga sobre materiales tratados con ligantes hidráulicos tipo suelocemetno y gravacmento se efectúan en ensayos de flexión sobre probetas con forma prismática trapezoidal (Ilustración 7, obtenida de (Reyes Lizcaino, 2003)), repitiendo en cada una de ellas la aplicación de un nivel de esfuerzo preestablecido, hasta una ruptura de las probetas.

Se deduce la curva de fatiga que correlaciona el esfuerzo  $\sigma$  con el número de ciclos a la ruptura  $N$ . Para los materiales tratados con ligantes hidráulicos, la curva de fatiga se presenta muy definida.

Para una recta en coordenadas semilogarítmicas, es decir,  $\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - a \log N$ ,  $\sigma_0$  es igual a la resistencia al ensayo a flexión  $R_F$  porque es la ruptura al primer ciclo de carga. El valor de  $a$  está entre 1/12 y 1/15 para la mayor parte de los materiales tratados con ligantes hidráulicos, lo que significa que:

$$\frac{\sigma}{R_F} = 1 - 0.065 \log 1$$

$$\frac{\sigma}{R_F} = 0.35$$

$$\sigma = 0.35 R_F \sim R_T$$

siendo  $R_T$  la resistencia a tracción directa del material

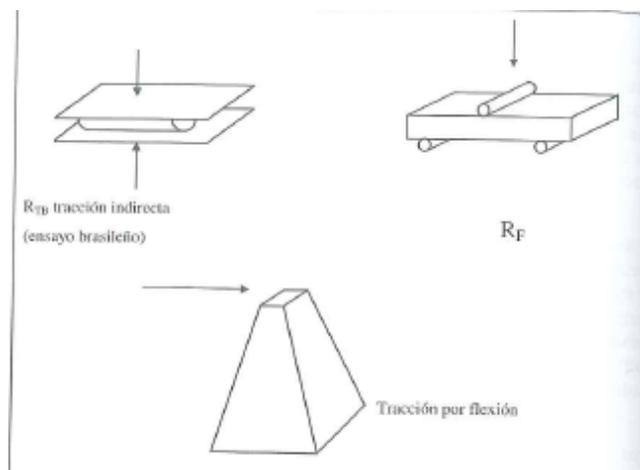


Ilustración 7 Diferentes ensayos para materiales ligados hidráulicamente (Reyes Lizcaino, 2003)

Formulación obtenida de la Referencia Bibliográfica 5. (Reyes Lizcaino, 2003).

#### 4.3. Propuesta para TFG

La formulación de los algoritmos para el cálculo de tensiones y deformaciones empleados en cada programa nos son desconocidos en este estudio. Con motivo de esta incertidumbre, toman sentido los Análisis Tipo 2 y 3 (Fases 5.2 y 5.3), en los cuáles se trata de homogeneizar todas las variables de estudio (Capítulo 6) para los programas ICAFIR, WESLEA y DEPAV para poder comparar sus resultados, y al menos, vislumbrar las similitudes o diferencias respecto al cálculo que presentan dichos programas.

Respecto a los criterios de fallo se emplearán las leyes de fatiga dadas en la Tabla 5 (Tabla 1) de la Norma 6.1 IC, que se darán en detalle en el capítulo 6.4. Se contemplarán las leyes de fatiga tanto para material de mezcla bituminosa como para el material granular (zahorra), sin embargo se extenderá este último criterio de fallo para los materiales que forman la explanada (materiales tipo suelo), al igual que establece la Instrucción Andaluza.

En cambio, para los Análisis Tipo 2 y 3 (Fases 5.2 y 5.3) se mantendrán los criterios de fallo dados por la Instrucción Andaluza por ser los que lleva incorporados la aplicación ICAFIR, y que se han extendido en aplicación a los resultados dados por WESLEA y DEPAV.

TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE FIRME

MATERIAL	COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA	LEY DE FATIGA	PRESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS
Mezclas bituminosas en caliente (D, S y G)	1	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	– Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas discontinuas en caliente (M y F)	1	–	– Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas drenantes (PA)	1	–	– Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas abiertas en frío (AF)	1 (*)	–	– Sólo se podrán emplear para T4 (T41 y T42). En capa de rodadura se recomienda sellar con un tratamiento superficial.
Mezclas bituminosas de alto módulo (MAM)	1,25	$\epsilon_r = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	– Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.3.
Pavimento de hormigón	–	–	– Ver apartado 6.2.3.
Materiales tratados con cemento	–	Gravacemento	– Espesor mínimo: 20 cm. – Espesor máximo: • 25 cm para gravacemento. • 30 cm para suelocemento. – Ver apartado 6.2.2.
		Suelocemento	
Gravaemulsión	0,75	Ley específica	– Espesor de capa: • Para T00 a T1: No admisible. • Para T2 a T4: 6 a 12 cm.
Gravaescoria	Material equivalente a la gravacemento, a la que podrá sustituir en algún tipo de soluciones.		– Espesor mínimo: 15 cm. – Espesor máximo: 30 cm.
Zahorra artificial	0,25	$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	– Espesor mínimo: 20 cm (15 cm en arcenes y en secciones 3221 y 4211). – Espesor máximo: 30 cm.
Macadam	Material equivalente a la zahorra artificial, que se aplicará en algún tipo de soluciones.		– Espesor mínimo: 20 cm (15 cm en arcenes). – Espesor máximo: 30 cm.

N: número de ejes equivalentes de 128 kN (13 t).  
 $\epsilon_r$ : deformación unitaria ( $\epsilon_r$  = radial de tracción, y  $\epsilon_z$  = vertical de compresión).

$\sigma_r$ : tensión de tracción en MPa.

$R_f$ : resistencia a flexotracción del material en MPa.

(\*) Coeficiente aplicable exclusivamente en la categoría de tráfico pesado T42.

Tabla 1 Leyes de fatiga dadas por la Norma 6.1 IC para materiales del Firme (Tabla 5)



## 5. ESTUDIO DE LAS APLICACIONES INFORMÁTICAS A EMPLEAR

En este apartado se llevará a cabo una descripción de los programas que se han ido analizando y los problemas observados en cuanto a su utilización.

Se partirá del estado del arte de los modelos analíticos de la Mecánica de Firmes a partir del Trabajo Fin de Grado titulado ‘Estudio comparado de los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes y su evolución’ de la autoría del alumno de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla (Universidad de Sevilla), Javier Villanueva Mena-Bernal (Referencia bibliográfica 4 del ANEJO I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS).

### 5.1. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE

En el TFG citado, se localizarán 31 métodos analíticos (Tabla 2). Partiendo de este trabajo y ampliando la búsqueda (Método DEPAV y Método KENPAV), definiremos las aplicaciones informáticas encontradas de uso libre durante el desarrollo del proyecto, su modo de aplicación y sus problemas y/o potencialidades encontradas.

Respecto a la selección de búsqueda de los programas mencionados en el proyecto especificado anteriormente, podemos resumir en que éstos han presentado problemas bien de links de descarga no encontrados (APAS 3.0, Chevron), de naturaleza de obtención de licencia (Alize III), o de tipo informático por ser programas desarrollados bajo sistemas operativos antiguos y obsoletos que los sistemas operativos actuales no son capaces de ejecutar (Bisar 3.0).

NOMBRE	ACTUALIZACIÓN	MODELO	TIPO DE FIRME	TIPO DE PROGRAMA	AÑO VERSIÓN ORIGINAL	AÑO ÚLTIMA VERSIÓN	PRODUCTOR	PAÍS	GUÍA	USO ACTUAL	DISTRIBUCIÓN
ALIZE	ALIZE 1.4	MULTICAPA	AMBOS	II	-	2.011	LCPC y SETRA	FRANCIA	✓	✓	PAGO
APAS	APAS 3.0	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	-	2.004	FINRA y NESTE	FINLANDIA	INTERNA	✓	-
AXIDIN	-	E. FINITOS	AMBOS	I	-	-	LNEC	PORTUGAL	-	✓	-
BISAR SPDM	BISAR 3.0	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	1.978	1.995	SHELL	HOLANDA	INTERNA	✓	PAGO
CAPA 3-D	-	E. FINITOS	AMBOS	II	1.992	-	TU-DELFT	HOLANDA	-	✓	-
CHEVRON	-	MULTICAPA	FLEXIBLE	-	1.963	-	CHEVRON	EEUU	✓	X	-
CIRCLY	CIRCLY 6.0	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	1.977	2.015	MINCAD	AUSTRALIA	ONLINE	✓	PAGO
DAMA	-	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	1.979	-	UNIV. MARYLAND	EEUU	-	X	-
ECOROUTE	-	MULTICAPA	-	I	-	-	ENPC	FRANCIA	-	-	-
ELSYM 5	-	MULTICAPA	FLEXIBLE	I	1.986	-	UNIV. CALIFORNIA y FHWA	EEUU	INTERNA	✓	LIBRE
EVERFE	EVERFE 2.24	E. FINITOS	RÍGIDO	I	-	2.008	WDOT	EEUU	✓	✓	LIBRE
FEACONS-IV	-	E. FINITOS	RÍGIDO	I	1.995	-	UNIV. FLORIDA	EEUU	-	✓	-
ICAFIR	ICAFIR 1.1	MULTICAPA	AMBOS	II	1.999	2.006	DGC-JUNTA ANDALUCÍA	ESPAÑA	✓	✓	LIBRE
ILLI-SLAB	ISLAB 2000	E. FINITOS	RÍGIDO	II	1.977	1.994	UNIV. ILLINOIS	EEUU	-	✓	-
JSLAB	NYSLAB	E. FINITOS	RÍGIDO	II	1.983	2.009	UNIV. EL PASO	EEUU	✓	✓	-
KENLAYER	KENPAVE-KENLAYER	MULTICAPA	FLEXIBLE	I	1.993	2.003	UNIV. KENTUCKY	EEUU	✓	✓	LIBRE
KENSLABS	KENPAVE-KENSLABS	E. FINITOS	RÍGIDO	I	1.993	2.003	UNIV. KENTUCKY	EEUU	✓	✓	LIBRE
MEPDG	MEPDG 1.3	MULTICAPA	AMBOS	III	1.993	2.011	AASHTO y NCHRP	EEUU	✓	✓	PAGO
MICHPAVE	MFPDS	E. FINITOS	FLEXIBLE	I	1.989	2.001	UNIV. MICHIGAN	EEUU	ONLINE	✓	LIBRE
MMOPP	-	MULTICAPA	AMBOS	II	1.976	2.013	DTU	DINAMARCA	✓	✓	LIBRE
NOAH	-	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	1.995	-	NYNAS	BELGICA	-	-	-
RISC	-	E. FINITOS	RÍGIDO	II	1.982	-	FHWA	EEUU	-	-	-
ROADENT	MnPAVE 6.304	MULTICAPA	AMBOS	II	-	2.014	MnDOT	EEUU	✓	✓	LIBRE
SW-1	SW-1 1.0.5	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	-	2.005	ASPHALT INSTITUTE	EEUU	✓	✓	PAGO
VÁGDM 95	-	MULTICAPA	FLEXIBLE	III	1.995	-	VTI	SUECIA	✓	✓	LIBRE
VEROAD	-	MULTICAPA	FLEXIBLE	I	1.996	-	DWW - RIJKWATERSTAAT	HOLANDA	✓	✓	-
VESYS-3H	VESYS 5	MULTICAPA	FLEXIBLE	II	1.974	2.002	FHWA	EEUU	-	✓	-
WESLAYER	-	E. FINITOS	RÍGIDO	II	1.981	-	WES-USACE	EEUU	✓	X	-
WESLEA	WESLEA 3.0	MULTICAPA	FLEXIBLE	II	1.989	1.999	WES-USACE y UNIV. DE MINNESOTA	EEUU	-	✓	LIBRE
WESLIQID	-	E. FINITOS	RÍGIDO	II	1.981	-	WES-USACE	EEUU	✓	X	-

Tabla 2 Tabla resumen de la actualización de los Métodos Analíticos.

Cortesía del TFG ‘Estudio comparado de los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes y su evolución’, J. Villanueva.

En el caso del conocido programa de cálculo ALIZE III, del LPCP (Laboratoire Central de Ponts e Chaussées) se ha encontrado una versión DEMO para familiarizarse con su entorno, pero en la cual la pestaña de cálculos aparece desactivada por no obtener licencia. La versión educativa tiene un valor de 2.100 € en la página oficial (<http://www.itech-soft.com/alize/index.php?id=14&lang=en>).

MnPAVE-Flexible (anteriormente ROADENT), de la Minnesota Roads Administration, es descargable y ejecutable, pero se ha desestimado su uso por su marcado carácter local, y que aparte ofrece exclusivamente resultados sobre la vida del firme y el número de ciclos para el fallo, sin poder seguir el método de cálculo aunque en el manual de usuario se indica que utiliza el modelo elástico de 5 capas dado por la aplicación WESLEA.

El KENPAVE que integra los programas KENLAYER para Firmes Flexibles y KENSLABS para Firmes Rígidos, es compatible con las versiones de Windows (32 y 64 bits) pero su interfaz es poco amigable y se ha desestimado su uso por su complejidad de utilización. Igualmente se ha querido mencionar al tratarse de una aplicación informática desarrollada por Y. H. Yuangen su libro 'Pavement Analysis and Design' (Referencia 7 en el ANEJO I).

El KENPAV es un programa colombiano encontrado durante el desarrollo del proyecto, creado por los ingenieros César González y Diana Vega, con la dirección del Ingeniero Fredy Alberto Reyes Vizcaino, autor del libro 'Diseño Racional de Pavimentos' (Referencia Bibliográfica 5 del ANEJO I), el cual se sirve de manual para el uso del programa. El libro presenta un CD-ROM con el módulo de instalación del programa.

Debido a la experiencia adquirida del autor en el Laboratorio Central de Ponts et Chaussées (LCPC), la aplicación informática presenta importantes similitudes con el ALIZE III.

El programa está elaborado para diseñar pavimentos, optimizando una capa de la estructura escogida de acuerdo con parámetros definidos por el usuario. Una vez finalizado el proceso, presenta la opción de calcular una rehabilitación a la estructura diseñada.

El contenido del libro 'Diseño Racional de Pavimentos' es extenso y proporciona mucha información sobre modelización del tráfico, materiales a emplear, ecuaciones de comportamiento y criterios de fallo, lo que supone un manual muy útil para el empleo del programa. De igual manera, está pensado para introducir datos de ensayos a fatiga obtenidos de laboratorio.

Por otra parte, presenta desventajas de tipo informático, ya que son programas que no han sido actualizados y emplean dominios de uso de tipo Windows 98 y computadoras de 32 bits, con lo que las máquinas más modernas se ven bloqueadas por programas desarrollados en sistemas operativos ya obsoletos. Se ha empleado un sistema operativo Windows XP y el funcionamiento ha sido correcto, por lo que se ha podido ver cómo era la interfaz de usuario, pero desafortunadamente a la hora de calcular los modelos de las estructuras de firmes a estudiar, presenta un límite de un tráfico mínimo diario de 250.000 ejes pesados.

En este estudio se van a utilizar las herramientas informáticas siguientes:

- (i) WESLEA, programa americano de cálculo tenso-deformacional con métodos analíticos.
- (ii) DEPAV, programa desarrollado por la U. de Cauca y basado en el ALIZE III.
- (iii) ICAFIR, el programa de métodos analíticos dado por la Instrucción Andaluza.

## 5.2. WESLEA

### 5.2.1. Antecedentes

*Waterways Experiment Station Layered Element Analysis* o WESLEA es un programa de cálculo multicapa convencional desarrollado en 1989 para MS-DOS, y actualizado en 1999 para una versión en Windows con lo que se modificó el nombre a WESLEA 3.0 (o WFW, WESLEA For Windows). Programa desarrollado por D. Timm et al, profesores de la Universidad de Minnesota, a partir del

algoritmo original de F. Van Cauwelaert, autor del libro ‘Pavement Design and Evaluation. The required mathematics and its application’, que trata las herramientas matemáticas para el diseño de pavimentos.

WESLEA presenta un modelo de respuesta multicapa, elástico lineal e isótropo para el análisis de firmes flexibles para un máximo de 5 capas. La última capa se trata de un espacio semi-infinito. Las capas se definen por el espesor, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el grado de conexión entre ellas, desde conexión total hasta deslizamiento. Lo más habitual es considerar conexión total entre capas, utilizando el deslizamiento para casos muy concretos.

El programa obtiene tensiones normales y tangenciales, y deformaciones y desplazamientos normales en hasta 50 puntos de evaluación en la estructura. Hasta 20 cargas circulares pueden ser definidas en distintas configuraciones de ejes.

El programa también presenta un modelo de deterioro para estimar la cantidad de daño acumulado, por la hipótesis de Miner. Se obtiene como resultado una estimación de la vida útil del firme.

### 5.2.2. Manejo del programa

La interfaz del programa es muy sencilla, con tres módulos bajo la pestaña ‘Input’ de diseño (Estructura, Cargas y Puntos de Evaluación).

Para comenzar, se decidirá sobre qué unidades de medida se va a trabajar (Units), pudiendo elegir entre Imperial e Internacional. Elegimos el segundo.



*Ilustración 8 Interfaz del programa WESLEA*

En el módulo de ‘Información de Estructura’, se definen las propiedades de los materiales y sus espesores. Se puede elegir el tipo de material (AC, Material Bituminoso; PCC, Portland Cement Concrete; GB, Granular Base; Rock, Roca o Soil, Suelo) con lo que el programa ofrece un rango de valores que no pueden ser sobrepasados ni inferior ni superiormente. Para superar esta limitación, existe la posibilidad de elegir ‘Otro’ material, en el que introducir los valores que se hayan obtenido de laboratorio o de una base de datos, en Megapascales. Los espesores se darán en centímetros y se podrá elegir en la interfaz de capa si será ligada (Full Adhesion, valor 1) o deslizante (Full Slip, valor 0). Aclarar que salvo en casos de estudios particulares, la opción más empleada es la de considerar contacto de fricción entre capas. (Véase Ilustración 9).

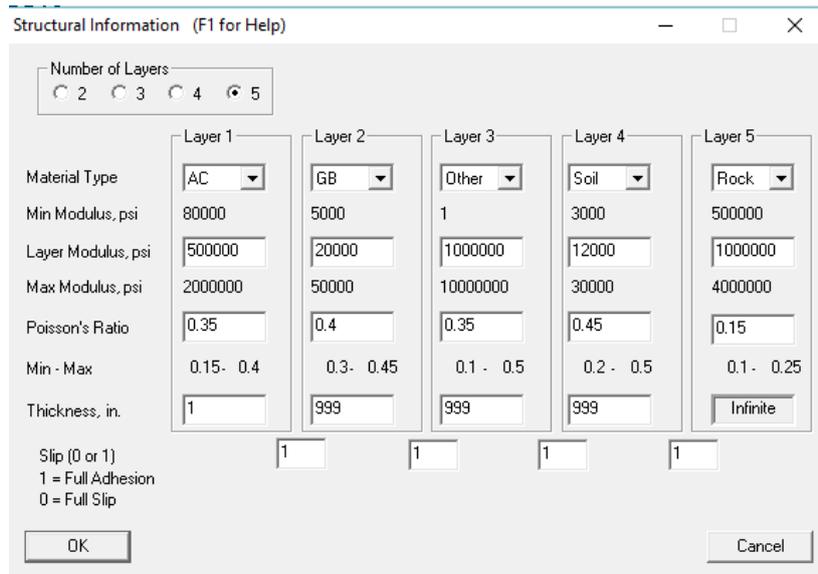


Ilustración 9 Módulo Input de Estructura de Capas en WESLEA

Ahora vendrá el módulo de 'Configuración de Cargas', en el cuál se ofrecen varias opciones. Se podrá introducir también el número de aplicaciones de carga (Número de ejes acumulados de proyecto), y la magnitud de carga (13tn.se dividen en 6.5 tn por extremo del eje, igual a 65 kN) con la presión de rueda (800 kPa) y determinar si es o no uniforme la distribución de fuerza sobre las ruedas. (Véase Ilustración 10).

Las cuatro cargas propuestas son:

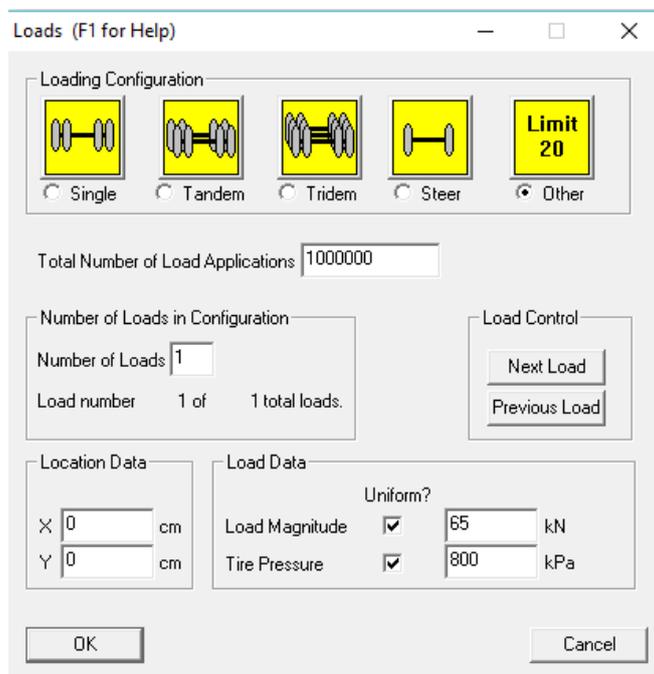
- Single. Eje tipo de rueda gemela. Las ruedas se encuentran distanciadas entre sí 34.29 cm. Dos puntos evaluación de tensiones y deformaciones, uno bajo rueda y otro en el centro de las dos ruedas (17.15 cm).
- Tándem. Tenemos cuatro puntos de localización de carga distribuidos en los ejes X, Y, coordenadas del plano de la carretera, X para la dirección del eje e Y en dirección al avance del vehículo. Tomando una de las ruedas como origen de coordenadas, los puntos de aplicación quedan referenciados en la siguiente tabla:

X [cm]	Y [cm]
0	0
34.29	0
34.29	137.16
0	137.16

- Eje Tridem. 6 puntos que son

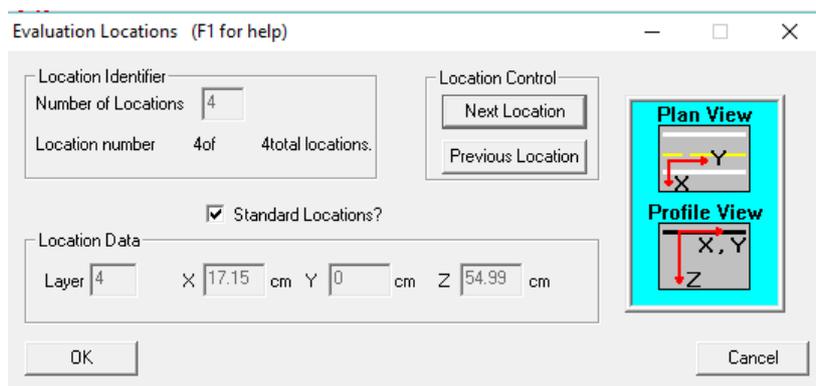
X [cm]	Y [cm]
0	0
34.29	0
34.29	137.16
0	137.16
0	274.32
34.29	274.32

- Steer. Eje simple de dos ruedas. Puntos de aplicación de carga ( $X=0;Y=0$ ).
- Other. En este apartado se podrá modelizar la carga de rueda tipo empleada en este estudio, dada más adelante en el apartado 6.1.



*Ilustración 10 Configuración de carga en WESLEA*

La siguiente pestaña será de los puntos de evaluación de tensiones y deformaciones (Evaluation Locations) y, aunque se analizará principalmente la fibra inferior de la mezcla bituminosa y la fibra superior de la subrasante, se pueden introducir tantos puntos como se desee. (Véase Ilustración 11).



*Ilustración 11 Cuadro 'Puntos de Localización' dados por WESLEA*

A pesar de ello, si se quieren obtener los resultados del número de ejes admisibles para la estructura según sus criterios de agrietamiento por tracción (Fatigue) y hundimiento por compresión (Rutting) se deberá mantener las variables estándar dadas por el programa tanto para la carga como para los puntos de localización. Éstas son para un eje de rueda gemela:

- Distancia entre ruedas gemelas ( $D=34.29$  cm). Inferior a la propuesta en el estudio ( $D=37.5$ ).
- Localizaciones Estándar. Bajo rueda en eje de rueda gemela (Coordenadas  $X=0;Y=0$ ) y Bajo

el centro de ruedas gemelas (Coordenadas  $X=17.15$  cm ;  $Y=0$ ). La coordenada Z se situaría automáticamente en la interfaz entre capas.

En la pestaña ‘Output View’ se tendrá la hoja de resultados que evaluará en cada punto escogido (x, y z) la Tensión Normal, Deformación Normal, Deflexión y Esfuerzo Cortante (YZ, XZ y XY) junto con un tanto por ciento de daño dado a partir del Número de Ejes Acumulados dado como input, y el Número de Ejes Equivalentes Admisibles (Allowed), junto con el tanto por ciento de daño siempre y cuando se hallan mantenido los valores predeterminados de carga y posición tal y como se comentó anteriormente (Véase Ilustración 12).



Ilustración 12 Hoja de resultados dada por WESLEA

### 5.3. DEPAV

#### 5.3.1. Antecedentes

El programa DEPAV para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en un sistema de capas lineal elástico. El programa DEPAV fue elaborado por la Universidad de Cauca para la investigación Nacional de Pavimentos de Colombia -INPACO- de 1994. Para utilizar DEPAV, se necesita el empleo de un emulador DOSBox del sistema operativo MSDOS ya que fue desarrollada en este sistema operativo.

Fue desarrollado como una adaptación del programa francés ALIZÉ III del Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LPCP). El programa DEPAV calcula los esfuerzos y las deformaciones máximas producidas en las interfaces de un sistema elástico multicapa por una rueda doble colocada en la superficie. El sistema elástico multicapa puede estar constituido entre dos a seis capas caracterizadas por el espesor, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

En el libro ‘Mecánica de Pavimentos’ de C. H. Higuera en el capítulo 15 se desarrolla un manual de cálculo mediante el programa DEPAV (Referencia bibliográfica 10 del ANEJO I).

#### 5.3.2. Manejo del programa

El programa DEPAV abriéndolo directamente con el emulador DOSBox permite manipular el programa directamente en ventana como si fuera una computadora con el sistema operativo MS-DOS. En la Ilustración 13 se visualiza la interfaz de usuario.

El programa DEPAU calcula los esfuerzos y las deformaciones máximas que una rueda doble colocada en la superficie produce en los niveles de interface de un Sistema Elástico Multicapa, constituido de Dos (2) a Seis (6) capas, caracterizadas por el Espesor, Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson.

Además calcula la Deflexión y el Radio de Curvatura al centro de la Rueda Doble.

Parámetros usados durante el programa :

Radio de Carga	[cm]	Módulo de Elasticidad (E)	[Kg/cm <sup>2</sup> ]
Presión de Contacto	[Kg/cm <sup>2</sup> ]	Relación de Poisson ( $\mu$ )	[ ]
Dist. entre Llantas	[cm]	Espesor de la Capa (H)	[cm]

Cualquier tecla continua...

Ilustración 13 Presentación programa DEPAV

Como vemos en la Ilustración 14 se pueden introducir manualmente los valores de los parámetros de diseño, definir las capas mediante módulo de elasticidad [kg, cm<sup>2</sup>], coeficiente de Poisson y espesor (h,cm), y si hay liga o no entre capas (adherencia) hasta un máximo de seis.

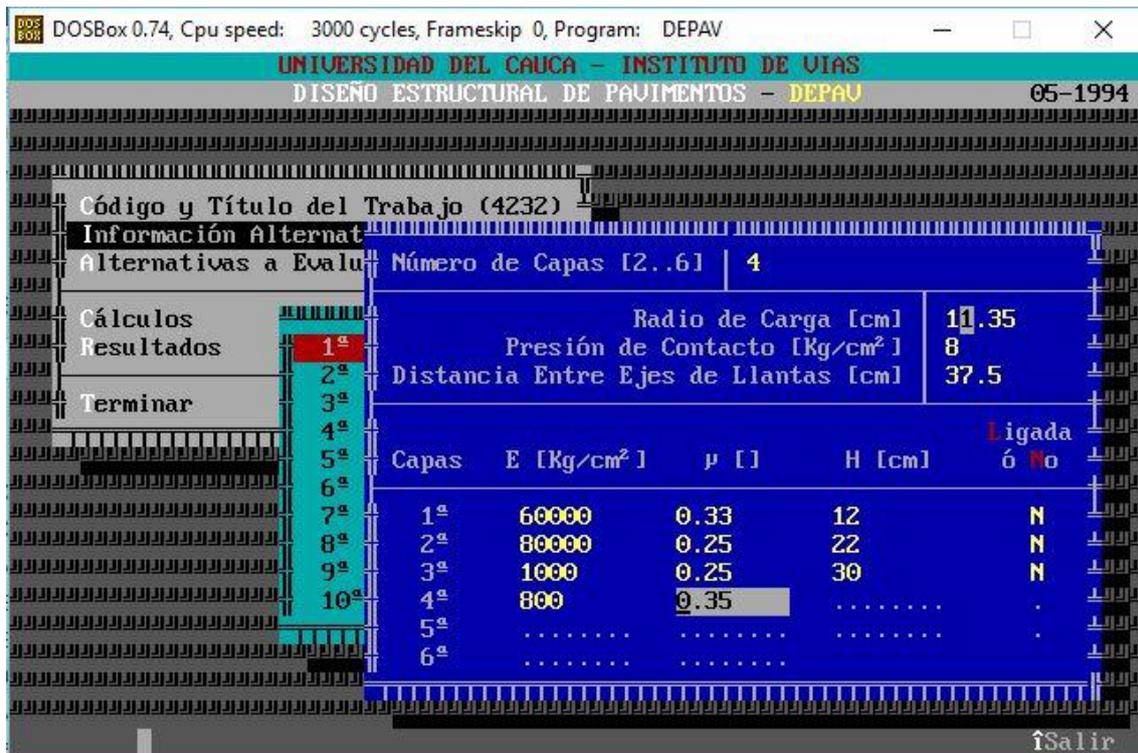


Ilustración 14 Interfaz de usuario del programa DEPAV

El procesamiento de cálculo es lento en comparación con las aplicaciones informáticas actuales, y la hoja de resultados devuelve, tal y como se comentó anteriormente, los valores de tensiones y deformaciones (normales y tangenciales) máximas especificando en qué puntos se encuentran, bajo rueda simple (A), bajo una de las ruedas gemelas (B) o en mitad de las ruedas gemelas (C). (Véase Ilustración 15)

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : D\_4232\_I  
Número de Capas : 4 Alternativa : 4

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	3.2900E-05 B	6.7810E+00 B	-3.2700E-08 C	8.0046E+00 A
	12.00	-4.0100E-08 C	-2.3963E-03 C	6.6900E-08 C	2.4371E-03 C
2ª	12.00	1.8100E-08 C	2.7328E-03 C	1.3300E-08 C	2.4371E-03 C
	34.00	-1.3100E-08 C	-1.3460E-03 C	1.0000E-08 C	1.2848E-04 C
3ª	34.00	1.1000E-08 C	1.8966E-04 C	3.3100E-09 C	1.2848E-04 C
	64.00	-1.1100E-08 C	-1.3868E-04 C	9.6500E-09 C	2.7328E-05 C

Deflexión = 0.020 mm/100  
Radio de Curvatura = 17.940 m

âAyuda      à Inform.ãPosic      êEstruc      èImprim      îSalir

Ilustración 15 Hoja de resultados DENPAV

## 5.4. ICAFIR 2006

### 5.4.1. Antecedentes

La herramienta computacional ICAFIR para el Diseño de Firmes por Métodos Analíticos desarrollada en 1.999 por la empresa <Grupo Trevenque Kaplan> para la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía ha sido el primer programa informático que se ha tenido de referencia para la confección del trabajo por ser la primera aplicación informática desarrollada en España basada en los métodos analíticos de carácter institucional y de uso libre.

Los criterios empleados se basan en la Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, guía descargable desde la página web de la Junta de Andalucía (en su última versión de 2007) y contiene el manual de usuario de la aplicación ([http://www.aopandalucia.es/inetfiles/publicaciones\\_agencia/Libros\\_y\\_folletos/2007\\_libro\\_ICAFIR/programa\\_ICAFIR\\_2006\\_manual\\_del\\_usuario.pdf](http://www.aopandalucia.es/inetfiles/publicaciones_agencia/Libros_y_folletos/2007_libro_ICAFIR/programa_ICAFIR_2006_manual_del_usuario.pdf)).

En el Anejo 6 de dicha Instrucción se presenta el modelo de respuesta en el que se basa la aplicación ICAFIR. Para éste, se usa el modelo de Burmister (ver ANEJO III), es decir, estructura multicapa de comportamiento elástico, lineal, homogéneo, isótropo y continuo, lo que permite conocer tensiones y deformaciones, en dos fases de cálculo, en las capas de firme y en la capa del cimiento.

### 5.4.2. Manejo del programa

Se inicia un nuevo proyecto, y aparece una ventana emergente en la cual se decide si el firme a proyectar será de tipo bituminoso (Firme Flexible) o de hormigón (Firme Rígido). (Véase Ilustración 16).

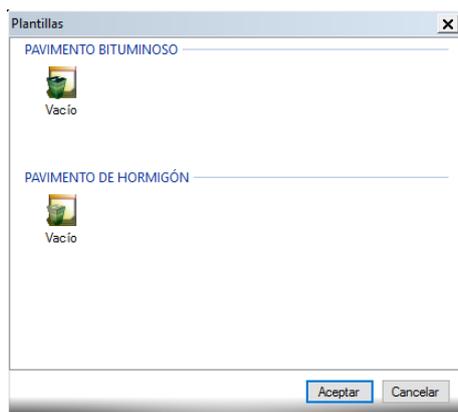


Ilustración 16 Nuevo proyecto en ICAFIR. Opción de Pavimento Bituminoso y Pavimento de Hormigón

Optando por una solución de tipo bituminoso, se guardará con un nombre, una referencia, un autor, fecha e itinerario (Véase Ilustración 17). Una vez caracterizado el proyecto se procede a dividir la carretera en tramos (Tramo 0, Tramo 1... etc) en función de las características de itinerario proyectado.

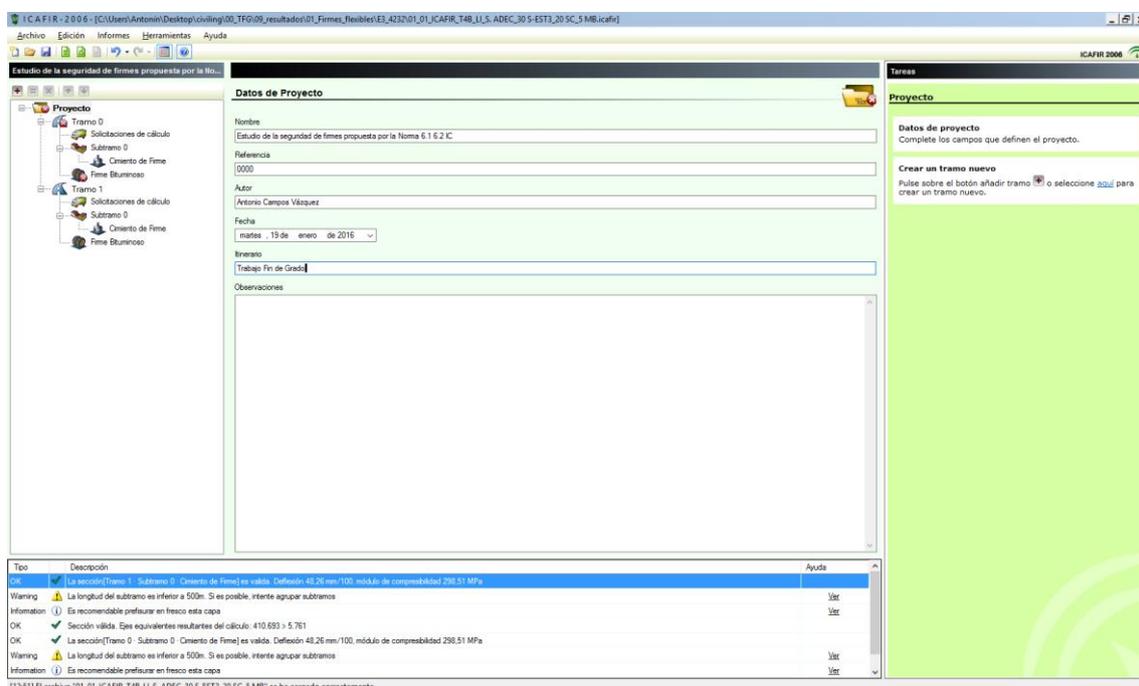


Ilustración 17 Interfaz del programa ICAFIR

El tramo está caracterizado por (i) unas Solicitaciones de Cálculo (Tráfico, Categoría del cimiento, Zona Térmica, Zona Pluviométrica y pestaña opcional de Tramo con pendiente superior al 5% en más de 1000 m) y por (ii) unos Subtramos.

En los Subtramos, acotados por un PK Inicial y PK Final, y estableciendo una de las configuraciones de sección transversal (Desmonte, Terraplén o construcción sobre firme existente) se procederá al diseño del Cimiento del Firme, a partir de establecer el Terreno Natural Subyacente (estableciendo tipo y su CBR) y la formación de explanada (material, espesores y en el caso de los suelos, su CBR).

Una vez establecida la explanada, se da un valor del módulo de compresibilidad a partir de los valores de deflexión  $d_0 [mm]/100$  medido a partir del plano de explanada, y se valida la sección siempre y cuando supere el valor límite de Módulo de Compresibilidad en el segundo ciclo de carga con placa establecido por la Instrucción Andaluza para la categoría del cimiento, sean éstas Baja (60 MPa), Media (100 MPa) o Alta (120 MPa).

En el siguiente y último paso, se diseñará el Firme Bituminoso a partir de definir materiales y espesores

de las distintas capas del firme. El programa proporcionará un coeficiente de seguridad, cociente del número de ejes equivalentes de proyecto y el número de ejes que es capaz de soportar la estructura en base a los modelo de deterioro que propone la Instrucción Andaluza.

Se podrá generar un ‘Informe de Proyecto’ con un sumario de todo lo descrito anteriormente, ‘Esquema de secciones’ con las capas que componen el firme y un ‘Informe de los resultados de cálculo’ en tensiones y deformaciones, exportable a Excel, en función de la profundidad y de la posición respecto de la carga (1, Bajo rueda simple. 2, Bajo una de las ruedas gemelas. 3, Bajo el centro de las ruedas gemelas).

## 6. ESTUDIO DE LAS VARIABLES A UTILIZAR

### 6.1. DEFINICIÓN DE CARGA TIPO DE NEUMÁTICO. HUELLA (Fase 3a)

#### 6.1.1. Generalidades sobre la Carga Tipo

El daño o efecto acumulado de la circulación de vehículos sobre un firme depende del número de aplicaciones de carga que reciba, el peso de los ejes y su separación, de las condiciones meteorológicas (lluvia, expansión térmica, etc.) y del terreno. También depende de la velocidad de circulación (del tiempo de permanencia de la carga sobre el mismo lugar).

Los pavimentos se proyectan para que resistan determinado número de cargas durante su vida útil. En España, la metodología de cálculo que contempla ejes equivalentes de 13 tn, mientras que en EEUU, se usa un eje equivalente de 8.2 tn (18 kip).

Profundizando más en estas consideraciones, el apoyo del eje equivalente sobre el pavimento vendrá dado por rueda simple o rueda doble (eje de ruedas gemelas). La rueda-gemela (Dual Tire, 1) es usada en todo el mundo. Normalmente este tipo de ruedas tienen una presión de llenado de cerca de 700 kPa. Aunque la rueda tractora normalmente tiene una sola llanta, ésta tiene las dimensiones de rueda gemela y puede alcanzar valores de entre 800 a 850 kPa (Super single Tire, 4). (véase Ilustración 18).

La rueda simple pero de mayor anchura está bajo estudio intentando sustituir a la rueda gemela, ya que tiene el mismo ancho pero menor superficie de caucho.

La rueda gemela de mayor tamaño no está muy implantada pero supone una menor superficie de carga sobre la plataforma por lo que aumentaría su capacidad.



Ilustración 18 Diferentes tipo de rueda. De izquierda a derecha. 1, Rueda Gemela Estándar o Dual Tire. 2, Rueda gemela pequeña. 3, Super super single tire. 4 Rueda simple o super single Tire

Algunas de las propuestas de formulación para la obtención de la carga son:

*Ruedas gemelas*

$$q = 0.35 + 0.0035 L$$

donde,

q= presión de llenado [MPa]

L=carga de eje [MPa]

*Ruedas simple*

$$q = 0.42 + 0.0038 L$$

En cuanto a la obtención del radio de carga  $a$  (huella), se hace la hipótesis de que la presión de contacto

es igual a la presión de neumático, por lo que el radio de la huella circular de contacto viene dada por:

$$P = \pi a^2 q$$

a, radio de la carga

q presión de contacto=presión de inflado

P, carga sobre rueda.

(véase Ilustración 19)

Algunas de las propuestas encontradas en bibliografía son las siguientes:

Modelo	P (ton)	A (cm)	D (cm)	q (kg/cm <sup>2</sup> )
	carga sobre rueda	radio de la carga	distancia de separación entre ejes de llantas	presión de contacto=presión de inflado
MOPT UNICAUCA. Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Colombia.	8.200	10.8	32.4	5.594
ASPHALT INSTITUTE. Organismo Internacional con sede en EEUU.	8.164	11.5	34.5	4.912
Shell Oil. Empresa holandesa promotora de la aplicación informática BISAR.	8.156	10.5	31.5	5.887
GUIA FRANCESA 1994. En la que también se basa el ALIZE III RUEDA SENCILLA.	13.26	12.5	37.5	6.752

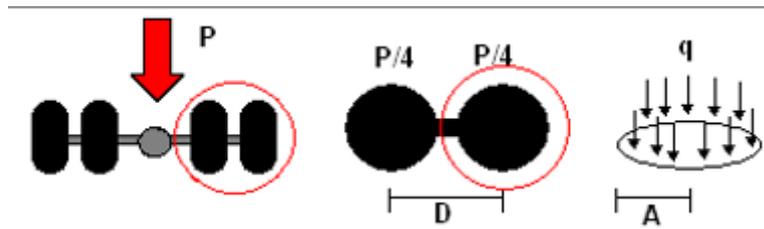


Ilustración 19 Opciones de modelos de carga tipo

### 6.1.2. Propuesta para el TFG

A falta de una modelización de carga de rueda tipo por la Norma 6.1 IC, nuestra propuesta de estudio será la carga rueda tipo dada por la Instrucción Andaluza.

Expone la Instrucción Andaluza lo siguiente ‘Los parámetros críticos se calculan con el modelo elástico multicapa incorporado en ICAFIR aplicando una sollicitación tipo RUEDA GEMELA DOBLE con presión de contacto 0.8 MPa, radio de huella de rueda 11.35 cm y distancia entre centros de ruedas gemelas 3.75 cm’

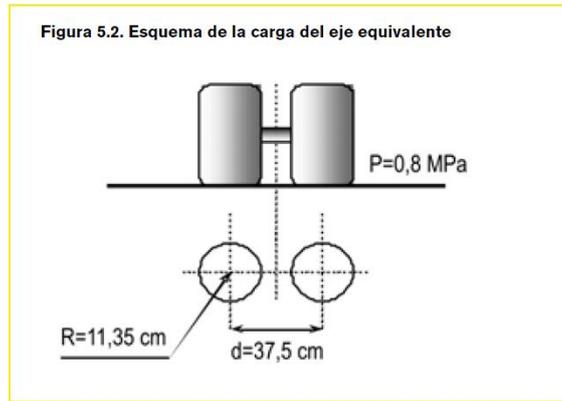


Ilustración 20 Carga tipo dada por ICAFIR 2006

Para el cálculo de tensiones y deformaciones en los distintos programas se utilizará la carga tipo dada por la Instrucción Andaluza dada para ICAFIR (Ilustración 20), ya que WESLEA y DEPAV permiten introducir manualmente las variables de cálculo para la carga tipo. Por lo tanto, queda confirmada la homogeneización de la carga tipo entre los tres programas.

El método WESLEA en la opción 'Other' se podrá modelizar la carga de ICAFIR mediante la definición de un número de cargas igual a dos (dos puntos de apoyo dado por la ruedas gemelas) y dos puntos de aplicación por cada extremo (uno bajo rueda gemela y otro en el centro de las dos ruedas gemelas)

Además, permite introducir manualmente el valor de la magnitud de la carga que descansará sobre la posición de rueda en el extremo del eje (65 kN para el eje de 13 tn) y la presión de neumático (valor que podrá ser el dado por ICAFIR, 800 kPa).

En DEPAV habrá que introducir los valores del radio de la carga ( $a[\text{cm}]=11.35$ ), presión de contacto ( $q[\text{kg}/\text{cm}^2]=8$ ) y distancia entre ruedas gemelas ( $D [\text{cm}]=37.5$ )

Por tanto, un resumen de las variables de entrada para el cálculo de tensiones y deformaciones en el las estructuras a analizar será en los tres programas:

P [tn]	6.5
R [cm]	11,35
q [Mpa]	0,8
d [cm]	37,5





## 6.2.1. Análisis de las Normativas

### 6.2.1.1. Norma 6.1 IC

Para el dimensionamiento del paquete de firme la norma establece una serie de categorías del tráfico.

La norma establece 8 categorías de tráfico (Tabla 3 Categorías del Tráfico dada por la Norma 6.1 IC a partir de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se prevea en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio que determinará la categoría del tráfico.

El criterio por el que se establecen los límites superior e inferior entre categorías no se especifica en la norma, si bien sí que se establecen los criterios para determinar el carril de proyecto en función del tipo de calzada de la carretera y cómo se estima que se distribuya el tráfico de pesados en la misma.

TABLA 1.A. CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4 000	< 4 000 ≥ 2 000	< 2 000 ≥ 800	< 800 ≥ 200

TABLA 1.B. CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 Y T4

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25

Tabla 3 Categorías del Tráfico dada por la Norma 6.1 IC

### 6.2.1.2. Instrucción para el diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía

Se definen igualmente 8 categorías del tráfico, tal que ‘las categorías del tráfico pesado definidas estarán en función de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados que se prevea en el carril de proyecto en el año de apertura al tráfico (IMDPA)’. Los límites de IMDp establecidos entre categorías son iguales a los establecidos en la Norma 6.1 (Tabla 4).

Tabla 3.1. Categorías del tráfico pesado

Categoría	IMDPA
T00	≥ 4.000
T0	≥ 2.000 y < 4.000
T1	≥ 800 y < 2.000
T2	≥ 200 y < 800
T3A	100 y < 200
T3B	≥ 50 y < 100
T4A	≥ 25 y < 50
T4B	< 25

Tabla 4 Categorías del Tráfico dadas por la Tabla 3.1 de la Instrucción Andaluza

Los datos para obtener la IMDPA se obtendrán de los aforos de obtenidos a partir del Plan General de Aforos de Andalucía. En el Anejo 3 del Manual ICAFIR aparecen algunas consideraciones sobre tráfico bajos correspondientes a vías agrícolas.

Se introduce el concepto de Tráfico Equivalente de Proyecto (TP) definido como ‘el número acumulado de ejes equivalentes de 13 tn que se prevea que pasarán sobre el carril de proyecto durante el periodo de proyecto’ y viene dado para crecimientos constantes, por la siguiente fórmula:

$$TP = IMD_{PA} * CE * 365 * F * \gamma t$$

IMDPA: Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de apertura al tráfico

CE: Coeficiente de equivalencia de los vehículos pesados en número de aplicaciones del eje equivalente de 13 tn.

<b>Tipo de firme</b>	<b>CE</b>
Firme con base bituminosa o granular	0,6
Firme con base tratada con cemento	0,8
Firme con pavimento de hormigón vibrado	1,0

*Tabla 5 Valores del Coeficiente de equivalencia para el cálculo del TP de ICAFIR*

$F$ : Factor de crecimiento constante del tráfico de vehículos pesados, que puede calcularse como una tasa anual de crecimiento constante con la siguiente expresión:

$$F = [(1 + r)^n - 1]/r$$

donde  $r$  es la tasa de crecimiento anual del tráfico de vehículos pesados (en tanto por uno) y  $n$  es el periodo de proyecto.

$\gamma t$  coeficiente de seguridad por mayoración de cargas en función del tráfico y de valores 1.20 de T00 a T1, 1.10 de T2 a T3 y de 1,00 para T4.

La Instrucción también contempla el cálculo de el número de ejes acumulados de proyecto por otros métodos, pudiéndose introducir manualmente en el programa éste valor.

Un ejemplo de estos métodos podría ser el de considerar crecimientos variables, mediante un cálculo algo más laborioso, introduciendo una tasa anual de crecimiento variable,  $r_i$ , y haciendo un sumatorio en el número de años de vida útil de proyecto. Como se puede apreciar, definir la carga mediante este procedimiento, nos dará valores del Tráfico de Proyecto, TP, (vida útil de diseño de la carretera), que podrán ser muy diferentes aunque el IMDPA inicial de cálculo fuera el mismo que para crecimientos constantes.

### 6.2.2. Propuesta para el TFG

A continuación se formularán las hipótesis de tráfico de proyecto en Número de Ejes de Diseño.

Mencionar que los programas WESLEA y DEPAV, al ser programas cuya única tarea es el cálculo de deformaciones y esfuerzos, no están provistos de un módulo para el cálculo de la carga de tráfico.

#### 6.2.2.1. Hipótesis de Tráfico de proyecto

En lo que concierne a nuestro estudio, sólo se darán valores en número acumulado de ejes equivalentes, a partir de los límites de tráfico (IMD<sub>p</sub>) inferior y superior establecidos por la Norma 6.1 IC, calculados a partir de la formulación dada a continuación para crecimiento exponencial.

En las hipótesis de crecimiento constante:

$$t_n = t_1(1 + i)^{n-1}$$

$$365 \sum_1^n t_n = 365 \frac{t_1[(1 + i)^n - 1]}{i}$$

donde,

$t_1[\text{ejes equivalentes}] = \text{tráfico promedio diario del primer año (TPD}_0)$

$t_n[\text{ejes equivalentes}] = \text{tráfico promedio diario del año } n$

$n = \text{número de años (vida)}$

$i = \text{tasa de crecimiento anual del tráfico}$

$$365 \sum_{1}^n t_n = \text{tráfico acumulado durante la duración de la vida}$$

En el caso de crecimiento variable el crecimiento viene dado año tras año en función de su tasa de crecimiento anual:

$$t_i = t_{i-1}(1 + i_i)$$

Las hipótesis de carga de tráfico que se emplearán en los casos de estudio, tendrán un periodo de 20 años tal y como aconseja la Norma española.

Las hipótesis dadas sobre el crecimiento del tráfico serán:

- Hipótesis 1 (C 1). Crecimiento constante del 2%. (PIB 2% anual)
- Hipótesis 2 (C 2). Crecimiento constante del 3 %. (PIB 3% anual)
- Hipótesis 3 (C 3). Crecimiento constante del 4 % (PIB 4% anual)
- Hipótesis 4 (V 4). En ciclos económicos quinquenales:
  - Primero (Año 1 al 5): 3%
  - Segundo (Año 5 al 10): 1%
  - Tercero (Año 10 al 15): 2%
  - Cuarto (Año 15 al 20): 3%

En estructuras con capas granulares se reducirá el valor dado del número de ejes acumulados multiplicando por 0.6 (CE=0.6) tal y como establece la Instrucción Andaluza. Las hipótesis expuestas darán un Tráfico de Proyecto (TP) en número de ejes equivalentes, para los Límites Inferior y Superior de las Categorías del Tráfico, tal y cómo se muestra en la tabla siguiente (véase Tabla 6):

Categoría del Tráfico	Límite	IMDP	Yt	C1	C2	C3	V4
T31	LS	200	1,10	1.170.647	1.294.615	1.434.708	1.181.799
	LI	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
T32	LS	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
	LI	50	1,10	292.662	323.654	358.677	295.450
T41	LS	50	1,00	266.056	294.231	326.070	262.962
	LI	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
T42	LS	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
	LI	-	1,00	-	-	-	-

Tabla 6 Tabla-resumen con los valores de N acumulado de vehículos equivalentes para una solución con base granular, CE=0.6

Para tasas de crecimiento constantes, se ha multiplicado directamente el valor de la IMDPA por el factor de crecimiento F, que, por ejemplo, para la Hipótesis 3 (crecimiento al 4% anual), tiene el valor:

$$F = \frac{[(1 + 0.04)^{20} - 1]}{0.04} = 29.68$$

Para tasas de crecimiento variables se llevará a cabo un cálculo tal y como sigue:

- Se obtienen el número de años de la vida útil de proyecto y se le aplica a cada año su tasa de crecimiento anual.
- Se multiplica por la IMDp por 365 días para obtener el Número de Ejes Acumulados en ese año

- Se multiplica la magnitud anterior por los coeficiente  $CE=0.6$  y  $\gamma t$  en función de la Categoría de Tráfico (tal y como se indica en el apartado 6.2.1.2)
- Se lleva a cabo el cálculo del acumulado sumando el Número de Ejes Acumulados en el año al cúmulo de los años anteriores.
- El último valor de la columna anterior correspondiente a los 20 años de vida del firme será el que se considerará como Número de Ejes Acumulados de Proyecto (N diseño).

Año	Crecimiento	T32 LI (IMDp vehp/día) 50	x 365 días	Número de Ejes por año	Numero de Ejes Acumulados por año	T32 LS (IMDp vehp/día) 100	x 365 días	Número de Ejes por año	Numero de Ejes Acumulados por año
0	0	50	18.250	18.250	12.045	100	36.500	36.500	24.090
1	3	52	18.798	37.048	24.451	103	37.595	74.095	48.903
2	3	53	19.361	56.409	37.230	106	38.723	112.818	74.460
3	3	55	19.942	76.351	50.392	109	39.885	152.702	100.784
4	3	56	20.541	96.892	63.949	113	41.081	193.783	127.897
5	1	57	20.746	117.638	77.641	114	41.492	235.275	155.282
6	1	57	20.953	138.591	91.470	115	41.907	277.182	182.940
7	1	58	21.163	159.754	105.438	116	42.326	319.508	210.875
8	1	59	21.375	181.129	119.545	117	42.749	362.257	239.090
9	1	59	21.588	202.717	133.793	118	43.177	405.434	267.586
10	2	60	22.020	224.737	148.326	121	44.040	449.474	296.653
11	2	62	22.460	247.197	163.150	123	44.921	494.395	326.301
12	2	63	22.910	270.107	178.271	126	45.819	540.214	356.541
13	2	64	23.368	293.475	193.693	128	46.736	586.950	387.387
14	2	65	23.835	317.310	209.425	131	47.670	634.620	418.850
15	3	67	24.550	341.861	225.628	135	49.101	683.721	451.256
16	3	69	25.287	367.147	242.317	139	50.574	734.295	484.634
17	3	71	26.045	393.193	259.507	143	52.091	786.385	519.014
18	3	73	26.827	420.020	277.213	147	53.654	840.039	554.426
19	3	76	27.632	447.651	295.450	151	55.263	895.302	590.900

Tabla 7 Distribución temporal del Número de Ejes Acumulados de Proyecto para Categoría de Tráfico T32

Las distribuciones temporales de Tráficos acumulados se podrán ver en el ANEJO IV. TRÁFICO DE PROYECTO.

Supongamos que se aplican dichas hipótesis sobre el límite inferior y superior de IMDPA correspondientes a la categoría T32 del Tráfico (LI=50 VP y LS=100 VP). La evolución de dicho tráfico en el periodo de proyecto será la de la ilustración siguiente (Ilustración 22):

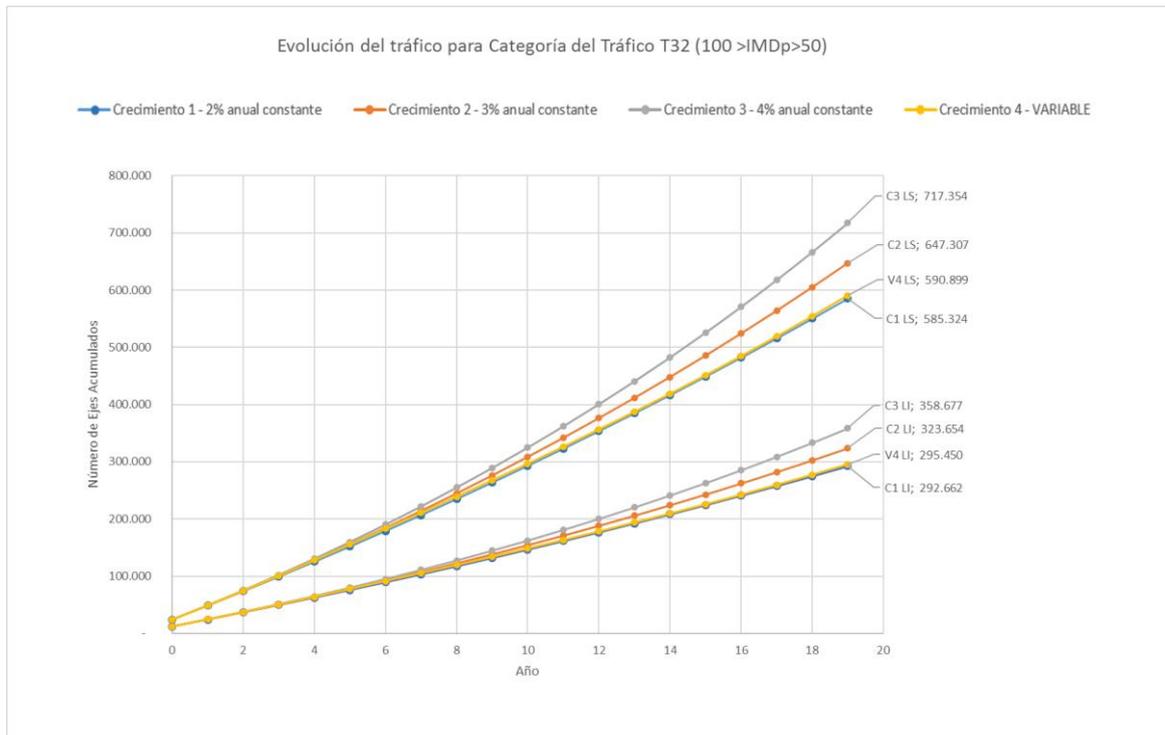


Ilustración 22 Evolución de los Tráficos de T32 bajo distintas hipótesis de carga

Como se puede observar, el número de ejes acumulados varía entre unas hipótesis y otras, tanto para el límite inferior como para el superior. El límite superior será el doble que el límite inferior en todas las hipótesis. Por ejemplo, para la hipótesis de crecimiento 1 (C1) el límite inferior es 292.662) y el superior 585.324.

#### 6.2.2.2. Determinación del Coeficiente de Seguridad

Vamos a estudiar un caso específico, para comprender el estudio a realizar.

Sea una estructura de tipo Firme Flexible 3231 dada por la Norma 6.1 para Tráfico T32 a la cual se ha sometido a cálculo de tensiones y deformaciones por DEPAV y se han obtenido resultados de la deformación horizontal en la fibra inferior de la mezcla bituminosa, -1.15E-04 (adimensional) y deformación vertical en el plano de explanada de 8.43E-05.

Estableciendo por tanto, el criterio de fallo por agrietamiento dado por la Norma 6.1 IC es:

$$\varepsilon_r = 6.925 * 10^{-3}(N)^{-0.27243}$$

Y el N obtenido sería de 3.410.106.

Para el fallo por hundimiento dado para la Zahorra y por extensión al resto del firme es:

$$\varepsilon_z = 2.16 * 10^{-2}(N)^{-0.28}$$

Y el N obtenido es de 400.162.460.

Por lo que estableciendo el mínimo como el Número de Ejes Admisibles (EA), se tendría que que la estructura 3231 sería capaz de admitir 4.401.076 ejes antes de rotura.

Es por ello que se establece, para cada hipótesis de carga, un coeficiente de seguridad de la estructura definido como:

$$FS = \frac{N_{Adm}}{N_{diseño,i}}$$

$N_{diseño,i}$ , número de ejes acumulados bajo la hipótesis considerada  $i$  ( $i = C1, C2, C3$  o  $V4$ ).

que en este caso, para la hipótesis C1 del Límite Superior del Tráfico de Proyecto sería de:

$$FS = \frac{3.410.106}{585.324} = 5.83$$

Y que para el resto de hipótesis son:

3231		ANÁLISIS 1	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)	
		Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
	$\varepsilon$	-1,9665E-04	-1,1500E-04
	Nadm	483.607	3.410.106
	Nd		
C1 LS	585.324	0,83	5,83
C2 LS	647.307	0,75	5,27
C3 LS	717.354	0,67	4,75
V4 LS	590.899	0,82	5,77
C1 LI	292.662	1,65	11,65
C2 LI	323.654	1,49	10,54
C3 LI	358.677	1,35	9,51
V4 LI	295.450	1,64	11,54

### 6.3. MODELIZACIÓN DEL CIMIENTO (Fase 3c)

#### 6.3.1. Tipo de Explanada

##### 6.3.1.1. NORMA 6.1 IC

La norma establece una nomenclatura muy clara en sus propuestas de estructuras de firmes dada por unos dígitos que exponen la naturaleza de la sección.

$$(X)X | Y | Z$$

Donde

(X)X establece la categoría del Tráfico de diseño (00,0,1,2,31,32,41,42)

Y establece la categoría del cimiento de la estructura. (1,2,3)

Z establece la estructura del firme (1, MBC con base granular. 2, MBC con base de material granular con ligante hidráulico, Suelocemento. 3, MBC con base de material ligado hidráulicamente en dos capas, Suelocemento y Gravacemento. 4, Pavimento de Hormigón).

Como se ha indicado, la norma establece tres categorías de explanada de firme (cimiento), que definirán el segundo dígito Y, y que se caracterizan por el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga ( $E_{v2}$ ) obtenido de acuerdo con la NLT-357 <<Ensayo de carga con placa>>, cuyos rangos se encuentran en la siguiente tabla (Tabla 8 Categorías de explanada dados por la norma 6.1 IC)

TABLA 2. MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD EN EL SEGUNDO CICLO DE CARGA

CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	E2	E3
$E_{v2}$ (MPa)	$\geq 60$	$\geq 120$	$\geq 300$

Tabla 8 Categorías de explanada dados por la norma 6.1 IC

En la Figura 1 de la Norma 6.1 IC (Ilustración 23) se proponen las distintas categorías de explanada que se pueden conseguir a partir del tipo de terreno natural subyacente que se tenga en proyecto.



### 6.3.1.2. Instrucción Andaluza

La Instrucción, al igual que la norma, identifica los tipos de materiales para la constitución del Cimiento según el Art. 330 del PG3 recogiéndolo en la tabla siguiente (Tabla 4.1 de la Instrucción):

<b>Tabla 4.1. Suelos y materiales para caracterización del TNS y uso en cimiento del firme</b>				
<b>Símbolo</b>	<b>Designación del Material</b>	<b>Características</b>	<b>Prescripciones complementarias para su empleo en</b>	
			<b>Núcleo</b>	<b>Capas de asiento</b>
SIN	Suelo Inadecuado	Según suelo inadecuado del art. 330 del PG-3	No utilizable	No utilizable
S00	Suelo Marginal	Según suelo marginal del art. 330 del PG-3	Estudio especial. No utilizable en zonas inundables	No utilizable
S0	Suelo Tolerable	Según suelo tolerable del art. 330 del PG-3	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 3 Hinchamiento <sup>(1)</sup> < 3% No utilizable en zonas inundables	No utilizable
S1	Suelo Adecuado	Según suelo adecuado del art. 330 del PG-3	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 5 Hinchamiento <sup>(1)</sup> < 3% salvo en zonas inundables que < 1%	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 5 Hinchamiento <sup>(1)</sup> nulo Sólo utilizable sobre suelos SIN, S00 ó S0
S2	Suelo Seleccionado Tipo 2	Según suelo seleccionado del art. 330 del PG-3	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 10 Hinchamiento <sup>(1)</sup> < 1%	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 10 Hinchamiento <sup>(1)</sup> nulo
S3	Suelo Seleccionado Tipo 3	Según suelo seleccionado del art. 330 del PG-3	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 20 Hinchamiento <sup>(1)</sup> < 1%	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 20 Hinchamiento <sup>(1)</sup> nulo
S4	Suelo Seleccionado Tipo 4 <sup>(3)</sup>	Según suelo seleccionado del art. 330 del PG-3	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 20 Hinchamiento <sup>(1)</sup> < 1%	CBR <sup>(2)</sup> ≥ 40 Hinchamiento <sup>(1)</sup> nulo
S-EST1	Suelo estabilizado in situ Tipo 1	Según S-EST1 del art. 512 del PG-3	Cal o cemento ≥ 2% y CBR a los 7 días ≥ 6	
S-EST2	Suelo estabilizado in situ Tipo 2	Según S-EST2 del art. 512 del PG-3	Cal o cemento ≥ 3% y CBR a los 7 días ≥ 12	
S-EST3	Suelo estabilizado in situ Tipo 3	Según S-EST3 del art. 512 del PG-3	Resistencia a compresión a 7 días ≥ 1,5 MPa y Cemento ≥ 3%	
Z	Zahorras	Según art. 510 del PG-3		
ROCA	Desmante en roca	Según art. 320 del PG-3	-	Regularización con hormigón HM-20
P	Pedraplén	Según art. 331 del PG-3	Art. 331 del PG-3	No utilizable en capas de asiento
TU	Todo uno	Según art. 333 del PG-3	Art. 333 del PG-3	No utilizable en capas de asiento

<sup>(1)</sup> El Hinchamiento se realizará en edómetro según Norma UNE 103.601  
<sup>(2)</sup> En relación al CBR véase apartado 4.2.2.  
<sup>(3)</sup> Se podrán clasificar dentro de éste grupo los alberos y alberizas que presenten las siguientes características: IP < 5; Hinchamiento 0%; Equivalente de arena >25; retiene #25 < 25%; #0,080 < 20%, y un contenido de sales solubles <0,5%.

Tabla 10 Tipos de materiales para cimiento dado por ICAFIR

Para el dimensionamiento del cimiento se podrá introducir los materiales tipificados en la Tabla 10 junto con los espesores, y en el caso de suelos Inadecuados (SIN), Marginales (S00), Tolerables (S0), y Adecuados (S1) también podrá introducirse el índice CBR obtenido del estudio geotécnico.

Obtenido el diseño del Cimiento, el programa ICAFIR calculará un valor del Módulo de

compresibilidad de la Explanada que validará ésta en caso de superar el límite inferior del ‘Módulo equivalente’, para la opción de Categoría de Explanada (alta, media o baja) seleccionada, en función de la Categoría del Tráfico, según viene recogido en la Tabla 11 (Tabla 4.5 de la Instrucción).

**Tabla 4.5. Categorías del cimiento del firme**

Categoría de cimiento	Módulo equivalente, $E_e$ (MPa)	Categorías válidas de tráfico de proyecto
BAJA	$\geq 60$	T4
MEDIA	$\geq 100$	T3 y T4
ALTA	$\geq 160$	T00 a T2

Tabla 11 Categoría del cimiento en función de las Categorías del Tráfico según ICAFIR

El cálculo del módulo equivalente del cimiento se obtendrá a partir de la fórmula:

$$E_e = \frac{13.150}{d_0(mm/100)}$$

Siendo  $d_0$  la deflexión superficial en el centro de la carga que se obtendrá a partir del cálculo analítico con el modelo elástico multicapa de Burmister aplicando una sollicitación tipo PLACA DE CARGA ( $q=0.5$  MPa y  $R=150$  mm) tal y como viene en el apartado 4.7.3 de la Instrucción Andaluza.

Una excentricidad que presenta el programa ICAFIR en el proceso de cálculo del firme es que el cimiento una vez diseñado, se caracteriza como un macizo sólido elástico semiindefinido sobre el que se apoyan las capas del firme, con las propiedades mecánicas mostradas en la tabla siguiente:

**Tabla 5.15 Caracterización del cimiento del firme**

Categoría de cimiento	$E_e$ (MPa)
BAJA	60
MEDIA	100
ALTA	160

Tabla 12 Caracterización del cimiento del Firme dado por la Instrucción (Tabla 5.15)

Es por ello, que el programa presenta una limitación para el cimiento, preestableciendo un valor módulo de compresibilidad de la explanada (bien 60, 100 o 160 MPa), sean cuales sean los materiales de los que se dispone el cimiento. Sobre esto se hará una discusión más adelante en el apartado 6.3.4.

A modo de resumen, el dimensionamiento del cimiento consistirá en la definición de las capas de asiento que se deben disponer sobre el terraplén o el fondo de desmonte, para que cumpliendo con los criterios mínimos de proyecto se consiga la capacidad de soporte mínima ( $E_e$ ) definida para la categoría de proyecto seleccionada.

Los valores de los parámetros elásticos para el cálculo del Módulo de Compresibilidad se exponen a continuación.

La capacidad soporte de los suelos del apoyo vendrá dada por el CBR característico de proyecto de los suelos que lo constituyen o que se consideren predominantes. El módulo de elasticidad de los suelos tipo Inadecuado (SIN), Marginal (S00), Tolerable (S0) y Adecuado (S1) se obtendrá a partir del valor del CBR característico del proyecto mediante la siguiente expresión:

$$E \text{ (MPa)} = 10 * CBR$$

Y para suelos tipo seleccionados (S2, S3, S4) y zahorras (ZN ó ZA) y los Todo-Uno (TU) se toma un valor especificado en tabla:

**Tabla 4.6. Valor máximo del módulo de elasticidad de suelos y materiales granulares**

<b>Materiales</b>	<b>E máximo (MPa)</b>
Suelo tipo S2	150
Suelo tipo S3	200
Suelo tipo S4 y todo-uno	250
Zahorra natural	350
Zahorra artificial	500

*Tabla 13 Valores de los módulos de elasticidad para suelos de alta capacidad soporte y materiales granulares según ICAFIR*

En todos los casos se tomará un coeficiente de Poisson 0.35.

Respecto a los suelos estabilizados con ligantes hidráulicos, el manual establece los siguientes valores:

**Tabla 4.9. Características mecánicas de suelos estabilizados in situ**

<b>MATERIALES</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>
Suelo estabilizado tipo S-EST1	100	0,35
Suelo estabilizado tipo S-EST2	200	0,30
Suelo estabilizado tipo S-EST3	1.000	0,25

*Tabla 14 Valores de los parámetros elásticos dados por ICAFIR para suelos tratados con ligantes hidráulicos*

Aunque no se especifican leyes de fatiga para suelos, sí que se tiene en cuenta el fallo del cimiento del firme, que es donde se proyectan estos materiales, tanto para modelizar el Terreno Natural Subyacente, como para establecer los materiales de las capas hasta plano de explanada.

El parámetro crítico para el fallo del cimiento del firme es la deformación vertical unitaria en la cara superior del cimiento ( $\epsilon_z$ ). a partir de este valor y utilizando el modelo de deterioro adoptado se hallará el número admisible de aplicaciones de carga (N), que tendrá que ser superior al tráfico equivalente de proyecto (TP).

Se adopta el siguiente modelo de deterioro por acumulación de deformaciones permanentes en el cimiento:

$$\epsilon_z = 2.16 * 10^{-2} * N^{-0.28}$$

### 6.3.1.3. Método WESLEA

En la interfaz del programa la estructura se organiza en número de capas hasta un un máximo de 5. Permite introducir varios datos de entrada en cada capa (Módulo de elasticidad, Coeficiente de Poisson, espesor y si las capas están ligadas o no entre sí). Para la formación de explanada se utilizarán un máximo de dos capas para su modelización.

WESLEA propone para materiales tipo suelo 'Soil', valores del Módulo Elástico entre 20.7 MPa para los más flojos y 206.8 MPa los de mayor capacidad soporte. El coeficiente de Poisson variará de 0.2 a 0.5. Aunque esto no sea limitante para los suelos propuestos por ICAFIR (salvo Suelo Seleccionado 4 que no se empleará en el cálculo), sí que lo es a la hora de formar explanada con suelos estabilizados tipo 3 (1000 MPa), por lo que se hace uso de la opción 'Other', en la que se podrá introducir los valores de las variables sin limitación.

El programa da un cálculo por fatiga (N Allowed) para las condiciones estándar de carga y puntos de evaluación, por lo que al modificar éstas para homogeneizarlas con ICAFIR, no podemos hacer uso de este módulo.

Cómo se puede apreciar, este programa de cálculo tiene la concepción de carácter multicapa dónde se modelizan los materiales por cada capa, y no se distingue entre materiales de explanada y materiales

del Firme como sí hace la aplicación ICAFIR.

#### 6.3.1.4. Método DEPAV

Como programa de cálculo multicapa, se podrá modelizar una estructura de hasta 6 capas, introduciendo sus valores del  $E(\text{kg/cm}^2)$ ,  $\nu$  y espesor (cm), y también se podrá indicar si las capas se encuentran o no ligadas entre sí.

Como programa de cálculo tenso-deformacional, no propone leyes de fatiga.

Al igual que WESLEA, las capas de cimiento se modelizarán al igual que cualquier otra capa, dejando la última de espesor indefinido.

Se expone una caracterización de suelos en el ANEJO V.

#### 6.3.2. Propuesta para el TFG

La modelización de la estructura se llevará a cabo en dos fases: una mediante la definición del cimiento o explanada y otra para el firme. Esta diferenciación es lógica a nivel estructural ya que tal y como se definió en el apartado 4.2 ‘Modelos de deterioro. Criterios de fallo’ las estructuras de carreteras pueden fallar o bien por deformaciones verticales en la explanada del cimiento o por esfuerzos y deformaciones de flexotracción en las capas que componen el firme.

En este estudio, para cada categoría de explanada (E1, E2 y E3) propuesta por la Norma 6.1 IC se definirá una única estructura de cimiento (una de los 10 tipos de estructuras dados para E1, una de los 15 tipos de E2, y una de los 9 tipos dados para E3).

Para el estudio se han fijado dos tipos de Terreno Natura Subyacente:

- a) Suelo Adecuado
- b) Suelo Seleccionado Tipo 3

Se han establecido para el estudio y por limitación del tiempo disponible en este TFG, las siguientes estructuras de cimiento, según la Categoría de Explanada:

		SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1 $E_{vd} \geq 60\text{MPa}$	1  min 100	
	E2 $E_{vd} \geq 120\text{MPa}$		3  min 100
	E3 $E_{vd} \geq 300\text{MPa}$	S-EST3 1 30	

Ilustración 24 Definición del Cimiento para el TFG.

Las dos primeras explanadas (E1 y E2) son capas de apoyo de suelos granulares mientras que la tercera es una capa de apoyo tratada con ligantes hidráulicos (cal o cemento) cuya función es rigidizar la

explanada.

ICAFIR da para estos tres tipos de explanada los siguientes valores de Módulo de compresibilidad (Ev2):

NORMA 6.1 IC		EXPLANADA PROPUESTA			ICAFIR		
CATEGORÍA DE EXPLANADA	Módulo de compresibilidad mínimo [Mpa]	TNS	CBR	Capas	Módulo de compresibilidad obtenido por deflexión de la superficie de explanada [MPa]	Módulo de compresibilidad para cálculo [MPa]	CATEGORÍA CIMENTO
E1	60	S. Adecuado (1)	6	Min 100 cm de suelo adecuado (1)	60,01	60	Baja
E2	120	Suelo Seleccionado Tipo 3 (S3)	-	Min 100 cm de Suelo Seleccionado Tipo 3	200,00	160	Alta
E3	300	S. Adecuado (1)	9	30 cm de suelo estabilizado tipo 3	319,26	160	Alta

Tabla 15 Propiedades mecánicas de la explanada a analizar

La columna del Módulo de compresibilidad obtenido por ICAFIR, se calcula mediante la fórmula dada anteriormente:

$$E_e = \frac{13.150}{d_0(mm/100)}$$

Siendo  $d_0$  la deflexión superficial en el centro de la carga que se obtendrá a partir del cálculo analítico con el modelo elástico multicapa de Burmister aplicando una sollicitación tipo PLACA DE CARGA ( $q=0.5$  MPa y  $R=150$  mm) tal y como viene en el apartado 4.7.3 de la Instrucción Andaluza.

Los parámetros elásticos que se tomarán en la modelización de la explanada, se aplicará la ley de Shell ( $E=10*CBR$ ), para los suelos de la siguiente manera:

- Para la explanada E1, el suelo adecuado tendrá un CBR de 6, que, aplicando la citada ley, resultaría una calidad de explanada de 60 MPa, que es el mínimo que establece la Norma para esta Categoría de Explanada.
- Para la explanada E2, el suelo seleccionado Tipo 3 tendrá un índice CBR de 20, que es el mínimo propuesto por la Norma para que se considere un suelo de este tipo (Tabla 9). Su módulo de compresibilidad quedará por tanto fijado en 200 MPa.
- Para la explanada E3, el suelo adecuado será de 90 MPa (aplicando un CBR de 9) y un Suelo Estabilizado Tipo 3 de 1000 MPa, obtenido dicho parámetro de la Instrucción Andaluza, ya que la Norma 6.1 IC no aporta valores mínimos para el CBR de este tipo de suelo estabilizado (Referencia bibliográfica 2 (Dirección General de Carreteras, 2015)) (Tabla 16).

**TABLA 512.4 TIPOS Y ESPECIFICACIONES DEL SUELO ESTABILIZADO IN SITU**

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMA	TIPO DE SUELO ESTABILIZADO		
			S-EST1	S-EST2	S-EST3
Contenido de conglomerante	% en masa del suelo seco		≥ 2	≥ 3	
Índice CBR, a 7 días <sup>(1)</sup>		UNE 103502	≥ 6	≥ 12	
Resistencia a compresión simple, a 7 días <sup>(1)</sup>	MPa	UNE-EN 13286-41			≥ 1,5 <sup>(2)</sup>
Densidad (Proctor modificado)	% de la densidad máxima	UNE 103501	≥ 95 <sup>(2)</sup>	≥ 97	≥ 98 <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Para la realización de estos ensayos, las probetas se compactarán y conservarán (norma UNE-EN 13286-51) con la densidad especificada en la fórmula de trabajo.

<sup>(2)</sup> Para la capa superior de la categoría de explanada E1 definida en la Norma 6.1 IC Secciones de firme, este valor será del noventa y siete por ciento (97%).

<sup>(3)</sup> En los casos en los que deba tenerse en cuenta el efecto de las heladas este valor podrá aumentarse a dos megapascales (2 MPa).

*Tabla 16 Tipos y especificaciones del suelo estabilizado in situ. Tabla 512.4 del PG3*

Un resumen de los comentado en el párrafo anterior viene dado en la siguiente tabla:

CATEGORÍA DE EXPLANADA	Capas	Tipo	E [Mpa]	v
E1	Capa de apoyo	Suelo Adecuado (1)	60	0,35
	TNS			
E2	Capa de apoyo	Suelo Seleccionado 3	200	0,35
	TNS	Suelo Seleccionado 3	200	0,35
E3	Capa de apoyo	Suelo Estabilizado 3 (S-EST3)	1000	0,25
	TNS	Suelo Adecuado (1)	90	0,35

*Tabla 17 Modelización de los materiales de cimiento de propuesta en el TFG*

#### 6.4. Estudio de las limitaciones de comparar estructuras de cimiento de la Norma 6.1 IC con las de la Instrucción Andaluza (Fase 3.d).

En el Análisis Tipo 1 se calcularán las estructuras de firme flexible de la Norma modelizándolas como multicapas en toda su profundidad, por lo que su cimiento quedó expuesto en el apartado anterior y su análisis no presenta limitación alguna respecto de lo expuesto en la normativa española.

Sin embargo, como se ha podido observar en los apartados anteriores, las categorías de explanada en la Norma 6.1 IC y en la Instrucción Andaluza están definidas para rangos del módulo de compresibilidad distintos.

Esta disparidad, unida a la imposibilidad de dar valores del módulo de compresibilidad para el cimiento, quedando ya establecidos cuando se define su categoría (alta, media o baja), provoca que no son equivalentes la explanada cuando la Categoría E3 (Norma 6.1 IC) con la Alta (Instrucción). Igualmente, no se puede analizar la Explanada de Categoría E2 (Norma 6.1 IC) para los valores mínimos (120 MPa) teniendo que conformarse el análisis con un valor dentro del rango admisible (160 MPa) (Tabla 18).

NORMA 6.1 IC		INSTRUCCIÓN ANDALUZA		Análisis Tipo 1 WESLEA y DEPAV		Análisis Tipo 2 ICAFIR		Análisis Tipo 3 WESLEA y DEPAV	
CATEGORÍA DE EXPLANADA NORMA 6.1 IC	Ev2 [MPa]	CATEGORÍA DE EXPLANADA ICAFIR	Ev2 [MPa]	Ev2 Estudio obtenido mediante deflexión de ICAFIR [Mpa]	¿subdimensionamiento en el análisis?	Ev2 Estudio [Mpa]	¿subdimensionamiento en el análisis?	Ev2 Estudio [Mpa]	¿subdimensionamiento en el análisis?
E1	≥ 60	BAJA Y MEDIA	60	60,01	NO	60	NO	60	NO
			100						
E2	≥ 120	ALTA	160	200,00	NO	160	NO	160	NO
E3	≥ 300	ALTA	160	319,26	NO	160	SI	160	SI

Tabla 18 Parámetros elásticos para la explanada

Este desfase se tendrá en cuenta en el Análisis Tipo 2 del capítulo 8.2 para las secciones de la norma calculadas mediante la aplicación informática ICAFIR.

En el Análisis Tipo 3 de cálculo y análisis con los programas WESLEA y DEPAV, para poder comparar los resultados con los del Análisis 2, se mantendrá esta premisa dada por ICAFIR para el cimiento, y para el cálculo se modelizará el cimiento como la última capa, de espesor indefinido y con valores los dados en la Tabla 15.



## 6.5. MODELIZACIÓN DE LOS MATERIALES DEL FIRME (Fase 3.e)

En este capítulo se expone la caracterización de materiales del firme dados por la Norma 6.1 IC, la Instrucción Andaluza y la de otros métodos encontrados en bibliografía. Para cada tipo de material, se indicarán los parámetros elásticos de aplicación a los modelos de respuesta y, por otro lado, las leyes de fatiga que se proponen.

### 6.5.1. Análisis de las Normativas y Métodos

#### 6.5.1.1. Materiales granulares

Los materiales granulares forman las capas base de los Firmes Flexibles. Sus valores del módulo de elasticidad tiene límites entre los 80 y los 600 MPa. Al tratarse de capas de un espesor considerable, las distintas fuentes consultadas dan fórmulas para la obtención del módulo elástico mediante incrementos de éste conforme se van añadiendo tongadas hasta un valor límite.

A continuación se expondrán las propiedades mecánicas de este tipo de materiales.

#### 6.5.1.1.1. NORMA 6.1 IC

La norma define el material de zahorra según el Art. 510 del PG3. como granular, de granulometría continua, utilizado como capa del firme. Se denomina zahorra artificial al constituido por partículas total o parcialmente trituradas. Zahorra natural es el material formado básicamente por partículas no trituradas.

Para las soluciones de Firmes Flexibles, la norma establece que la zahorra deberá tener un valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa ( $E_{v2}$ ), superior al menor valor de los indicados en la tabla 510.6 del PG3 (Tabla 19):

**TABLA 510.6 VALOR MÍNIMO DEL MÓDULO  $E_{v2}$  (MPa)**

CATEGORÍA DE EXPLANADA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2	T3	T4 y ARCENES
E3	200	180	150	120	100
E2		150	120	100	80
E1			100	80	80

Tabla 19 Valores mínimos del módulo de compresibilidad de zahorras según el PG3 (Dirección General de Carreteras, 2015)

Se especifica una ley de fatiga en la norma que es de la siguiente manera

$$\varepsilon_z = 2.16 * 10^{-2} (N)^{-0.28}$$

ICAFIR no introduce criterio de fallo específico para capas base granulares del firme, sin embargo, utiliza la fórmula de fatiga para zahorras de la Norma (Tabla 5) como criterio de fallo para el cimiento.

#### 6.5.1.1.2. Instrucción andaluza

En este apartado ICAFIR considera que el módulo de elasticidad de cada capa de material granular aumenta proporcionalmente al módulo de la capa o tongada sobre la que se apoya hasta alcanzar un valor máximo de 350 MPa para zahorras naturales y 500 MPa para artificiales. En consecuencia, el módulo elástico de cada tongada vendrá dado por la siguiente expresión:

$$E_i = c_i E_{i-1}$$

$E_i$ : módulo de la tongada "i"

$E_{i-1}$ : módulo de la tongada subyacente  $i - 1$

$C$ : coeficiente de paso proporcionado por ICAFIR

**Tabla 5.8. Valor del coeficiente de paso entre módulos de materiales granulares**

Material de la tongada "i"	C
Zahorra natural	2,5
Zahorra artificial	3,0

Tabla 20 Valores del coeficiente de paso entre módulos elásticos por tongadas dados por ICAFIR

El coeficiente de Poisson será de 0.35 al igual que el resto de materiales.

No se especifica en la instrucción una ley de fallo para material granular en tanto que se tiene en cuenta exclusivamente el fallo del cimiento por deformación vertical y el fallo de la Mezcla bituminosa por agrietamiento. Basándonos en esto, se podría concluir que este método no contempla el fallo en el seno de la capa base de material granular.

#### 6.5.1.1.3. Método WESLEA

WESLEA para capas granulares propone un material tipo 'GB' (Granular Base) cuyos rangos inferior y superior son 34.5 MPa y 344.7 MPa respectivamente. El coeficiente de Poisson variará de 0.3 a 0.45. Para la modelización de material granular fuera de estos límites se tendrá que recurrir a la opción de capas 'Other'.

No propone leyes de fatiga específicas para estos materiales.

#### 6.5.1.1.4. Otros métodos encontrados en bibliografía

Las bases y subbases granulares, bajo rangos de 50 MPa y 700 MPa para la Base y 30 y 280 MPa para las subbases, los valores vienen dado por las siguientes expresiones:

- Barber

Propone una fórmula obteniendo el módulo de compresibilidad por tongada en base al espesor y módulo de la tongada de la capa inferior de la forma:

$$E_n = E_{n-1} * (A * \log(h_n) + B * \log(E_{n-1}) - C * \log(h_n) * \log(E_n) - D)$$

Con unos valores de los parámetros dados como sigue:

Para capas de Subbase	A=5.35	B=0.62	C=1.56	D=1.13
Para capas Base	A=8.05	B=0.84	C=2.10	D=2.21

- Shell

$$E_n = 0.2 * h_n^{0.45} * E_{n-1}$$

$h_n$ , espesor de la capa n

$E_{n-1}$ , módulo elástico de la capa inferior n - 1

Los espesores de cada capa o tongada estarán comprendidos entre 15.0 y 80.0 cm.

Y el coeficiente de Poisson entre 0.30 y 0.35.

6.5.1.2. Materiales estabilizados con ligantes hidráulicos

La aportación de cal o cemento a los materiales les aporta mayor capacidad soporte, mayor rigidez y consecuentemente su módulo elástico se verá aumentado en respuesta a estas nuevas condiciones.

Las leyes de fatiga vienen dadas en tensiones de tracción, tal y como se adelantó en el apartado 4.2.2.

6.5.1.2.1. Norma 6.1 IC

La Norma española no define módulos elásticos para estos materiales, pero sí que aporta una ley de fatiga parametrizada en función de la resistencia a la flexotracción,  $R_F$  (Tabla 5 de la Norma 6.1 IC):

Para suelo cemento

$$\frac{\sigma_r}{R_F} = 1 - 0.080 * \log N$$

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{R_F}\right)}{0.080}}$$

Para gravacemento:

$$\frac{\sigma_r}{R_F} = 1 - 0.065 * \log N$$

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{R_F}\right)}{0.065}}$$

$\sigma_r$ , tensión de tracción en MPa.

$R_F$ , resistencia a flexotracción del material en MPa.

$N$ , número de ejes equivalente de 128 kN (13 tn)

6.5.1.2.2. Instrucción andaluza

Para los materiales granulares para base del firme con adición de conglomerantes hidráulicos, se toman valores únicos recogidos en la siguiente tabla:

<b>Materiales</b>	<b>E ( MPa )</b>	<b>v</b>
Suelocemento, tipo SC-3	2.000	0,25
Suelocemento, tipo SC-4	8.000	0,25
Gravacemento	20.000	0,25

Tabla 21 Valores de los parámetros elásticos para materiales granulares tratados con ligantes hidráulicos

Las leyes de fatiga para materiales tratados hidráulicamente, al contrario que otros materiales, viene dado en tensiones (Tabla 22):

**Tabla 5.14 Leyes de fatiga para materiales tratados con cemento**

Tipo de mezcla	Ley de fatiga
Suelocemento SC-3	$\sigma(\text{MPa}) = 0,43 \cdot (1 - 0,065 \cdot \log N)$
Suelocemento SC-4	$\sigma(\text{MPa}) = 0,72 \cdot (1 - 0,065 \cdot \log N)$
Gravacemento	$\sigma(\text{MPa}) = 1,30 \cdot (1 - 0,065 \cdot \log N)$

Tabla 22 Ecuaciones de fatiga para metriales tratados con cemento dado por ICAFIR

Y despejando el número de repeticiones de carga N:

SC3:

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{0,43}\right)}{0,065}}$$

SC4

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{0,72}\right)}{0,065}}$$

Gravacemento

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{1,30}\right)}{0,065}}$$

#### 6.5.1.2.3. Método WESLEA

WESLEA no propone parámetros elásticos para materiales ligados hidráulicamente, aunque se podrán modelizar mediante ‘Other’ dando los valores que se deseen.

Tampoco establece leyes de fatiga para este tipo de material.

#### 6.5.1.2.4. Otros métodos encontrados en bibliografía

En el libro ‘Diseño Racional de Pavimento’ se han encontrado modelos para materiales estabilizados con ligantes hidráulicos (cal o cemento), para una mayor tipología de materiales (Tabla 23).

**Tabla B.3**  
Características de los materiales tratados con ligantes hidráulicos

Material de la capa	Módulo de elasticidad E [MPa]	Relación de Poisson v
Grava cemento GC	23.000	0,25
Grava cemento hidráulico GCH	23.000	0,25
Grava con cenizas volantes GCV	30.000	0,25
Grava escoria granulada GLg	15.000	0,25
Grava escoria molida GLp	20.000	0,25
Grava escoria molida GLp y Cal	15.000	0,25
Grava escoria recompuesta GLR	23.000	0,25
Arena cemento SC3	17.200	0,25
Arena cemento SC2	12.000	0,25
Arena cemento SC1	5.000	0,25
Arena escoria SL3	12.500	0,25
Arena escoria SL2	8.500	0,25
Arena escoria SL1	3.700	0,25
Capa de rodadura en concreto BCc	28.000	0,25

Tabla 23 Valores de parámetros elásticos para materiales establistados con ligantes hidráulicos

Las leyes de fatiga se basan en ensayos de flexotracción y tienen la forma siguiente:

$$\frac{\sigma}{\sigma_6} = \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b$$

donde,

$\sigma$ : esfuerzo aplicado

$\sigma_6$ : esfuerzo al millón de repeticiones a 10°C y a 10 Hz

$N$ : número de ejes equivalentes de trece toneladas

$b$ : pendiente de la ley de fatiga

**Tabla B.6**  
Características de los materiales tratados con ligantes hidráulicos

Clase de concreto	Esfuerzo al millón de repeticiones $\sigma_6$ [MPa]	Pendiente de la ley de la fatiga $-1/b$	SN	Coefficiente de dispersión del espesor (m) $S_h^{(1)}$	Coefficiente de ajuste $k_s$
Grava cemento GC	0,75	15	1	0,03	1,4
Grava con cenizas volantes GCV	1,4	16	1	0,03	1,5
Grava escoria granulada GLg	0,6	12,5	1	0,03	1,5
Grava escoria molida GLp	0,7	13,7	1	0,03	1,5
Grava escoria GLp y cal	0,6	12,5	1	0,03	1,5
Grava escoria recompuesta GLR	0,75	15	1	0,03	1,4
Arena cemento SC3	0,75	12	0,8	0,025	1,5
Arena cemento SC2	0,5	12	0,8	0,025	1,5
Arena cemento SC1	0,21	12	0,8	0,025	1,5
Arena escoria SL3	0,65	10	0,8	0,025	1,5
Arena escoria SL2	0,425	10	0,8	0,025	1,5
Arena escoria SL1	0,175	10	0,8	0,025	1,5
Capa de rodadura en concreto BCc	1,95	15	1	0,03	1,5

(1)  $S_h$  puede reducirse a 0,02 m si la subrasante es de buena calidad.

Tabla 24 Parámetros para la determinación de las leyes de fatiga en materiales

Despejando el NE, tenemos expresiones de la forma (Tabla 24):

Arena cemento SC3 ( $b=12$ ;  $1/b=0.083$ )

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{0.75}\right)}{0.083}}$$

Gravacemento ( $b=15$ ;  $1/b=0.0667$ )

$$N = 10^{\frac{\left(1 - \frac{\sigma_r}{0.75}\right)}{0.067}}$$

### 6.5.1.3. Mezclas bituminosas

#### 6.5.1.3.1. NORMA 6. IC

El apartado dedicado a mezclas bituminosas en la norma, establece los criterios de dimensionamiento de ésta, caracterizados especialmente por la Tabla 6 de determinación de espesores en función de la capa de mezcla (rodadura, intermedia o base), estableciendo sus definiciones a través de los artículos 542 y 543 del PG3. No se lleva a cabo ninguna especificación de los parámetros elásticos de estos materiales.

La fatiga para mezclas bituminosas en caliente viene especificada en la norma como:

$$\varepsilon_r = 6.925 * 10^{-3} (N)^{-0.27243}$$

#### 6.5.1.3.2. Instrucción andaluza

Debido a su naturaleza viscoelástica, se especifica que los módulos vienen dados para una temperatura equivalente de 20°.

**Tabla 5.11. Características mecánicas de las mezclas bituminosas (para una temperatura equivalente de 20 °C)**

Tipo de mezcla	E ( MPa )	v
Densas y semidensas	6.000	0,33
Gruesas	5.000	0,33
Drenantes y abiertas	4.000	0,35
Discontinua en capa fina	4.000	0,35
De alto módulo	11.000	0,30
Abiertas en frío	1.500	0,35

Tabla 25 Valores de los parámetros elásticos dados por ICAFIR para los distintos tipos de Mezclas Bituminosas

Para zonas donde las temperaturas máximas son capaces de superar los 35° (Zona climática ZT4 en la Instrucción), y por lo tanto donde las mezclas bituminosas en caliente son especialmente sensibles, tendremos variaciones de las características mecánicas en función de la época climática.

**Tabla 5.12. Variación de las características mecánicas medias de las mezclas bituminosas en caliente**

Época climática	Coefficiente sobre el módulo de rigidez	v
Valor medio anual	1	0,33
Primavera-otoño	1	0,33
Verano	0,5	0,35
Invierno	1,5	0,30

Tabla 26 Coeficientes de variación de los parámetros elásticos en función de la época climática según Instrucción andaluza

Se aplicará la ley de Miner en el cálculo de acumulación de daño de manera estacional, según la cual las capas de mezcla bituminosa van acumulando la fatiga. Por tanto, si en una situación de con un módulo  $E_i$ , es capaz de soportar  $N_i$  aplicaciones de carga antes de que se agote, la fracción de fatiga producida por  $n_i$  aplicaciones de carga producirá un daño, dado como:

$$f_i = n_i/N_i$$

y el final de la vida en servicio se producirá cuando:

$$\sum f_i = 1$$

$n_i$ : El número de aplicaciones de la carga tipo con un módulo de mezcla  $E_i$

$N_i$ : La vida de fatiga del firme con un módulo  $E_i$

En casos específicos de tramificación de pendiente mayor o igual al 5 % en longitudes iguales o superiores a 1.000 m, que se caracterizarán en el programa mediante la activación de una pestaña en el Tramo requerido, lo que supondrá una disminución de los módulos de rigidez antes mencionados hasta en un 20 %.

Las leyes de fatiga vienen dadas por la máxima deformación de tracción en la mezcla bituminosa de la forma (Tabla 27):

**Tabla 5.13. Leyes de fatiga para mezclas bituminosas en caliente**

Tipo de mezcla	Ley de fatiga
Gruesa o abierta	$\epsilon_r = 6,443 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
Semidensa o densa	$\epsilon_r = 6,920 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
Mezcla de alto módulo	$\epsilon_r = 6,612 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$

*Tabla 27 Ecuaciones de fatiga para mezclas bituminosas dada por la Instrucción andaluza*

#### 6.5.1.3.3.Método WESLEA

Se pueden modelizar mediante el material tipo 'AC' (Asphalt Concrete) introduciendo el valor entre unos rangos de 551.6 y 13789.5 MPa.

El programa da un cálculo por fatiga (N Allowed) para las condiciones estándar de carga y puntos de evaluación, por lo que al modificar éstas para homogeneizarlas con ICAFIR, no podemos hacer uso de este módulo.



### 6.5.2. Propuesta de materiales del firme para el TFG

En la tabla que aparece a continuación se determina la caracterización mecánica de todos los materiales utilizados en la composición del firme:

MATERIAL	E (Mpa)	Coef. Poisson
MBC -Semidensa	6000	0,33
Zahorra Artificial	max 500	0,35

Cuando se selecciona el material ‘Zahorra Artificial’ en el programa ICAFIR, el módulo elástico se proporcionará por tongadas, tal y cómo se expuso en el apartado 6.4.2.1.1. Por lo que su valor quedará condicionado a cada estructura del firme dimensionada. En los otros programas, WESLEA y DEPAV (Análisis 1 y 3), se empleará el mismo módulo por tongada dado por el programa ICAFIR (Análisis 2).

Para los Firmes Flexibles analizados, con carácter general, a la hora de dimensionar las capas de Mezcla Bituminosa con el programa de diseño ICAFIR, se respetarán los rangos de espesores propuestos para cada capa (Base, Intermedia y Rodadura) por la ‘Tabla 6’ de la Norma 6.1 (Tabla 28). En las tres capas se puede proyectar material tipo Mezcla Bituminosa Semidensa (MB-S) por lo que no se incurre en ningún error dimensionar únicamente con este tipo de mezcla.

En el Análisis 2, no se tendrán en cuenta las variaciones de Temperatura en el cálculo ni la acumulación de daño impuesta por las leyes de Miller, análogamente se considerará en el cálculo de ICAFIR una zona térmica de proyecto ZT1 (Temperatura máxima menor o igual que 30°C y mínima mayor o igual que -8°C). Tampoco se considerarán tramos de pendiente igual o superior a 5% por lo que no se ajustarán los parámetros elásticos que impone la Instrucción.

TABLA 6. ESPESOR DE CAPAS DE MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA (*)	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
		T00 a T1	T2 y T31	T32 y T4 (T41 y T42)
Rodadura	PA	4		
	M	3	2-3	
	F			
	D y S		6-5	5
Intermedia	D y S	5-10(**)		
Base	S y G	7-15		
	MAM	7-13		

(\*) Ver definiciones en tabla 5 o artículos 542 y 543 del PG-3.

(\*\*) Salvo en arcenes, para los que se seguirá lo indicado en el apartado 7.

Tabla 28 Espesores dados por la Norma 6.1 IC para Mezclas Bituminosas (Tabla 6) (Fomento., 2003)

Sin embargo, en la eventualidad del análisis de estructuras con un número elevado de capas, se asume la limitación del número de capas en los otros programas (5 para WESLEA y 6 para DEPAV), mediante la unión de capas Intermedia y Base en un mismo espesor de Mezcla Bituminosa y la Capa de Rodadura se mantendrá de manera independiente. Los cambios que producen estas consideraciones de ‘unión’ de capas asfálticas en el modelo de cálculo merecen ser objeto de un estudio pormenorizado en otro tipo de TFG y se propone en el apartado como nueva línea de trabajo.



## 7. SECCIONES DE ESTUDIO (Fase 4)

### 7.1. Secciones de firme elegida

Las Figuras 2.1 y 2.2 de la Norma 6.1 IC recogen las secciones de firme según la categoría de tráfico de vehículos pesados y la categoría de explanada. Todos los espesores de capa señalados se considerarán mínimos en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto.

Las soluciones del catálogo a estudiar en el TFG serán las de Firmes Flexibles y Tráficos bajos (T3 y T4). Se han elegido este tipo de soluciones a decisión del tutor por ser el grueso del tráfico que se produce en la Red de Carreteras de Andalucía.

No se incluyen los firmes semirrígidos por presentar estructuras que pueden fallar por tracciones en la base y que merece un estudio pormenorizado que se propone en el apartado 9.2 como nueva línea de trabajo.

Ocurre lo mismo con firmes rígidos con pavimento de hormigón, obteniendo limitaciones de los programas respecto al cálculo (empleo de otro tipo de modelos analíticos como el modelo Westergaard) por lo que su estudio también queda apartado para una nueva línea de trabajo (apartado 9.2).

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T31	T32	T41	T42
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	3111 MB 20 ZA 40	3211 MB 18 ZA 40	4111 MB 10 <sup>1)</sup> ZA 40	4211 MB 5 <sup>1)</sup> ZA 35
	E2	3121 MB 16 ZA 40	3221 MB 14 ZA 35	4121 MB 10 <sup>1)</sup> ZA 30	4221 MB 5 <sup>1)</sup> ZA 25
	E3	3131 MB 14 ZA 25	3231 MB 12 ZA 20	4131 MB 10 <sup>1)</sup> ZA 20	4231 MB 5 <sup>1)</sup> ZA 20

Esposores mínimos en cm

MB Mezclas bituminosas HE Hormigón de firme SC Suelocemento ZA Zahorra artificial

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravamulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

**Nota 1:** Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

**Nota 2:** En la categoría de tráfico pesado T42 con tráficos de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/carril/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

Ilustración 25 Secciones de Catálogo de Firme de la Figura 2.2 de la Norma 6.1 IC que se emplearán para el análisis

En total se analizarán 12 secciones de firmes flexibles de un total de 59 dadas en catálogo, siendo un 20.33 % de las secciones. El resto de secciones se dejan abiertas para nuevas líneas de trabajo en el apartado 9.2.

### 7.2. Estructuras completas

En este apartado se exponen las estructuras de firme flexibles que se analizarán, incluyendo el cimiento propuesto en el TFG, empleando como plantilla las Figura 2.2 de la Norma.

Ilustración 26 Estructuras del firme flexible a analizar de la Norma 6.1 IC para Tráfico elevado (Figura 2.1)

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T31	T32	T41	T42
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	<b>3111</b> MB 20 ZA 40 min 100 1	<b>3211</b> MB 18 ZA 40 min 100 1	<b>4111</b> MB 10 <sup>(1)</sup> ZA 40 min 100 1	<b>4211</b> MB 5 <sup>(1)</sup> ZA 35 min 100 1
	E2	<b>3121</b> MB 16 ZA 40 min 100 3	<b>3221</b> MB 15 ZA 35 min 100 3	<b>4121</b> MB 10 <sup>(1)</sup> ZA 30 min 100 3	<b>4221</b> MB 5 <sup>(1)</sup> ZA 25 min 100 3
	E3	<b>3131</b> MB 16 ZA 25 S-EST3 30 1	<b>3231</b> MB 15 ZA 20 S-EST3 30 1	<b>4131</b> MB 10 <sup>(1)</sup> ZA 20 S-EST3 30 1	<b>4231</b> MB 5 <sup>(1)</sup> ZA 20 S-EST3 30 1

Espesores mínimos en cm

MB Mezclas bituminosas    HF Hormigón de firme    SC Suelocemento    ZA Zahorra artificial  
 1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)    2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)    S-EST3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Ilustración 27 Estructuras del firme a analizar de la Norma 6.1 IC para Tráfico Bajo (Figura 2.2)

## 8. ANÁLISIS DE SECCIONES DE LA NORMA 6.1 IC. (Fase 5)

Los análisis de las estructuras del Firme se harán en tres fases o análisis:

### **a) Análisis Tipo 1 (Fase 5.1). Estudio de la seguridad estructural mediante aplicación WESLEA y DEPAV mediante la modelización de las soluciones del catálogo como un Multicapa completo.**

Para los Tráficos de Proyecto en sus cuatro hipótesis (C1, C2, C3 y V4) por la Norma para soluciones de Firmes Flexibles para categorías bajas de tráfico (T31, T32, T41 y T42, Figura 2.2 de la Norma 6.1 IC,  $IMDp < 200$ ).

Los resultados se aportarán en el ANEJO VII y ANEJO VIII.

### **b) Análisis Tipo 2 (Fase 5.2). Estudio de la seguridad estructural de secciones del firme mediante aplicación informática ICAFIR.**

Para los Tráficos de Proyecto en sus cuatro hipótesis (C1, C2, C3 y V4) por la Norma para soluciones Flexibles para tráfico bajo al igual que en el Análisis Tipo 1.

En este análisis se tendrá en cuenta lo discutido en el apartado 6.4 sobre la limitación del cimiento de la estructura.

Los resultados se aportarán en el ANEJO IX

### **c) Análisis Tipo 3. (Fase 5.3). Estudio de la seguridad estructural entre secciones del firme mediante aplicación WESLEA y DEPAV.**

Comparación de soluciones del cálculo tenso-deformacional dadas por las aplicaciones informáticas WESLEA y DEPAV modelando el cimiento como una única capa, del macizo indefinido caracterizado mecánicamente tal y cómo se definió en el apartado 6.3.

Se trata por tanto de una comparación entre los cálculos tenso-deformacionales que llevan a cabo los programas ICAFIR, WESLEA y DEPAV, siendo:

ICAFIR, programa que utiliza el modelo de Burmister que se comentó en el Capítulo 4.

WESLEA, programa que emplea el algoritmo de Van Cauwelaert y modificado posteriormente por R. Alexander en la US Army Engineer Waterways Experiment Station.

DEPAV, programa que emplea un modo de cálculo que simula el Alize III.

Los Factores de Seguridad aportados [ $FS = N_{admisible} / N_{diseño}$  ( $N_{diseño} = \text{Tráfico de Proyecto}$ )] tendrán una incertidumbre asociada al proceso interno de cálculo de cada programa que no se podrá valorar debido a no disponer del código de la aplicación informática (establecimiento de las condiciones de contorno, redondeos...etc). Además, también se induce una incertidumbre de la inequivalencia del cimiento con la Norma 6.1 ya discutida en el apartado 6.4.

Para los Tráficos de Proyecto en sus cuatro hipótesis (C1, C2, C3 y V4) por la Norma para soluciones Flexibles para tráfico bajo al igual que en el Análisis Tipo 1 y secciones flexibles.

En el ANEJO X se darán los resultados para WESLEA.

En el ANEJO XI se proporcionarán los resultados de DEPAV en este tercer análisis.



## 8.1. Análisis Tipo 1 (Fase 5.1)

### Fases del Análisis Tipo 1

- (1) El primer paso es el cálculo mediante las aplicaciones WESLEA y DEPAV de la deformación horizontal ( $\epsilon_t$ ) en la fibra inferior del asfalto y la deformación vertical ( $\epsilon_z$ ) en el plano de explanada.
- (2) Se obtendrá las deformaciones máximas que admiten los criterios de deterioro para el Hipótesis de crecimiento 1 (C1), LI.
- (3) Se compararán las deformaciones anteriores mediante un cociente y se establecerá como criterio de fallo de la estructura (agrietamiento o hundimiento), aquella cuyo Cociente sea más cercano a 1 o éste por encima (compárese los Cocientes de Agrietamiento/Hundimiento por aplicación informática). En caso de que las aplicaciones informáticas no coincidieran en tener un Cociente mayor en el mismo tipo de fallo (ej. WESLEA da fallo para AGRIETAMIENTO y DEPAV lo diese para HUNDIMIENTO) se hará un comentario aparte expresando dicha discrepancia entre métodos.
- (4) Se adjuntará una matriz con los factores de seguridad calculados.
- (5) Al final del apartado de cada grupo de secciones asociadas a la Categoría de Tráfico (T31, T32, T41 y T42) se añadirá unas gráficas con los valores de los Factores de Seguridad obtenidos.

### 8.1.1. Categoría de Tráfico T31

#### 3131: Fallo por agrietamiento

3131						ANÁLISIS 1				
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)				
3131						Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV		
						Nadm	615.610		4.151.348	
						Nd				
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO						C1 LS	1.170.647	<b>0,53</b>	<b>3,55</b>	
Tipo de fallo: agrietamiento (N)						C2 LS	1.294.615	<b>0,48</b>	<b>3,21</b>	
Tipo de fallo: Hundimiento (N)						C3 LS	1.434.708	<b>0,43</b>	<b>2,89</b>	
						V4 LS	1.181.799	<b>0,52</b>	<b>3,51</b>	
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV		Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
$\epsilon_t$	-1,83E-04	-1,09E-04	$\epsilon_z$	1,36E-04	1,81E-04	C1 LI	585.324	<b>1,05</b>	<b>7,09</b>	
$\epsilon_{tmax}$ C1 LI	1,86E-04	1,86E-04	$\epsilon_{zmax}$ C1 LI	5,24E-04	5,24E-04	C2 LI	647.307	<b>0,95</b>	<b>6,41</b>	
Cociente	0,99	0,59	Cociente	0,26	0,35	C3 LI	717.354	<b>0,86</b>	<b>5,79</b>	
						V4 LI	590.899	<b>1,04</b>	<b>7,03</b>	

Tabla 29 Resultados Análisis Tipo 1 para 3131

3121: Fallo por agrietamiento

3121						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						ε	2,0965E-04	-1,2200E-04	
						Nadm	375.247	2.745.182	
						Nd			
						C1 LS	1.170.647	<b>0,32</b>	<b>2,35</b>
						C2 LS	1.294.615	<b>0,29</b>	<b>2,12</b>
						C3 LS	1.434.708	<b>0,26</b>	<b>1,91</b>
						V4 LS	1.181.799	<b>0,32</b>	<b>2,32</b>
						C1 LI	585.324	<b>0,64</b>	<b>4,69</b>
						C2 LI	647.307	<b>0,58</b>	<b>4,24</b>
						C3 LI	717.354	<b>0,52</b>	<b>3,83</b>
						V4 LI	590.899	<b>0,64</b>	<b>4,65</b>
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
εt	2,10E-04	-1,22E-04	εZ	3,87E-04	1,97E-05				
εtmax C1 LI	1,86E-04	1,86E-04	εzmax C1 LI	5,24E-04	5,24E-04				
Cociente	1,13	- 0,66	Cociente	0,74	0,04				

Tabla 30 Resultados Análisis Tipo 1 para 3121

3111: Fallo por agrietamiento por DEPAV y error en WESLEA

3111						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: Hundimiento (N)			
						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						ε	0,0000E+00	3,2000E-04	
						Nadm	-	3.413.719	
						Nd			
						C1 LS	1.170.647	<b>0,00</b>	<b>2,92</b>
						C2 LS	1.294.615	<b>0,00</b>	<b>2,64</b>
						C3 LS	1.434.708	<b>0,00</b>	<b>2,38</b>
						C4 LS	1.181.799	<b>0,00</b>	<b>2,89</b>
						C1 LI	585323,64	<b>0,00</b>	<b>5,83</b>
						C2 LI	647.307	<b>0,00</b>	<b>5,27</b>
						C3 LI	717.354	<b>0,00</b>	<b>4,76</b>
						C4 LI	590.899	<b>0,00</b>	<b>5,78</b>
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
εt	-1,67E-04	-1,07E-04	εZ	0,00E+00	3,20E-04				
εtmax C1 LI	1,86E-04	1,86E-04	εzmax C1 LI	5,24E-04	5,24E-04				
Cociente	- 0,90	- 0,58	Cociente	-	0,61				

Tabla 31 Resultados Análisis Tipo 1 para 3111

Como se puede observar en las tablas anteriores, existe una gran diferencia entre las aplicaciones informáticas WESLEA y DEPAV.

Los valores dados por WESLEA son muy bajos, por debajo de uno para la mayor parte de los casos, por lo que su análisis queda descartado.

Los resultados dados por DEPAV dan valores entre 2 y 3 para Límites Inferiores y 4 y 7 para Límites Inferiores.

Mientras que las secciones 3131 y 3121 fallarían por agrietamiento de la Mezcla Bituminosa, la sección fallaría por hundimiento, aunque el fallo por agrietamiento también sería a las pocas repeticiones de carga más.



### 8.1.2. Categoría de Tráfico T32

#### 3231: Fallo por agrietamiento

3231						ANÁLISIS 1			
3231						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
3231						Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	
						$\epsilon$	-1,9565E-04	-1,1500E-04	
						Nadm	483.607	3.410.106	
						Nd			
						C1 LS	585.324	<b>0,83</b>	<b>5,83</b>
						C2 LS	647.307	<b>0,75</b>	<b>5,27</b>
						C3 LS	717.354	<b>0,67</b>	<b>4,75</b>
						V4 LS	590.899	<b>0,82</b>	<b>5,77</b>
						C1 LI	292.662	<b>1,65</b>	<b>11,65</b>
						C2 LI	323.654	<b>1,49</b>	<b>10,54</b>
						C3 LI	358.677	<b>1,35</b>	<b>9,51</b>
						V4 LI	295.450	<b>1,64</b>	<b>11,54</b>

ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO					
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)		
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV
$\epsilon t$	-1,96E-04	-1,15E-04	$\epsilon Z$	1,68E-04	8,43E-05
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,24E-04	2,24E-04	$\epsilon z_{max}$ C1 LI	2,24E-04	2,24E-04
Cociente	0,87	0,51	Cociente	0,75	0,38

Tabla 32 Resultados Análisis Tipo 1 para 3231

#### 3221: Fallo por agrietamiento

3221						ANÁLISIS 1			
3221						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
3221						Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	
						$\epsilon$	2,3360E-04	-1,3000E-04	
						Nadm	252.276	2.174.309	
						Nd			
						C1 LS	585.324	<b>0,43</b>	<b>3,71</b>
						C2 LS	647.307	<b>0,39</b>	<b>3,36</b>
						C3 LS	717.354	<b>0,35</b>	<b>3,03</b>
						V4 LS	590.899	<b>0,43</b>	<b>3,68</b>
						C1 LI	292.662	<b>0,86</b>	<b>7,43</b>
						C2 LI	323.654	<b>0,78</b>	<b>6,72</b>
						C3 LI	358.677	<b>0,70</b>	<b>6,06</b>
						V4 LI	295.450	<b>0,85</b>	<b>7,36</b>

ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO					
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)		
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV
$\epsilon t$	2,34E-04	-1,30E-04	$\epsilon Z$	4,63E-04	2,30E-04
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,24E-04	2,24E-04	$\epsilon z_{max}$ C1 LI	6,37E-04	6,37E-04
Cociente	1,04	0,58	Cociente	0,73	0,36

Tabla 33 Resultados Análisis Tipo 1 para 3221

#### 3211: Fallo por hundimiento por DEPAV y error en WESLEA

3211						ANÁLISIS 1			
3211						Tipo de fallo: Hundimiento (N)			
3211						Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	
						$\epsilon$	0,0000E+00	3,5500E-04	
						Nadm	-	2,3563E+06	
						Nd			
						C1 LS	585.324	<b>0,00</b>	<b>4,03</b>
						C2 LS	647.307	<b>0,00</b>	<b>3,64</b>
						C3 LS	717.354	<b>0,00</b>	<b>3,28</b>
						V4 LS	590.899	<b>0,00</b>	<b>3,99</b>
						C1 LI	292.662	<b>0,00</b>	<b>8,05</b>
						C2 LI	323.654	<b>0,00</b>	<b>7,28</b>
						C3 LI	358.677	<b>0,00</b>	<b>6,57</b>
						V4 LI	295.450	<b>0,00</b>	<b>7,98</b>

ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO					
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)		
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV
$\epsilon t$	-2,15E-04	-1,20E-04	$\epsilon Z$	0,00E+00	3,55E-04
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,24E-04	2,24E-04	$\epsilon z_{max}$ C1 LI	6,37E-04	6,37E-04
Cociente	0,96	0,53	Cociente	-	0,56

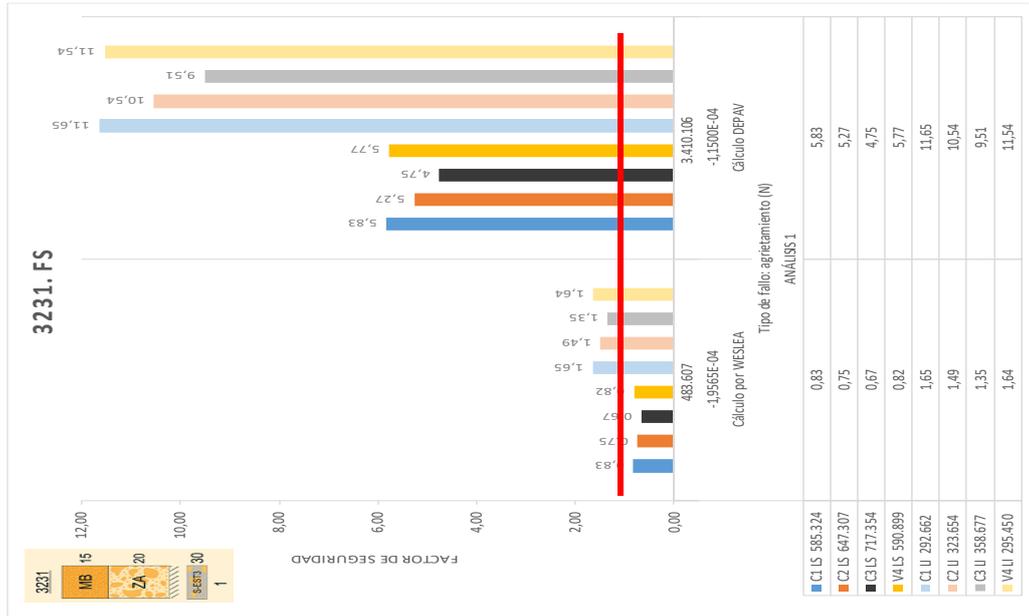
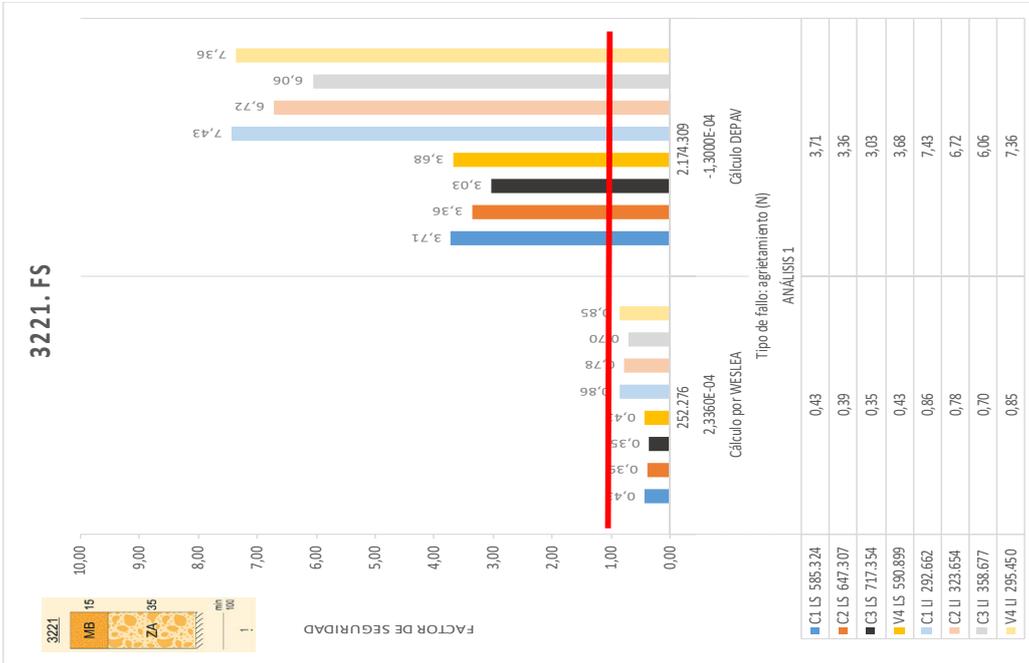
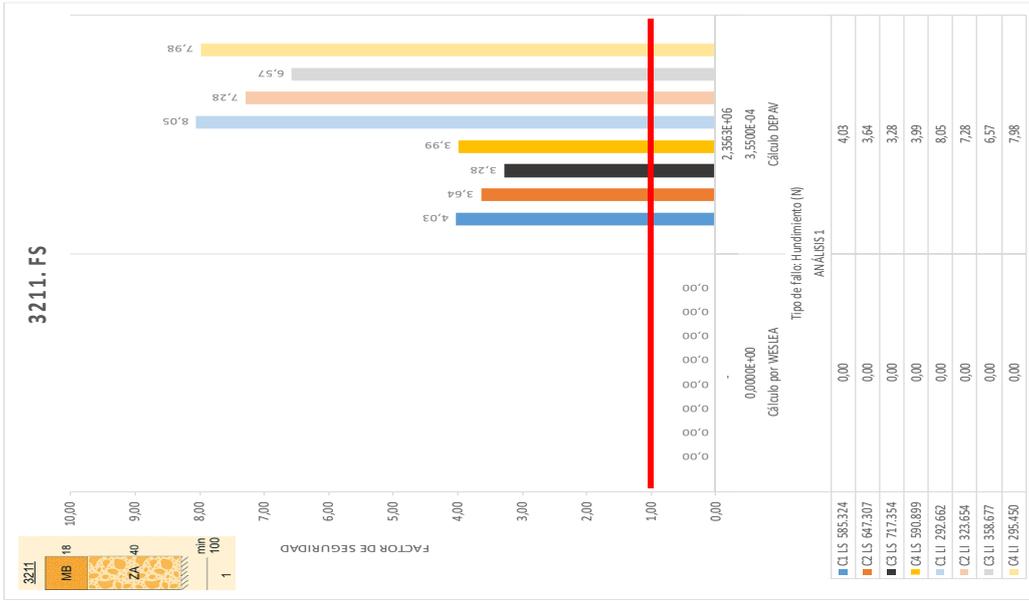
3211					ANÁLISIS 1			
					Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
					Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	
					$\epsilon$	-2,1518E-04	-1,2000E-04	
					Nadm	341.046	2.916.899	
					Nd			
					C1 LS	585.324	<b>0,58</b>	<b>4,98</b>
					C2 LS	647.307	<b>0,53</b>	<b>4,51</b>
					C3 LS	717.354	<b>0,48</b>	<b>4,07</b>
					V4 LS	590.899	<b>0,58</b>	<b>4,94</b>
					C1 LI	292.662	<b>1,17</b>	<b>9,97</b>
					C2 LI	323.654	<b>1,05</b>	<b>9,01</b>
					C3 LI	358.677	<b>0,95</b>	<b>8,13</b>
					V4 LI	295.450	<b>1,15</b>	<b>9,87</b>
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO								
Tipo de fallo: agrietamiento (N)				Tipo de fallo: Hundimiento (N)				
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV		Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV		
$\epsilon t$	-2,15E-04	-1,20E-04		$\epsilon Z$	0,00E+00	3,55E-04		
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,24E-04	2,24E-04		$\epsilon z_{max}$ C1 LI	6,37E-04	6,37E-04		
Cociente	0,96	0,53		Cociente	-	0,56		

Tabla 34 Resultados Análisis Tipo 1 para 3211

En el multicapa WESLEA obtiene valores bajos, para los Límites Superiores impuestos en el Tráfico de Proyecto.

Para DEPAV, los valores de los Coeficientes de Seguridad están del lado de la seguridad y además son parecidos entre unas soluciones estructurales y otras. La capacidad estructural mayor sería la solución de mejor explanada, seguida de la de explanada E1 y siendo la solución de compromiso (3221) la que arroja valores ligeramente menores.

Los resultados en el 3211 dan valores muy parecidos de fallo por hundimiento y agrietamiento



8.1.3. Categoría de Tráfico T41

4131: Fallo por agrietamiento

4131						ANÁLISIS 1	
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)	
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV					
$\epsilon$				2,2567E-04	-1,6000E-04		
Nadm				286.374	1.014.642		
Nd							
C1 LS	266.056			<b>1,08</b>	<b>3,81</b>		
C2 LS	294.231			<b>0,97</b>	<b>3,45</b>		
C3 LS	326.070			<b>0,88</b>	<b>3,11</b>		
V4 LS	262.962			<b>1,09</b>	<b>3,86</b>		
C1 LI	133.028			<b>2,15</b>	<b>7,63</b>		
C2 LI	147.115			<b>1,95</b>	<b>6,90</b>		
C3 LI	163.035			<b>1,76</b>	<b>6,22</b>		
V4 LI	244.798			<b>1,17</b>	<b>4,14</b>		

ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO					
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)		
	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
$\epsilon t$	2,26E-04	-1,60E-04	$\epsilon Z$	2,17E-04	1,13E-04
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,78E-04	2,78E-04	$\epsilon z_{max}$ C1 LI	7,94E-04	7,94E-04
Cociente	0,81	- 0,58	Cociente	0,27	0,14

Tabla 35 Resultados Análisis Tipo 1 para 4131

4121: Fallo por agrietamiento

4121						ANÁLISIS 1	
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)	
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV					
$\epsilon$				2,6042E-04	-1,7700E-04		
Nadm				169.733	700.393		
Nd							
C1 LS	266.056			<b>0,64</b>	<b>2,63</b>		
C2 LS	294.231			<b>0,58</b>	<b>2,38</b>		
C3 LS	326.070			<b>0,52</b>	<b>2,15</b>		
V4 LS	262.962			<b>0,65</b>	<b>2,66</b>		
C1 LI	133.028			<b>1,28</b>	<b>5,27</b>		
C2 LI	147.115			<b>1,15</b>	<b>4,76</b>		
C3 LI	163.035			<b>1,04</b>	<b>4,30</b>		
V4 LI	244.798			<b>0,69</b>	<b>2,86</b>		

ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO					
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)		
	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
$\epsilon t$	2,60E-04	-1,77E-04	$\epsilon Z$	5,95E-04	3,40E-04
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,78E-04	2,78E-04	$\epsilon z_{max}$ C1 LI	7,94E-04	7,94E-04
Cociente	0,94	- 0,64	Cociente	0,75	0,43

Tabla 36 Resultados Análisis Tipo 1 para 4121

4111: Fallo por hundimiento por DEPAV y error por WESLEA

4111						ANÁLISIS 1	
						Tipo de fallo: Hundimiento (N)	
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV					
$\epsilon$				0,0000E+00	5,6200E-04		
Nadm				-	538.525		
Nd							
C1 LS	266.056			<b>0,00</b>	<b>2,02</b>		
C2 LS	294.231			<b>0,00</b>	<b>1,83</b>		
C3 LS	326.070			<b>0,00</b>	<b>1,65</b>		
V4 LS	262.962			<b>0,00</b>	<b>2,05</b>		
C1 LI	133.028			<b>0,00</b>	<b>4,05</b>		
C2 LI	147.115			<b>0,00</b>	<b>3,66</b>		
C3 LI	163.035			<b>0,00</b>	<b>3,30</b>		
V4 LI	244.798			<b>0,00</b>	<b>2,20</b>		

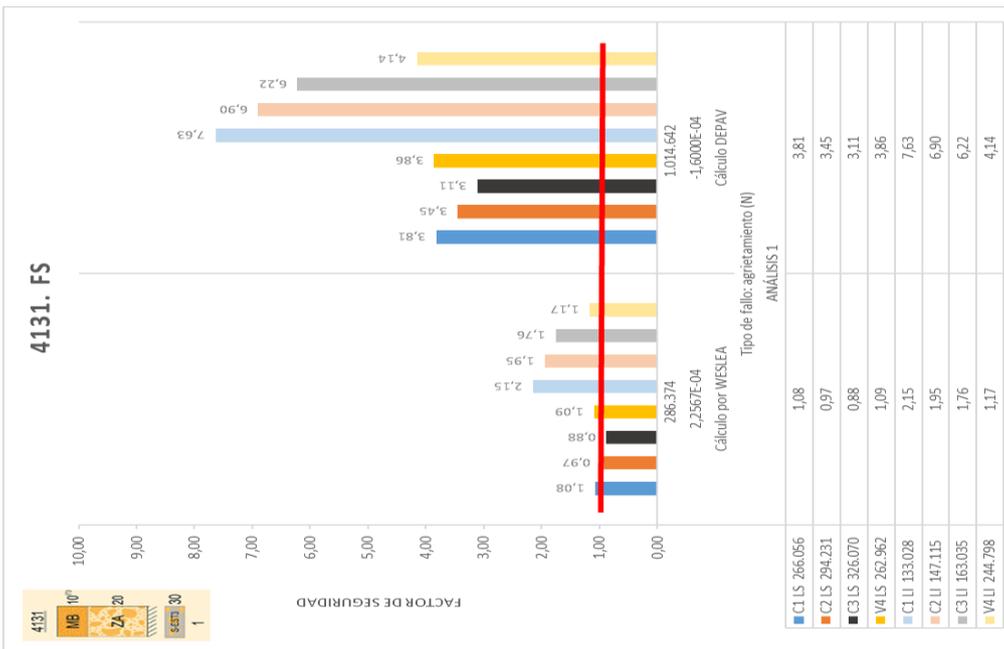
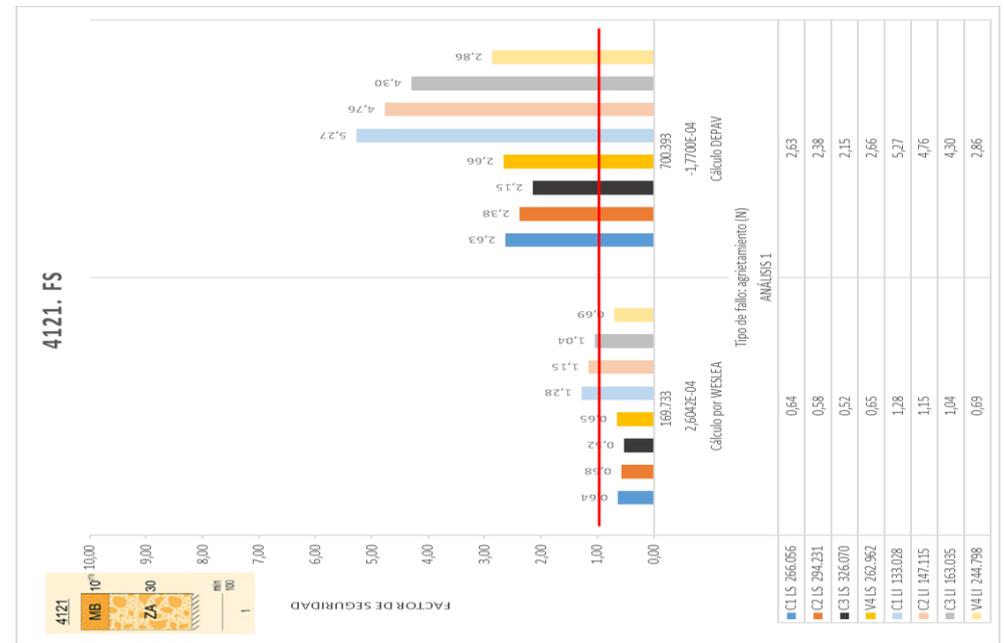
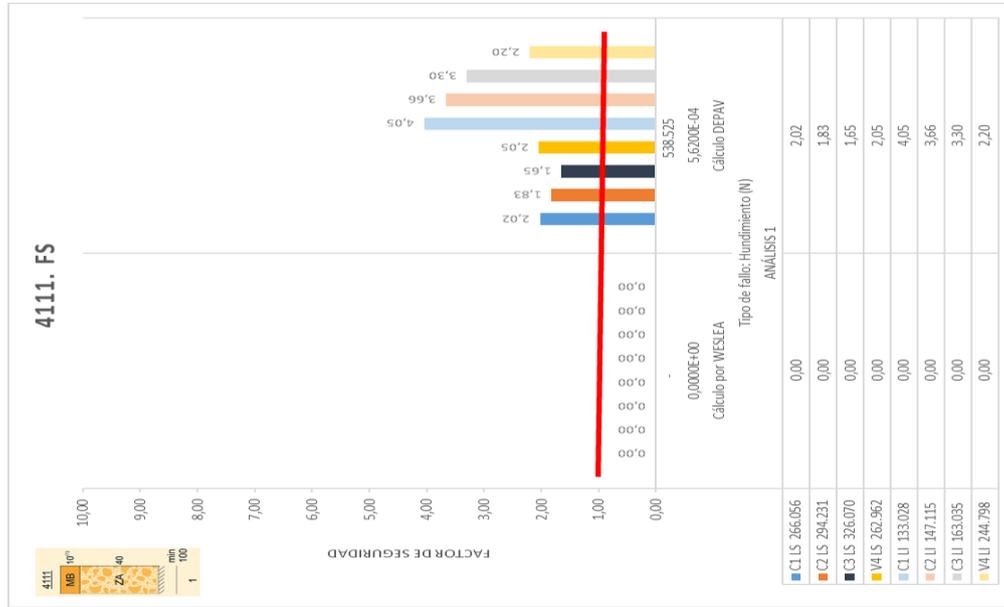
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO					
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)		
	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
$\epsilon t$	-2,89E-04	-1,90E-04	$\epsilon Z$	0,00E+00	5,62E-04
$\epsilon t_{max}$ C1 LI	2,78E-04	2,78E-04	$\epsilon z_{max}$ C1 LI	7,94E-04	7,94E-04
Cociente	1,04	- 0,68	Cociente	-	0,71

4111						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
4121						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						Nadm	115.612	538.525	
						Nd			
						C1 LS	266.056	<b>0,43</b>	<b>2,02</b>
						C2 LS	294.231	<b>0,39</b>	<b>1,83</b>
						C3 LS	326.070	<b>0,35</b>	<b>1,65</b>
						V4 LS	262.962	<b>0,44</b>	<b>2,05</b>
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
εt	-2,89E-04	-1,90E-04	εZ	0,00E+00	5,62E-04	C1 LI	133.028	<b>0,87</b>	<b>4,05</b>
εtmax C1 LI	2,78E-04	2,78E-04	εzmax C1 LI	7,94E-04	7,94E-04	C2 LI	147.115	<b>0,79</b>	<b>3,66</b>
Cociente	- 1,04	- 0,68	Cociente	-	0,71	C3 LI	163.035	<b>0,71</b>	<b>3,30</b>
						V4 LI	244.798	<b>0,47</b>	<b>2,20</b>

Tabla 37 Resultados Análisis Tipo 1 para 4111

Los valores de WESLEA siguen siendo bajos, mientras que los dados por DEPAV dan factores de seguridad admisibles y en general algo menores a los dados para Categorías T31 y T32.

Los resultados en el 4111 dan valores muy parecidos de fallo por hundimiento y agrietamiento



8.1.4. Categoría de Tráfico T42

4231: Fallo por agrietamiento

4231						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						ε	-1,9251E-04	-2,0800E-04	
						Nadm	514.560	387.315	
						Nd			
						C1 LS	133.028	3,87	2,91
						C2 LS	147.115	3,50	2,63
						C3 LS	163.035	3,16	2,38
						V4 LS	134.295	3,83	2,88
						C1 LI			
						C2 LI			
						C3 LI			
						V4 LI			
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
εt	-1,93E-04	-2,08E-04	εZ	2,94E-04	3,09E-04				
etmax C1 LS	2,78E-04	2,78E-04	ezmax C1 LS	7,94E-04	7,94E-04				
Cociente	- 0,69	- 0,75	Cociente	0,37	0,39				

Tabla 38 Resultados Análisis Tipo 1 para 4231

4221: Fallo por agrietamiento para DEPAV y fallo por Hundimiento para WESLEA

4221						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						ε	2,4107E-04	-2,2400E-04	
						Nadm	225.345	295.070	
						Nd			
						C1 LS	133.028	1,69	2,22
						C2 LS	147.115	1,53	2,01
						C3 LS	163.035	1,38	1,81
						V4 LS	134.295	1,68	2,20
						C1 LI			
						C2 LI			
						C3 LI			
						V4 LI			
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
εt	2,41E-04	-2,24E-04	εZ	1,00E-03	5,19E-04				
etmax C1 LS	2,78E-04	2,78E-04	ezmax C1 LS	7,94E-04	7,94E-04				
Cociente	0,87	- 0,81	Cociente	1,26	0,65				

4221						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: Hundimiento (N)			
						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						ε	1,0004E-03	5,1900E-04	
						Nadm	58.242	606.968	
						Nd			
						C1 LS	133.028	0,44	4,56
						C2 LS	147.115	0,40	4,13
						C3 LS	163.035	0,36	3,72
						V4 LS	134.295	0,43	4,52
						C1 LI			
						C2 LI			
						C3 LI			
						V4 LI			
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
εt	2,41E-04	-2,24E-04	εZ	1,00E-03	5,19E-04				
etmax C1 LS	2,78E-04	2,78E-04	ezmax C1 LS	7,94E-04	7,94E-04				
Cociente	0,87	- 0,81	Cociente	1,26	0,65				

Tabla 39 Resultados Análisis Tipo 1 para 4221

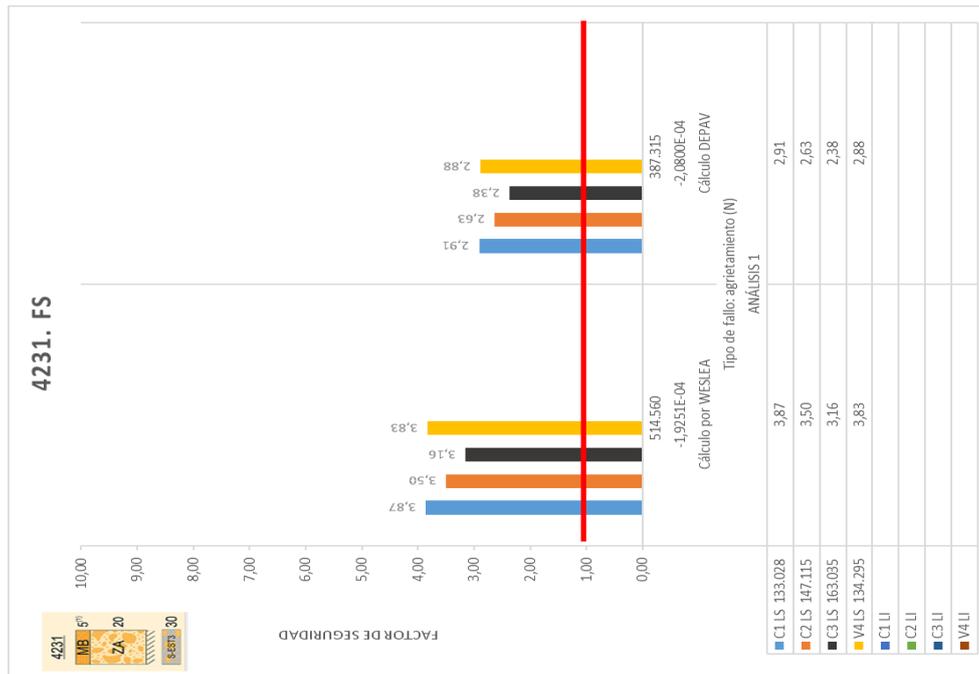
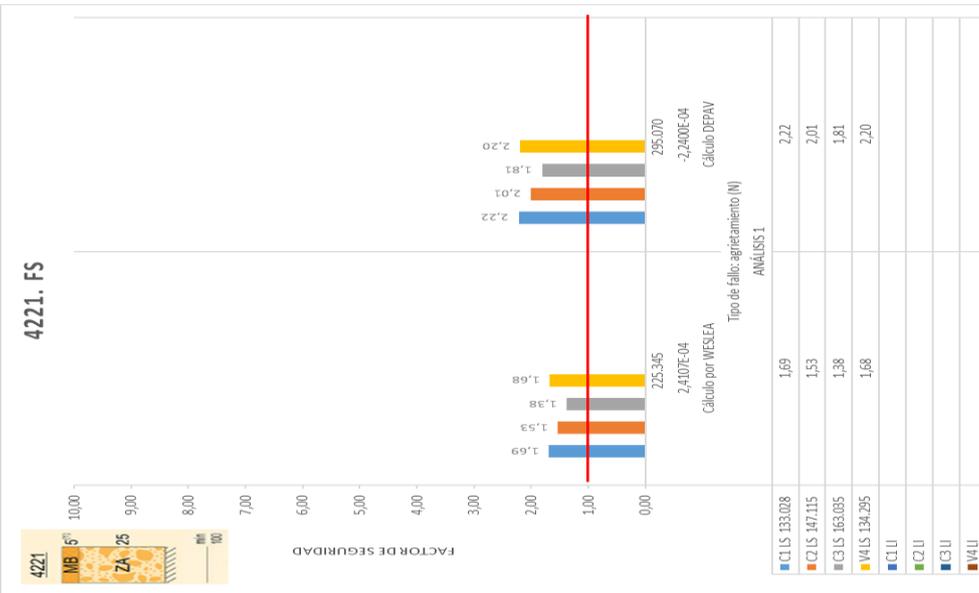
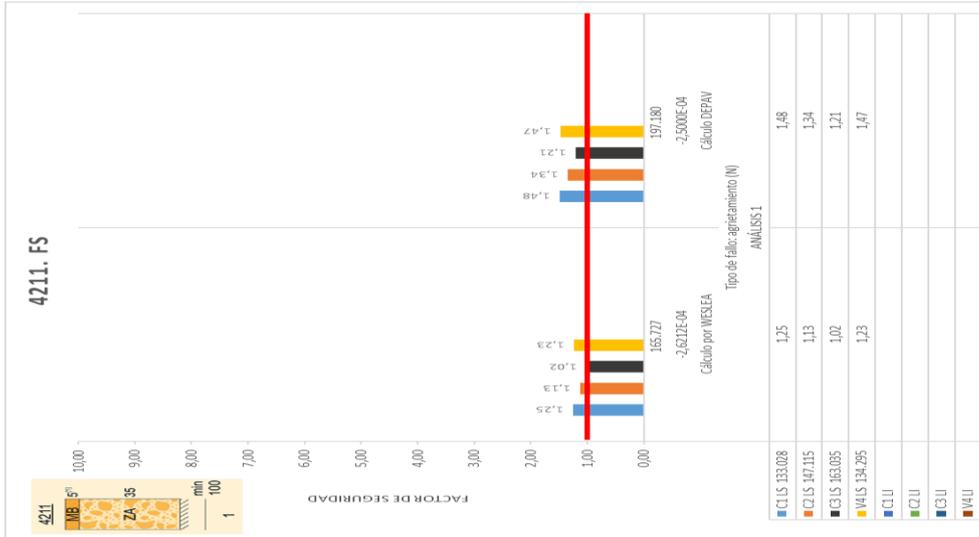
4211: Fallo por agrietamiento para DEPAV y fallo por hundimiento para WESLEA

4211						ANÁLISIS 1			
						Tipo de fallo: agrietamiento (N)			
4211						Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV		
						Nadm	165.727	197.180	
						Nd			
						C1 LS	133.028	<b>1,25</b>	<b>1,48</b>
						C2 LS	147.115	<b>1,13</b>	<b>1,34</b>
						C3 LS	163.035	<b>1,02</b>	<b>1,21</b>
						V4 LS	134.295	<b>1,23</b>	<b>1,47</b>
						C1 LI			
						C2 LI			
						C3 LI			
						V4 LI			
ANÁLISIS 1. TIPOLOGÍA DE FALLO									
Tipo de fallo: agrietamiento (N)			Tipo de fallo: Hundimiento (N)						
Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV	Cálculo por WESLEA		Cálculo DEPAV				
$\epsilon_t$	-2,62E-04	-2,50E-04	$\epsilon_Z$	1,75E-03	1,48E-04				
$\epsilon_{tmax}$ C1 LS	2,78E-04	2,78E-04	$\epsilon_{Zmax}$ C1 LS	7,94E-04	7,94E-04				
Cociente	- 0,94	- 0,90	Cociente	2,21	0,19				

Tabla 40 Resultados Análisis Tipo 1 para 4211

En este apartado por no tener Límite Inferiores en la Hipótesis de Tráfico, se tomarán las deformaciones máximas para el C1 Límite Superior, pero que no supone ningún cambio de tipo conceptual.

Los valores para WESLEA no son válidos mientras que los aportados por DEPAV se encuentran entre 2 y 4.5.



## 8.2. Estudio de la homogenización de variables para los Análisis Tipo 2 y 3. (Fase 5.2)

Una vez analizadas las secciones flexibles del catálogo con DEPAV y WESLEA, se van a analizar las soluciones flexibles de tráfico bajo T3 y T4 con los programas ICAFIR (Análisis Tipo 2) y WESLEA y DEPAV (Análisis Tipo 3) bajo los mismos valores de todas las variables de estudio desarrolladas en la Fase 3, y haciendo especial énfasis sobre la discusión de limitación de explanada llevada a cabo en la Fase 3.d.

Tal y como se comentó al principio del capítulo, se analizarán los factores de seguridad de las soluciones del firme con los criterios de fallo propuestos por la Instrucción andaluza, y el cálculo de deformación se realizará con ICAFIR, WESLEA y DEPAV.

En el Análisis Tipo 2 se considerarán las calidades de cemento y materiales dados en la Fase 3d.

En el Análisis Tipo 3 se introducirán esos mismos valores de explanada y materiales dados por la Fase 3d en los programas WESLEA y DEPAV.

A continuación, y para demostrar la homogeneización de modelos entre programas, se exponen cómo se introducen las variables de entrada en cada uno de ellos:

### ▪ ICAFIR

La carga tipo viene dada en la Instrucción definida como:

P [tn]	6,5
R [cm]	11,35
q [Mpa]	0,8
d [cm]	37,5

- Se evaluarán las deformaciones de tracción en la Mezcla Bituminosa para las tres cargas tipo que devuelve el programa

$\epsilon_t$ (1)	$\epsilon_t$ (2)	$\epsilon_t$ (3)
(1) Bajo rueda simple	(2) Bajo una de las ruedas gemelas	(3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.

Y la mayor deformación se introducirá en el criterio de fallo por agrietamiento.

- Se evaluarán las deformaciones verticales para las tres cargas tipo del programa.

$\epsilon_v$ (1)	$\epsilon_v$ (2)	$\epsilon_v$ (3)
(1) Bajo rueda simple	(2) Bajo una de las ruedas gemelas	(3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.

Y la mayor se introducirá en el criterio de fallo por hundimiento.

Con carácter general, se considerará adherencia total entre capas.

No se considerará cambio estacional en las mezclas bituminosas.

### ▪ WESLEA

Las carga tipo se puede introducir manualmente y será la que propone ICAFIR

	X	Y	P [kN]	q [MPa]
Load 1	0	0	65	0.8
Load 2	37.5	0		

- Se evaluarán las deformaciones de tracción en la Mezcla Bituminosa y las deformaciones verticales en la fibra superior de la capa correspondiente al cimiento, bajo rueda (0,0) y bajo el centro de dos ruedas gemelas (18.75,0).

Sección (X)X X 1				Epsilon (Microstrain)	
				Y	Z
Bajo una de las ruedas del eje gemelo	X=0	Y=0	Z= fibra inferior MB	VALOR	
	X=18.5	Y=0	Z= fibra inferior MB	VALOR	
Bajo el centro entre ruedas gemelas	X=0	Y=0	Z= fibra superior cimiento		VALOR
	X=18.5	Y=0	Z= fibra superior cimiento		VALOR

Para modelizar la adherencia entre capas tendrá que introducirse el valor uno (1) en la casilla designada para ello (Full-Adhesion)

- DEPAV

Se introducirán los valores de los parámetros de ICAFIR para la modelización de la carga:

R [cm]	11,35
q [kg/cm <sup>2</sup> ]	8
d [cm]	37,5

Los valores devueltos para deformaciones de tracción y vertical aparecen para los valores máximos según sobre los dados para el (A) Bajo rueda en eje simple (B) Bajo rueda de rueda gemela o (C) Bajo el centro entre ruedas de gemelas.

Se introducirá el valor 'L' para designar la adherencia entre capas.

#### *Estudio de los coeficientes de seguridad*

Para ambos análisis (2 y 3) se impondrá el criterio de fallo dado por la Instrucción andaluza:

- Fallo por tracción (agrietamiento) en la fibra inferior de mezclas densas o semidensas (sólo se tomarán mezclas de este tipo):

$$N_{adm}(agrietamiento) = \left( \frac{\varepsilon_r}{6.920 \times 10^{-3}} \right)^{-\frac{1}{0.27243}}$$

- Fallo por compresión (hundimiento) de la fibra superior del cimiento o plano de explanada:

$$N_{adm}(ahuellamiento) = \left( \frac{\varepsilon_z}{2.16 \times 10^{-6}} \right)^{-\frac{1}{0.28}}$$

Se evaluará el mínimo de ambos, se tomará como Número de Ejes Admisibles de la Estructura

$$N_{adm}^{sección i} = \min[N_{adm}(agrietamiento); N_{adm}(ahuellamiento)]$$

Y se obtendrá una matriz de valores de los factores de seguridad donde:

$$FS_{ij}$$

*i* indica la hipótesis de carga considerada (Crecimiento y Límite Inferior o Superior)

*j* indica el Número de Ejes admisibles ( $N_{adm}$ ) dado por cada aplicación para la estructura calculada

Sección (X)X X 1	Tipo de fallo ICAFIR $N_{adm} = \min(N_{adm}(agrietamiento); N_{adm}(hundimiento))$		
	Cálculo ICAFIR	Cálculo WESLEA	Cálculo WINDEPAV
C1 LI (Ndis C1)	FS	FS	FS
C2 LI (Ndis C2)	FS	FS	FS
C3 LI (Ndis C3)	FS	FS	FS
C4 LI (Ndis C4)	FS	FS	FS
C1 LS (Ndis C1)	FS	FS	FS
C2 LS (Ndis C2)	FS	FS	FS
C3 LS (Ndis C3)	FS	FS	FS
C\$ LS (Ndis C4)	FS	FS	FS

### Resultados del análisis tenso-deformacional y Factores de Seguridad

Se aportará una matriz como la anterior con los Factores de Seguridad para cada Hipotesis de Tráfico estudiada.

Se discutirá lo siguiente para cada análisis:

- Análisis Tipo 2. ICAFIR
  - Tipo de fallo (agrietamiento o hundimiento)
  - Dispersión del Límite Inferior.
  - Dispersión del Límite Superior.
  - Dispersión entre Límites Distintos para una misma Categoría de Tráfico (Comparar las diferencias entre LI y LS). Aquí entrará en discusión si pudiera darse el caso de que una sección de la Norma estuviera sub-dimensionada ( $FS < 1$ ) para una carga de tráfico del LI y sobredimensionada para una carga de tráfico del LS ( $FS > 1$ ). Todo ello bajo un mismo Método o Cálculo (ICAFIR, WESLEA o DEPAV).
- Análisis Tipo 3. WESLEA Y DEPAV, se discutirá igualmente lo anterior llevando a cabo una comparación con el Análisis Tipo 2.



### 8.3. Análisis Tipo 2 (Fase 5.3)

#### *Resultados del análisis tenso-deformacional y Factores de Seguridad*

En el ANEJO IX se aportan los resultados en tensiones y deformaciones de los modelos de secciones estudiados, mediante unas tablas cuyos datos son los siguientes:

- (1) N° de capas, espesores, tipo de material, caracterización mecánica y profundidades a las que se encuentran dichas capas.
- (2) Deformaciones horizontales en el/los espesor/es de Mezcla Bituminosa. Deformación horizontal máxima entre las las situaciones de evaluación de puntos (1, Bajo rueda simple, 2, Bajo una de las ruedas gemelas, 3 Bajo el centro de las ruedas gemelas). Deformación de rotura para la Hipótesis de Tráfico C1 de Límite Inferior. Factor de Seguridad por capa y profundidad.
- (3) Tensiones horizontales en las secciones cuya base está tratada con ligantes hidráulicos. Tracción horizontal máxima entre las las situaciones de evaluación de puntos (1, Bajo rueda simple, 2, Bajo una de las ruedas gemelas, 3 Bajo el centro de las ruedas gemelas). Tracción de rotura para la Hipótesis de Tráfico C1 de Límite Inferior. Factor de Seguridad por capa y profundidad.
- (4) Deformaciones verticales. Deformación vertical máxima entre las las situaciones de evaluación de puntos (1, Bajo rueda simple, 2, Bajo una de las ruedas gemelas, 3 Bajo el centro de las ruedas gemelas). Deformación de rotura para la Hipótesis de Tráfico C1 de Límite Inferior. Factor de Seguridad por capa y profundidad.
- (5) Fallo estructural. Carga máxima admisible por la sección (en amarillo). Será de tipo:
  - a. Agrietamiento. Si la máxima carga admisible viene dada por el fallo de las capas de Mezcla Bituminosa por deformación horizontal.
  - b. Tracciones en la Base. Si la máxima carga admisible viene dada por el fallo de las capas de materiales ligados hidráulicamente (suelocemento y/o gravacemento) por tracción horizontal.
  - c. Hundimiento. Si la carga máxima admisible viene dada por el fallo por deformación vertical de la superficie del cimiento.
- (6) Hipótesis de Carga de Tráfico (C1, C2, C3, C4) para los límites Inferiores y Superiores.

Factores de Seguridad resultado de dividir la carga máxima admitida por la sección y cada hipótesis de carga considerada.

### 8.3.1. Categoría del Tráfico T31

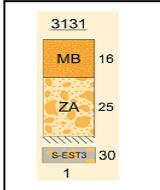
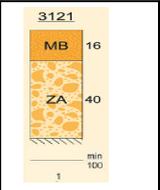
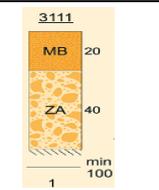
							
		<b>3131</b>		<b>3121</b>		<b>3111</b>	
		<b>Nadmisible</b>		<b>2.513.537</b>		<b>2.186.191</b>	
		<b>Flexible</b>					
		<b>N diseño</b>					
<b>T31</b>	C1 LS	1.170.647		2,15	1,87	2,89	
	C2LS	1.294.615		1,94	1,69	2,61	
	C3 LS	1.434.708		1,75	1,52	2,36	
	C4 LS	1.181.799		2,13	1,85	2,86	
	C1 LI	585.324		4,29	3,74	5,78	
	C2 LI	647.307		3,88	3,38	5,23	
	C3 LI	717.354		3,50	3,05	4,72	
	C4 LI	590.899		4,25	3,70	5,73	

Tabla 41 Resumen de los Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T31

La proporcionalidad de carga-FS es del doble para las todas las soluciones, y salvo las excepciones antes mencionadas, todas tienen coeficientes de seguridad aceptables (superiores al 1.5 para límite inferior y llegan hasta 5 en el límite superior para algunos casos).

### 8.3.2. Categoría de Tráfico T32

Las soluciones para la Categoría del Tráfico T32 arrojan valores de los Factores de Seguridad ligeramente superiores a los dados para los de T31, pero en todo caso del mismo orden de magnitud, y en todos los casos se trata de secciones válidas estructuralmente y equivalentes.

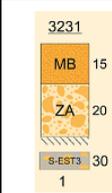
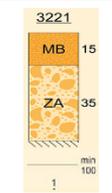
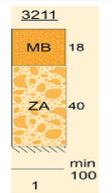
					
			<b>3231</b>	<b>3221</b>	<b>3211</b>
			<b>Nadmisible</b>		
			<b>1.765.781</b>	<b>2.461.777</b>	<b>2.239.668</b>
		<b>Flexible</b>			
		<b>N diseño</b>			
<b>T32</b>	C1 LS	585.324	3,02	4,21	3,83
	C2LS	647.307	2,73	3,80	3,46
	C3 LS	717.354	2,46	3,43	3,12
	C4 LS	590.899	2,99	4,17	3,79
	C1 LI	292.662	6,03	8,41	7,65
	C2 LI	323.654	5,46	7,61	6,92
	C3 LI	358.677	4,92	6,86	6,24
	C4 LI	295.450	5,98	8,33	7,58

Tabla 42 Resumen de los Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T32

### 8.3.3. Categoría de Tráfico T41

Para las categorías de tráfico más bajo (T41 y T42,  $IMD_p < 50$ ) los resultados arrojan que sólo las soluciones flexibles darán resultados admisibles (Tabla 43).

Las soluciones 4131 y 4121 tienen factores de seguridad parecidos, incluso con los de la solución de explanada E3 inferiores. Esto puede ser debido a que la solución 4121 tiene mayor capacidad estructural en las capas del firme en contrapartida de una explanada de calidad menor (E2). Sin embargo, al estar ambas dimensionadas con la misma calidad del cemento (Alta,  $E_v = 160$  MPa), no se puede apreciar la aportación que hace una mejor calidad de explanada ( $E_v = 319.26$  MPa en el cálculo dado por ICAFIR) a un dimensionamiento del firme con espesores menores.

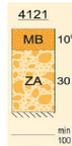
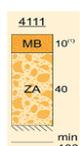
						
			<b>4131</b>	<b>4121</b>	<b>4111</b>	
			<b>Nadmisible</b>	<b>545.532</b>	<b>678.933</b>	<b>393.933</b>
<b>T41</b>	Flexible					
	N diseño					
	C1 LS	266.056	2,05	2,55	1,48	
	C2 LS	294.231	1,85	2,31	1,34	
	C3 LS	326.070	1,67	2,08	1,21	
	C4 LS	262.962	2,07	2,58	1,50	
	C1 LI	133.028	4,10	5,10	2,96	
	C2 LI	147.115	3,71	4,61	2,68	
	C3 LI	163.035	3,35	4,16	2,42	
	C4 LI	134.295	4,06	5,06	2,93	

Tabla 43 Resumen de Factores de Seguridad para Categoría de Tráfico T41

### 8.3.4. Categoría de Tráfico T42

Las soluciones flexibles dadas para tráficos muy bajos ( $IMD_p < 25$ ) dan resultados cercanos a 1 y a 2, incluso por debajo de 1 para la solución 4211. En el caso de las soluciones flexibles, para espesores tan bajos del asfalto, el fallo estructural se produce por hundimiento del cemento, pero a la vista de los resultados la solución de calidad de explanada no cumple con el los criterios mínimos.

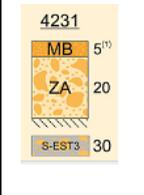
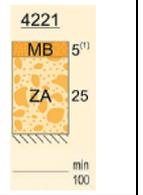
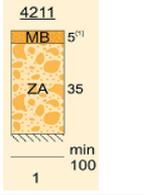
						
			<b>4231</b>	<b>4221</b>	<b>4211</b>	
			<b>Nadmisible</b>	<b>167.428</b>	<b>295.597</b>	<b>55.575</b>
		Flexible				
		N diseño				
<b>T42</b>	C1 LS	133.028		1,26	2,22	<b>0,42</b>
	C2LS	147.115		1,14	2,01	<b>0,38</b>
	C3 LS	163.035		1,03	1,81	<b>0,34</b>
	C4 LS	134.295		1,25	2,20	<b>0,41</b>
	C1 LI					
	C2 LI					
	C3 LI					
	C4 LI					

Tabla 44 Resumen de los Factores de Seguridad para CArtegoría de Tráfico T42



#### 8.4. Análisis Tipo 3 (Fase 5.4)

Categoría de Tráfico T31

Las soluciones propuestas para Tráfico 31 presentan factores de seguridad aceptables tanto para LS (entre 1 y 3) como para el LI (entre 3-6).

WESLEA arroja factores de seguridad bajos y en el caso de la 3121 y 3111 no proporciona valores.

DEPAV da unos valores de los Factores de Seguridad prácticamente iguales a los dados por ICAFIR aunque siendo un poco superiores.

3131		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		-1,2500E-04	-2,1600E-04	-1,2500E-04
Nadm		2.513.537	336.317	2.504.341
Nd				
C1 LS	1.170.647	<b>2,15</b>	<b>0,29</b>	<b>2,14</b>
C2 LS	1.294.615	<b>1,94</b>	<b>0,26</b>	<b>1,93</b>
C3 LS	1.434.708	<b>1,75</b>	<b>0,23</b>	<b>1,75</b>
C4 LS	1.181.799	<b>2,13</b>	<b>0,28</b>	<b>2,12</b>
C1 LI	585.324	<b>4,29</b>	<b>0,57</b>	<b>4,28</b>
C2 LI	647.307	<b>3,88</b>	<b>0,52</b>	<b>3,87</b>
C3 LI	717.354	<b>3,50</b>	<b>0,47</b>	<b>3,49</b>
C4 LI	590.899	<b>4,25</b>	<b>0,57</b>	<b>4,24</b>

3121		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		-1,2970E-04	-1,9819E-02	-1,2300E-04
Nadm		2.186.191	0	2.657.090
Nd				
C1 LS	1.170.647	<b>1,87</b>	<b>0,00</b>	<b>2,27</b>
C2 LS	1.294.615	<b>1,69</b>	<b>0,00</b>	<b>2,05</b>
C3 LS	1.434.708	<b>1,52</b>	<b>0,00</b>	<b>1,85</b>
C4 LS	1.181.799	<b>1,85</b>	<b>0,00</b>	<b>2,25</b>
C1 LI	585.324	<b>3,74</b>	<b>0,00</b>	<b>4,54</b>
C2 LI	647.307	<b>3,38</b>	<b>0,00</b>	<b>4,10</b>
C3 LI	717.354	<b>3,05</b>	<b>0,00</b>	<b>3,70</b>
C4 LI	590.899	<b>3,70</b>	<b>0,00</b>	<b>4,50</b>

3111		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		1,1515E-04	-1,9788E-02	-1,0700E-04
Nadm		3.385.034	0	4.431.593
Nd				
C1 LS	1.170.647	<b>2,89</b>	<b>0,00</b>	<b>3,79</b>
C2 LS	1.294.615	<b>2,61</b>	<b>0,00</b>	<b>3,42</b>
C3 LS	1.434.708	<b>2,36</b>	<b>0,00</b>	<b>3,09</b>
C4 LS	1.181.799	<b>2,86</b>	<b>0,00</b>	<b>3,75</b>
C1 LI	585323,64	<b>5,78</b>	<b>0,00</b>	<b>7,57</b>
C2 LI	647.307	<b>5,23</b>	<b>0,00</b>	<b>6,85</b>
C3 LI	717.354	<b>4,72</b>	<b>0,00</b>	<b>6,18</b>
C4 LI	590.899	<b>5,73</b>	<b>0,00</b>	<b>7,50</b>

Tabla 45 Resumen de Factores de Seguridad para los Análisis Tipo 2 y 3 para T31

### Categoría de Tráfico T32

El fallo de todas las secciones flexibles propuestas para este tráfico se produce por agrietamiento de la mezcla bituminosa, pero todas dan un Factor de Seguridad válido, de entorno 2.5-3.5 para límites superiores y de 5-7 para límites inferiores. Se vuelve a observar la proporcionalidad entre LI y LS ‘a doble carga de tráfico, se duplica el Factor de Seguridad’. La disminución de espesores de zahorra por una calidad de explanada mayor, aunque por lo general los FS disminuyan (también habrá que tener en cuenta que la Explanada E3 está sub-dimensionada por ICAFIR), es muy poca la variación por lo que parece lógico pensar que se puede prescindir de espesores de zahorra siempre y cuando se aumente la categoría de explanada sin sufrir cambios estructurales en el firme. ICAFIR arroja resultados que muestran que las secciones propuestas por la Norma son equivalentes.

WESLEA da valores no válidos para el Factor de Seguridad.

DEPAV mantiene valores muy similares a los de ICAFIR menos en la 3211 que son un poco superiores.

3231		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		-1,3748E-04	2,3429E-04	-1,3700E-04
Nadm		1.765.781	249.560	1.788.802
Nd				
C1 LS	585.324	3,02	0,43	3,06
C2 LS	647.307	2,73	0,39	2,76
C3 LS	717.354	2,46	0,35	2,49
C4 LS	590.899	2,99	0,42	3,03
C1 LI	292.662	6,03	0,85	6,11
C2 LI	323.654	5,46	0,77	5,53
C3 LI	358.677	4,92	0,70	4,99
C4 LI	295.450	5,98	0,84	6,05

3221		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		FS DADO POR PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε			-2,3789E-04	-1,3200E-04
Nadm		2.461.777	235.975	2.050.365
Nd				
C1 LS	585.324	4,21	0,40	3,50
C2 LS	647.307	3,80	0,36	3,17
C3 LS	717.354	3,43	0,33	2,86
C4 LS	590.899	4,17	0,40	3,47
C1 LI	292.662	8,41	0,81	7,01
C2 LI	323.654	7,61	0,73	6,34
C3 LI	358.677	6,86	0,66	5,72
C4 LI	295.450	8,33	0,80	6,94

3211		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		FS DADO POR PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		-1,1984E-04	-2,1518E-04	-1,2000E-04
Nadm		2.239.668	341.046	2.909.176
Nd				
C1 LS	585.324	3,83	0,58	4,97
C2 LS	647.307	3,46	0,53	4,49
C3 LS	717.354	3,12	0,48	4,06
C4 LS	590.899	3,79	0,58	4,92
C1 LI	292.662	7,65	1,17	9,94
C2 LI	323.654	6,92	1,05	8,99
C3 LI	358.677	6,24	0,95	8,11
C4 LI	295.450	7,58	1,15	9,85

Tabla 46 Resumen de Factores de Seguridad para los Análisis 2 y 3 para T32

Categoría de Tráfico T41

Las soluciones 4131 y 4132 cumplen para valores aceptables de límites superiores e inferiores. Luego podrían considerarse equivalentes sabiendo subdimensionada la 4131. La solución 4111 presenta valores de entre 1 y 2 para límites superior e inferior respectivamente, por lo que se infiere una solución de menor capacidad estructural respecto de las anteriores.

WESLEA da valores de fallo para todas las soluciones mientras que DEPAV presenta valores muy parecidos a los dados por ICAFIR.

4131		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
	ε		2,8721E-04	-1,8900E-04
	Nadm	545.432	118.173	549.058
	Nd			
C1 LS	266.056	<b>2,05</b>	<b>0,44</b>	<b>2,06</b>
C2 LS	294.231	<b>1,85</b>	<b>0,40</b>	<b>1,87</b>
C3 LS	326.070	<b>1,67</b>	<b>0,36</b>	<b>1,68</b>
C4 LS	262.962	<b>2,07</b>	<b>0,45</b>	<b>2,09</b>
C1 LI	133.028	<b>4,10</b>	<b>0,89</b>	<b>4,13</b>
C2 LI	147.115	<b>3,71</b>	<b>0,80</b>	<b>3,73</b>
C3 LI	163.035	<b>3,35</b>	<b>0,72</b>	<b>3,37</b>
C4 LI	244.798	<b>2,23</b>	<b>0,48</b>	<b>2,24</b>

4121		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
	ε		-2,6429E-04	-1,7800E-04
	Nadm	678.933	160.361	684.241
	Nd			
C1 LS	266.056	<b>2,55</b>	<b>0,60</b>	<b>2,57</b>
C2 LS	294.231	<b>2,31</b>	<b>0,55</b>	<b>2,33</b>
C3 LS	326.070	<b>2,08</b>	<b>0,49</b>	<b>2,10</b>
C4 LS	262.962	<b>2,58</b>	<b>0,61</b>	<b>2,60</b>
C1 LI	133.028	<b>5,10</b>	<b>1,21</b>	<b>5,14</b>
C2 LI	147.115	<b>4,61</b>	<b>1,09</b>	<b>4,65</b>
C3 LI	163.035	<b>4,16</b>	<b>0,98</b>	<b>4,20</b>
C4 LI	244.798	<b>2,77</b>	<b>0,66</b>	<b>2,80</b>

4111		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: agrietamiento (N)		
		FS DADO POR PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
	ε		-2,8893E-04	-1,9000E-04
	Nadm	393.933	115.612	538.525
	Nd			
C1 LS	266.056	<b>1,48</b>	<b>0,43</b>	<b>2,02</b>
C2 LS	294.231	<b>1,34</b>	<b>0,39</b>	<b>1,83</b>
C3 LS	326.070	<b>1,21</b>	<b>0,35</b>	<b>1,65</b>
C4 LS	262.962	<b>1,50</b>	<b>0,44</b>	<b>2,05</b>
C1 LI	133.028	<b>2,96</b>	<b>0,87</b>	<b>4,05</b>
C2 LI	147.115	<b>2,68</b>	<b>0,79</b>	<b>3,66</b>
C3 LI	163.035	<b>2,42</b>	<b>0,71</b>	<b>3,30</b>
C4 LI	244.798	<b>1,61</b>	<b>0,47</b>	<b>2,20</b>

Tabla 47 Resumen de los Factores de Seguridad para los Análisis Tipo 2 y 3 para T41

Categoría de Tráfico T42

Para ICAFIR y DEPAV, las soluciones flexibles para T42 se presentan factores de seguridad aceptables.

Las soluciones dadas por la Norma fallarían por hundimiento del cimiento, menos la solución 4221 que fallaría por agrietamiento, aunque el colapso por fallo del cimiento también sería inmediato para la misma carga.

Encontramos que WESLEA en general presenta valores muy inferiores al dado por ICAFIR, dando valores por debajo de uno en todos los casos.

DEPAV para las soluciones 4231 y 4221 obtiene valores parecidos a ICAFIR, pero luego no coincide cuando el cimiento es de 60 MPa (dando valores elevados) pero no se ha podido vislumbrar su naturaleza.

4231		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: ahuellamiento (N)		
		FS DADO POR PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		7,4436E-04	1,3475E-03	7,4400E-04
Nadm		167.428	20.103	167.716
Nd				
C1 LS	133.028	1,26	0,15	1,26
C2 LS	147.115	1,14	0,14	1,14
C3 LS	163.035	1,03	0,12	1,03
C4 LS	134.295	1,25	0,15	1,25
C1 LI				
C2 LI				
C3 LI				
C4 LI				

4221		ANÁLISIS 2	ANÁLISIS 3	
		Tipo de fallo: AGRIETAMIENTO (N)		
		FS DADO POR PROGRAMA ICAFIR	Cálculo por WESLEA	Cálculo DEPAV
ε		2,2370E-04	2,4139E-04	-2,2400E-04
Nadm		295.597	223.657	294.289
Nd				
C1 LS	133.028	2,22	1,68	2,21
C2 LS	147.115	2,01	1,52	2,00
C3 LS	163.035	1,81	1,37	1,81
C4 LS	134.295	2,20	1,67	2,19
C1 LI				
C2 LI				
C3 LI				
C4 LI				

Tabla 48 Resumen de los Factores de Seguridad para los Análisis Tipo 2 y 3 para T42

## 9. CONCLUSIONES (Fase 6)

### Resumen

- 1) Se ha podido observar cómo se formulan los Métodos Analíticos, viendo la importante variedad de métodos y criterios que se asocia a la práctica del diseño en cada parte del mundo. La Mecánica de Firmes, a partir de una base experimental, presenta correcciones en función del país de dónde se tomen los modelos y cada Institución o autor, aun partiendo de la teoría general, aplica los modelos que más se ajusten al contexto propio, tal es la modelización de cargas, tipos de tráfico, modelización de materiales, criterios de fallo y obtención de resultados.
- 2) No se han podido encontrar para ninguno de los casos estudiados los códigos de programación de las aplicaciones informáticas, por lo que se establece una incertidumbre en cuanto a la aplicación de las ecuaciones de Burmister y de aplicación de las condiciones de contorno que no se ha podido evaluar.
- 3) En cuanto a los análisis efectuados, se puede concluir que:

- a) La modelización de las cargas de Tráfico mediante la formulación de Categorías de Tráfico mediante el IMDp, puede llevar a importantes dispersiones en cuanto al Número de Ejes Acumulados, y, como se ha podido observar, para secciones iguales se obtienen Factores de Seguridad muy distintos, por lo que se concluye que, según establecen también otras fuentes consultadas ( en ESALs por el Pavement Engineering, (El-Korchi, 2009), la modelización de estructuras de Firmes y sus calidades deberían llevarse a cabo a través de la definición de Cargas de Tráfico basadas en el Número de Ejes Equivalentes Acumulados.

- b) Análisis Tipo 1

Los resultados dados por WESLEA son muy bajos y su análisis quedó descartado.

Los resultados dados por DEPAV si dan valores coherentes de los Factores de Seguridad y las conclusiones obtenidas son las siguientes:

Con carácter general a raíz de los resultados obtenidos se puede admitir que las soluciones para Categoría T31 presentan resultados razonablemente parecidos por lo que podrían considerarse secciones equivalentes.

Se pueden considerar equivalentes las soluciones propuestas para Tráficos T32 aunque sus valores son mayores al igual que su dispersión entre secciones respecto al T31, y por lo tanto su respuesta estructural parece asegurada.

Las soluciones para Tráfico 41, fallarían por agrietamiento de la Mezcla Bituminosa (10 cm para todas). Tienen Factores de Seguridad entre 2 y 8, aunque las soluciones van perdiendo capacidad estructural conforme se va disminuyendo la calidad de explanada.

Las soluciones para Tráficos bajos (T42) pueden considerarse equivalentes aunque los Factores de seguridad van disminuyendo conforme disminuye la capacidad de explanada.

- c) Respecto al Análisis 2.

Para las soluciones de explanada tipo E3 (que se encuentra subdimensionada por el programa ICAFIR limitando el cimiento a 160 MPa, cuando el propio programa establece que el Módulo de Compresibilidad para éste es de 319.25 MPa), las soluciones dan resultados menores que en el Análisis Tipo 1.

El empleo del programa ICAFIR queda descartado para el análisis estructural de secciones de la Norma 6.1 IC por las limitaciones sobre explanada expuestas en el apartado 6.4.

- d) En el Análisis 3

El Análisis 3 refleja que el programa WESLEA arroja valores en general mucho menores que ICAFIR de manera generalizada, presentando deformaciones superiores en todas las secciones estudiadas. Al no conocer el funcionamiento interno del programa, no se pueden evaluar porque arroja resultados tan bajos en modelizaciones que se han homogeneizado con las de ICAFIR y DEPAV.

DEPAV, basado en el ALIZE III, presenta valores de los coeficientes de seguridad muy similares a los aportados por ICAFIR, por lo que, según las secciones analizadas de firmes flexibles para tráfico bajo, se pueden considerar como aplicaciones informáticas equivalentes.

#### Nuevas líneas de trabajo

- Estudio de la seguridad estructural de Secciones Flexibles para Categorías de Tráfico elevado (T00, T0, T1 y T2).
- Estudio de la seguridad de las Secciones Semirrígidas propuestas por la Norma 6.1 IC mediante Métodos Analíticos.
- Estudio del fallo por tracciones en la base de soluciones de Firmes Semirrígidos. Durante el desarrollo del trabajo se han analizado secciones semirrígidas y en los resultados obtenidos se han encontrado problemas de diseño asociados a tracciones en las bases de materiales ligados hidráulicamente que merecen un estudio pormenorizado de sus causas.
- Estudio comparativo mediante Métodos Analíticos y con aplicación de las ecuaciones de Westergaard o mediante Método de Elementos Finitos (MEF) de las soluciones de Firmes Rígidos propuestas por la Norma 6.1 IC.
- Estudio detallado sobre ratificación de la equivalencia de secciones de firme propuesta por la Norma 6.1 IC para cada Categoría del Tráfico.
- Valoración económica de los firmes propuestos por la Norma 6.1 IC en base a los Factores de Seguridad arrojados por los Métodos Analíticos y el estudio de optimización (Seguridad/Coste) sobre las soluciones estructurales estudiadas.

ANEJOS



## ANEJO I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fomento., M. d. (2003). *Instrucción de Carreteras 6.1 (IC -6.1), Secciones de Firme. Rden FOM/3460/2003, de 28 de Noviembre. Publicado en BOE de 12 de Diciembre de 2003.*
2. Dirección General de Carreteras, C. d. (2015). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3).* Dirección General de Carreteras, Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.
3. Andalucía, J. d. (2007). *Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía.* Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía.
4. Mena-Bernal, J. V. (2015). *Estudio Comparado de los Métodos Analíticos de Dimensionamiento de Firmes y su Evolución.* Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
5. Reyes Lizcaino, F. A. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos.* Bogotá: CEJA.
6. El-Korchi, M. R. (2009). *Pavement Engineering: Principles and Practice.* CRC Press.
7. Apuntes de Pavimentos del Profesor Luis Ricardo Vásquez Varela, M.Sc. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Sitio web: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnpbmdlcGF2fGd4OjI0YmZkYzA4Zjg4ZGVhNjk>
8. Izydor Kawa, Z. Z. (1997). *EVALUATION OF THE AASHTO 18-KIP LOAD EQUIVALENCY CONCEPT*. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Highway Administration.
9. Mur, S. F. (Diciembre 2011). *INNOVAR EN LA GESTIÓN DE LA INTERACCIÓN VEHÍCULO PESADO-CARRETERA.* Ministerio de Fomento.
10. Sandoval., C. H. (2008). *Mecánica de Pavimentos.* Escuela de Transporte y vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. ISBN 978-958-660-122-1.



ANEJO II. ORDEN FOM/3460/2003, de 28 de Noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1 IC <<Secciones del firme>>, de la Instrucción de Carreteras.

**ORDEN FOM/3460/2003, DE 28 DE NOVIEMBRE,  
POR LA QUE SE APRUEBA LA NORMA 6.1 IC  
SECCIONES DE FIRME, DE LA INSTRUCCIÓN  
DE CARRETERAS (BOE DE 12 DE DICIEMBRE DE 2003)**

Por Orden de 23 de mayo de 1989, del entonces Ministro de Obras Públicas y Urbanismo, se aprobó la Instrucción 6.1 y 2-IC «Secciones de firme». El tiempo transcurrido desde entonces ha aconsejado su revisión para adaptarla al incremento del tráfico, al estado actual de las carreteras españolas y a la evolución tecnológica de los materiales y sistemas constructivos específicos de la pavimentación.

Por otra parte, la experiencia derivada de su aplicación ha puesto de manifiesto la necesidad de obtener explanadas con mayores garantías en cuanto a uniformidad estructural, durabilidad e insensibilidad frente a la acción del agua. Por ello el nuevo cuadro de explanadas que se presenta supone una clara mejora de las propiedades resistentes de las mismas.

Con respecto a las secciones de firme se ha optado por simplificar el número de opciones posibles, de forma que se recogen exclusivamente las soluciones que se han comportado como las más adecuadas para las condiciones de tráfico, clima y disponibilidad de suelos y materiales de construcción en nuestro país. Finalmente se han adaptado las categorías de tráfico al incremento del mismo en estos últimos años.

Por las razones antes expuestas, y de conformidad con lo establecido en la Disposición adicional segunda de la Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras, y en los artículos 29, 40, 51 y en la Disposición final única del Reglamento General de Carreteras, aprobado por Real Decreto 1812/1994, de 2 de septiembre, modificado por Real Decreto 597/1999, de 16 de abril, y cumplidos los trámites establecidos en la Ley 50/1997, de 27 de noviembre, del Gobierno y en el Real Decreto 1337/1999, de 31 de julio, por el que se regula la remisión de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas y reglamentos relativos a los servicios de la sociedad de la información, y en la Directiva 98/34/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de junio, modificada por la Directiva 98/48/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de julio:

**DISPONGO :**

**Primero:** *Aprobación de la Norma 6.1 IC Secciones de firme de la Instrucción de Carreteras.*

Se aprueba la Norma 6.1 IC "Secciones de firme" de la Instrucción de Carreteras, que figura como anejo a esta Orden.

**Segundo:** *Ámbito de aplicación.*

La Norma 6.1 IC "Secciones de firme", con las prescripciones en ella establecidas, se aplicará a los proyectos y a las obras de firmes de nueva construcción, de acondicionamiento, o de reconstrucción total de firmes existentes en carreteras.

**Disposición transitoria única.** *Aplicación a proyectos y obras.*

1. Los proyectos que se encuentren en fase de redacción, a la entrada en vigor de esta orden, se desarrollarán conforme a lo establecido en ella.
2. A las obras que se encuentren en fase de licitación, realización y a aquellas que se ejecuten en desarrollo de proyectos que ya estuviesen aprobados a la entrada en vigor de esta orden, no les será de aplicación lo dispuesto en la misma.

---

**Disposición derogatoria. Cláusula derogatoria.**

Queda derogada la Orden de 23 de mayo de 1989, del entonces Ministro de Obras Públicas y Urbanismo, por la que se aprobó la Instrucción 6.1 y 2-IC "Secciones de firme" y aquellas disposiciones de igual o inferior rango que se opongan a lo dispuesto en esta Orden.

**Disposición final. Entrada en vigor.**

Esta orden entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el Boletín Oficial del Estado.

**Madrid, 28 de noviembre de 2003**

ÁLVAREZ-CASCOS FERNÁNDEZ

EXCMO. SR. SECRETARIO DE ESTADO DE INFRAESTRUCTURAS E  
ILMO SR. DIRECTOR GENERAL DE CARRETERAS

### ANEJO III. MODELOS ANALÍTICOS DE LA MECÁNICA DE FIRMES

#### Modelo de Burmister

La respuesta ante las cargas exteriores, que son esencialmente las presiones de las ruedas de los vehículos, es el resultado de la resolución de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales obtenidas al plantear el problema del equilibrio ( $\nabla^2 \nabla^2 \phi = 0$ ) en un elemento diferencial. El sistema se resuelve mediante sus transformadas, y la respuesta de la estructura se obtiene a través de integrales definidas que se resuelven numéricamente.

Del equilibrio aplicado a la estructura con las condiciones de Burmister, se obtienen unas ecuaciones que se puede plantear sobre la base de una función de tensiones o de Love, que es la solución de la ecuación biarmónica:

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi = 0$$

donde  $\phi$  es la función de tensiones que satisface ecuaciones de equilibrio y compatibilidad.

La solución en coordenadas cilíndricas vendrá dada por:

$$\Delta^2 \phi(r, z) = 0; \Delta^2 = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{d^2}{dz^2} \right)$$

La solución depende de cuatro constantes que se determinan a partir de las condiciones de contorno. Los esfuerzos ( $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_{rz}$ ) y los desplazamientos ( $u$  según  $r$  y  $w$  según  $z$ ) se relacionan a partir de las funciones  $\phi(r, z)$  y de sus derivadas, repartidas en  $r$  y  $z$ .

Si  $\phi(r, z)$  es tal que  $\Delta^2 \phi(r, z) = 0$ , se tienen los siguientes esfuerzos:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2 - \nu) \Delta \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right]$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \Delta \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \Delta \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r} \right]$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1 - \nu) \Delta \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right]$$

El desplazamiento será:

- Radial

$$u = - \frac{1 + \nu \partial^2 \phi}{E \partial r \partial z}$$

- Vertical

$$w = \frac{1 + \nu}{E} \left[ (1 - 2\nu) \Delta \phi + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right]$$

### Transformación de Henkel

En el caso de estructuras compuestas de n capas con características elásticas diferentes, se buscarán n funciones definidas para cada una de las capas. Para un  $\Delta^2 \phi(r, z) = 0$  y para cada una de las condiciones en el límite (interfaces superior e inferior de la capa), se tiene que:

$$f(r, z) \rightarrow f^*(m, z) = \int_0^{\infty} r J_0(mr) f(r, z) dz$$

La transformada inversa

$$f^*(m, z) \rightarrow f(r, z) = \int_0^{\infty} m J_0(mr) f^*(m, z) dm$$

Se notará que:

$\phi_i^*(m, z)$  la transformada de  $\phi_i(r, z)$

$\sigma_i^*(m, z)$  la transformada de  $\sigma_i(r, z)$  esfuerzo

$w_i^*(m, z)$  la transformada de  $w$  desplazamiento

Entonces:

$$\left( \frac{d^2}{dz^2} - m^2 \right)^2 \phi_i(m, z) = 0$$

La solución de ecuaciones será

$$\phi_i(\text{tensión}_z^i) = J_0(mr)(A_i + B_i z)e^{mz} + (C_i + D_i z)e^{-mz} \quad \forall \text{ capa } i$$

Las cuatro variables desconocidas se determinan a partir de cuatro condiciones en el límite: dos condiciones de frontera para la superficie (el radio de carga y la presión de contacto) y dos para la subrasante, donde el espesor y el ancho se consideran como infinitos. Para (n-1) interfaces se tiene cuatro (n-1) condiciones.

## ANEJO IV. TRÁFICO DE PROYECTO

### IV.1 Número Acumulado de Ejes Equivalentes

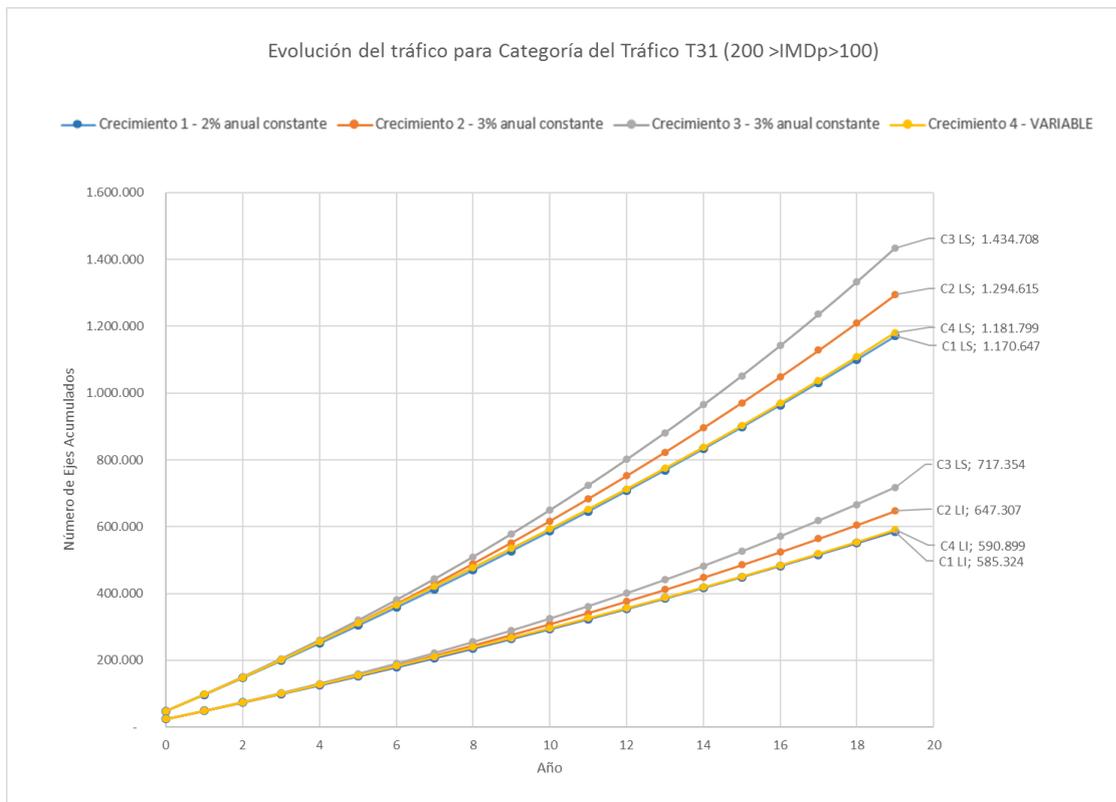
- a) Para estructuras tipo Cimiento/Material Granular/Mezcla Bituminosa en Caliente (CE=0.6). Secciones Tipo (X)X|X|1, el Número de Ejes Acumulados para la vida útil de proyecto es, para la distintas hipótesis de carga y para Tráfico T3 y T4:

Categoría del Tráfico	Límite	IMDP	Yt	C1	C2	C3	V4
T31	LS	200	1,10	1.170.647	1.294.615	1.434.708	1.181.799
	LI	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
T32	LS	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
	LI	50	1,10	292.662	323.654	358.677	295.450
T41	LS	50	1,00	266.056	294.231	326.070	262.962
	LI	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
T42	LS	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
	LI	-	1,00	-	-	-	-

## IV.2 Evolución del Tráfico de Proyecto

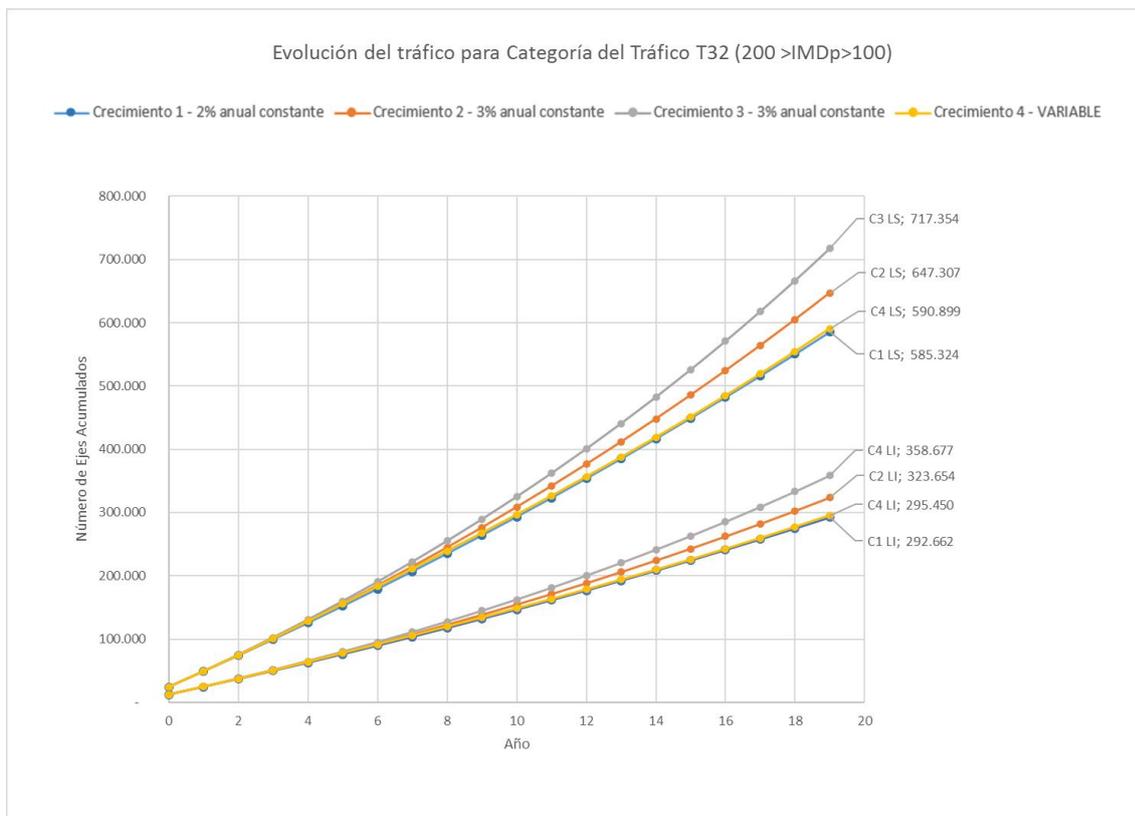
### T31

Categoría del Tráfico	Límite	IMDP	$\gamma_t$	C1	C2	C3	V4
T31	LS	200	1,10	1.170.647	1.294.615	1.434.708	1.181.799
	LI	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
T32	LS	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
	LI	50	1,10	292.662	323.654	358.677	295.450
T41	LS	50	1,00	266.056	294.231	326.070	262.962
	LI	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
T42	LS	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
	LI	-	1,00	-	-	-	-



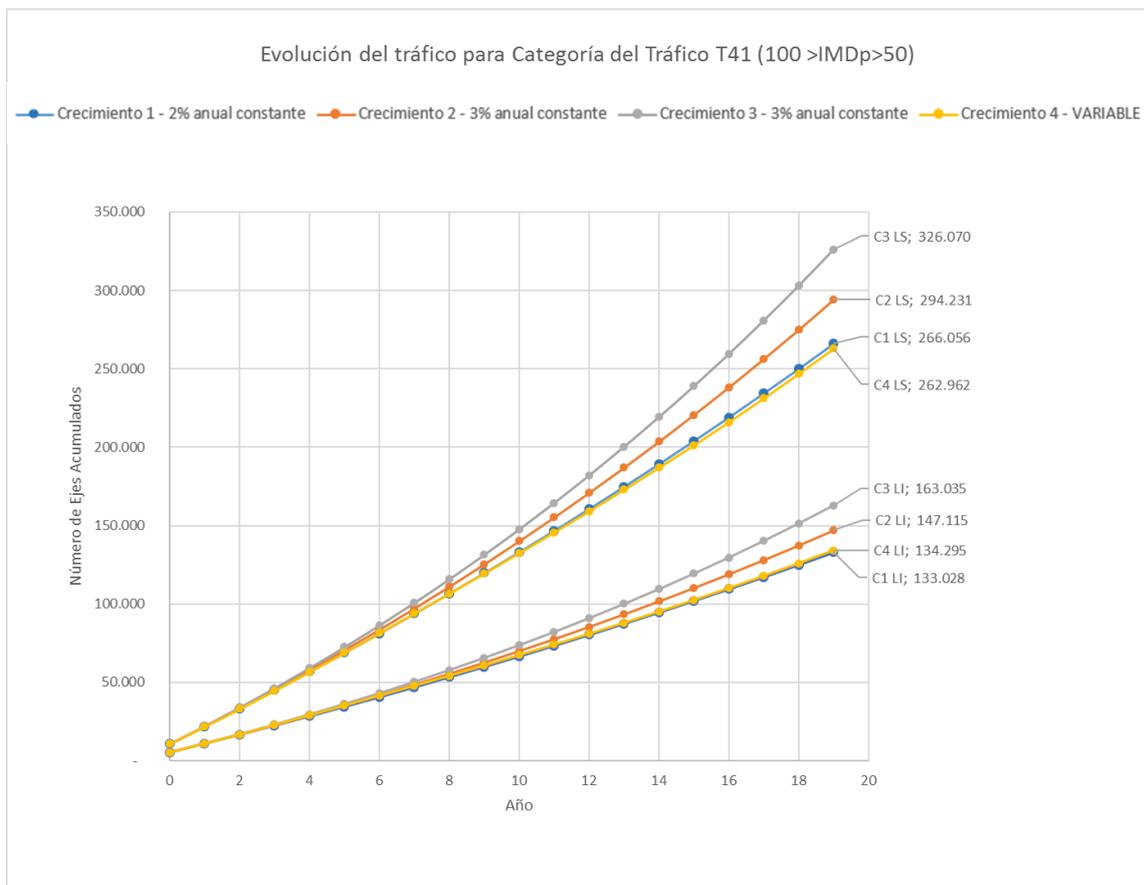
T32

Categoría del Tráfico	Límite	IMDP	Yt	C1	C2	C3	V4
T31	LS	200	1,10	1.170.647	1.294.615	1.434.708	1.181.799
	LI	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
T32	LS	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
	LI	50	1,10	292.662	323.654	358.677	295.450
T41	LS	50	1,00	266.056	294.231	326.070	262.962
	LI	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
T42	LS	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
	LI	-	1,00	-	-	-	-



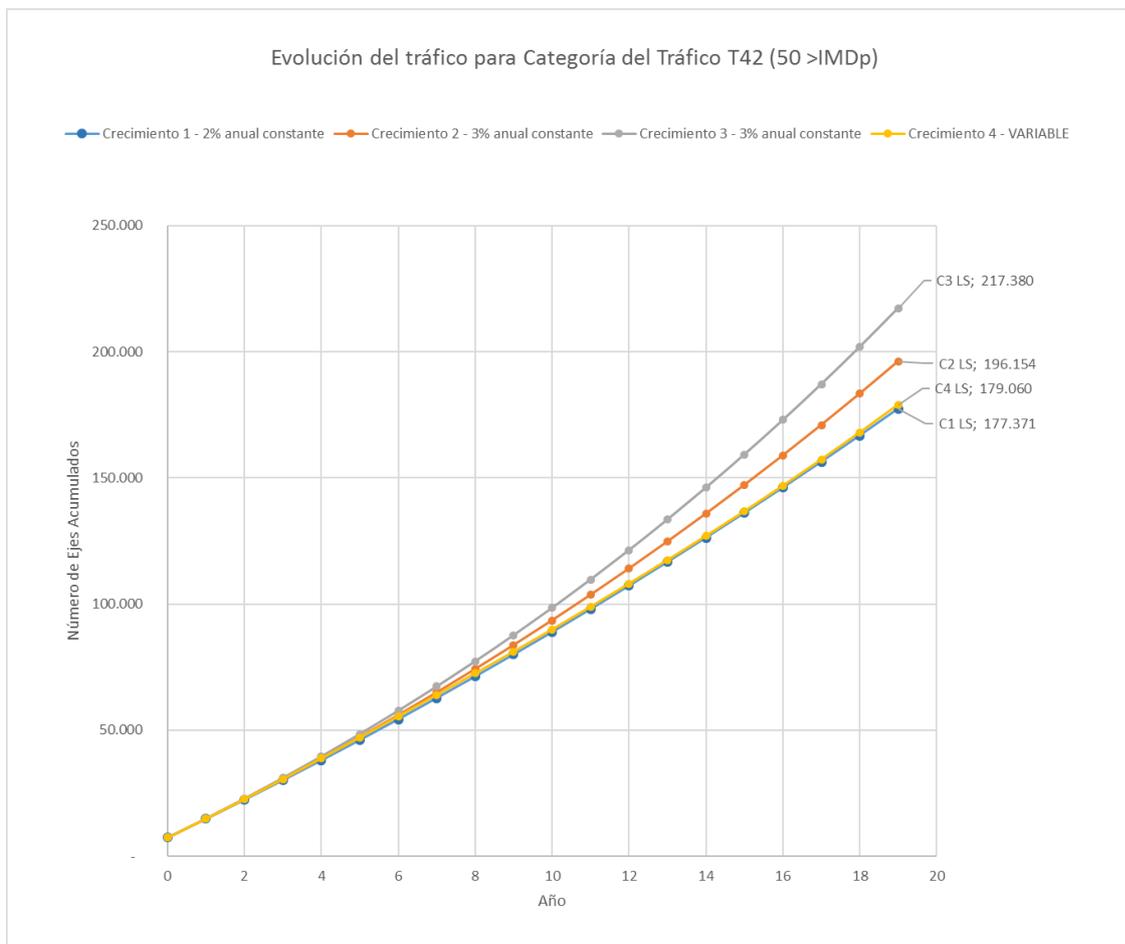
T41

Categoría del Tráfico	Límite	IMDP	Yt	C1	C2	C3	V4
T31	LS	200	1,10	1.170.647	1.294.615	1.434.708	1.181.799
	LI	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
T32	LS	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
	LI	50	1,10	292.662	323.654	358.677	295.450
T41	LS	50	1,00	266.056	294.231	326.070	262.962
	LI	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
T42	LS	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
	LI	-	1,00	-	-	-	-



T42

Categoría del Tráfico	Límite	IMDP	Yt	C1	C2	C3	V4
T31	LS	200	1,10	1.170.647	1.294.615	1.434.708	1.181.799
	LI	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
T32	LS	100	1,10	585.324	647.307	717.354	590.899
	LI	50	1,10	292.662	323.654	358.677	295.450
T41	LS	50	1,00	266.056	294.231	326.070	262.962
	LI	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
T42	LS	25	1,00	133.028	147.115	163.035	134.295
	LI	-	1,00	-	-	-	-





## ANEJO V. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS

Para la obtención del módulo elástico, se siguen estableciendo relaciones con el conocimiento del CBR in situ, mostrándose una relación del tipo:

$$E_s [MPa] = K * CBR$$

con,

Shell	K=10	sobreestima el módulo de los suelos, y que el módulo dinámico es siempre superior al módulo elástico.
LCPC francés	K=5	
Jeuffroy y Bachelez	$E = 6.5 * CBR^{0.65}$	fórmula pesimista en suelos buenos.

Tabla 49 Parámetros dados para la relación entre el módulo elástico y el CBR.

El coeficiente de Poisson, la bibliografía aporta valores comprendidos entre 0.35 y 0.5 para suelos.

Las leyes de fatiga que aparecen en la bibliografía en deformaciones verticales a partir de modelos experimentales son:

$$N_d = k_4 * \left(\frac{1}{\varepsilon_z}\right)^{k_5}$$

$N_d$ : Número de repeticiones de carga para la falla.

$\varepsilon_z$ : Deformación vertical de compresión en la capa.

$k_4$  a  $k_5$ : Coeficientes empíricos de regresión dados por distintos autores.

Modelo	k4	k5
Asphalt Institute	1,365E-09	4,477
TRRL(UK)	6,180E-08	3,95
Belgian CRR	3,050E-09	4,35
Chevron	1,338E-09	4,484
Nottingham	1,126E-06	3,571
MnRoad	6,026E-08	3,87
Guía Francesa (1994)	2,227E-09	4,505
ICAFIR	1,126E-06	3,571

Tabla 50 Parámetros para el cálculo de fatiga en suelos

El gráfico siguiente (Ilustración 28) muestra la influencia que tienen estos parámetros en la formulación de la fatiga de explanada para un rango de cargas de Tráfico como las definidas en el Capítulo 6 (entre 10.000 y 36.000.000 ejes acumulados).

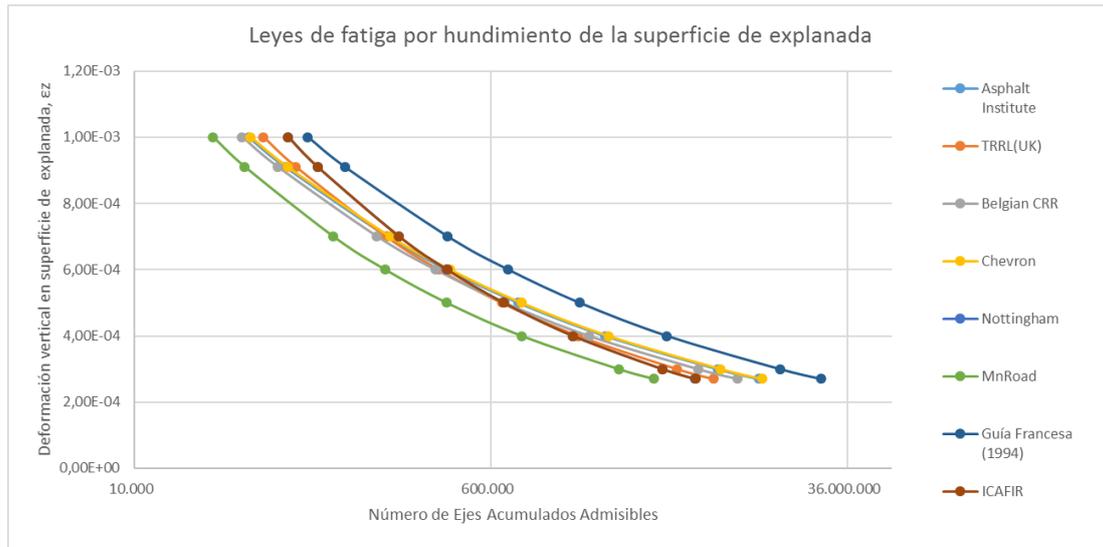


Ilustración 28 Leyes de fatiga por hundimiento de la superficie de explanada

Como se puede observar, para un rango de deformaciones verticales sobre la superficie de explanada dado, ICAFIR daría valores del número de ejes admisibles dentro de la media entre las leyes estudiadas, siendo algo menos restrictivo para cargas de tráfico bajas y más conservador para cargas de tráfico elevadas.

Existe bibliografía en la que se limitan los esfuerzos vertical  $\sigma_z$ , aunque son poco frecuente estas formulaciones para suelos, en las que también intervienen sus características mecánicas:

- Kenhover y Dormon  $\sigma_z = \frac{C \cdot E_s}{1 + 0.7 \log N}$ ;  $C = 0.008$  (Jeuffroy);  $C = 0.006$  (Acum y Fox);  $E_s$  módulo dinámico

ANEJO VI. SECCIONES DE ESTRUCTURAS DE FIRMES

IV.1) Secciones de la Norma 6.1 IC

FIGURA 1 DE FORMACIÓN DE EXPLANADA

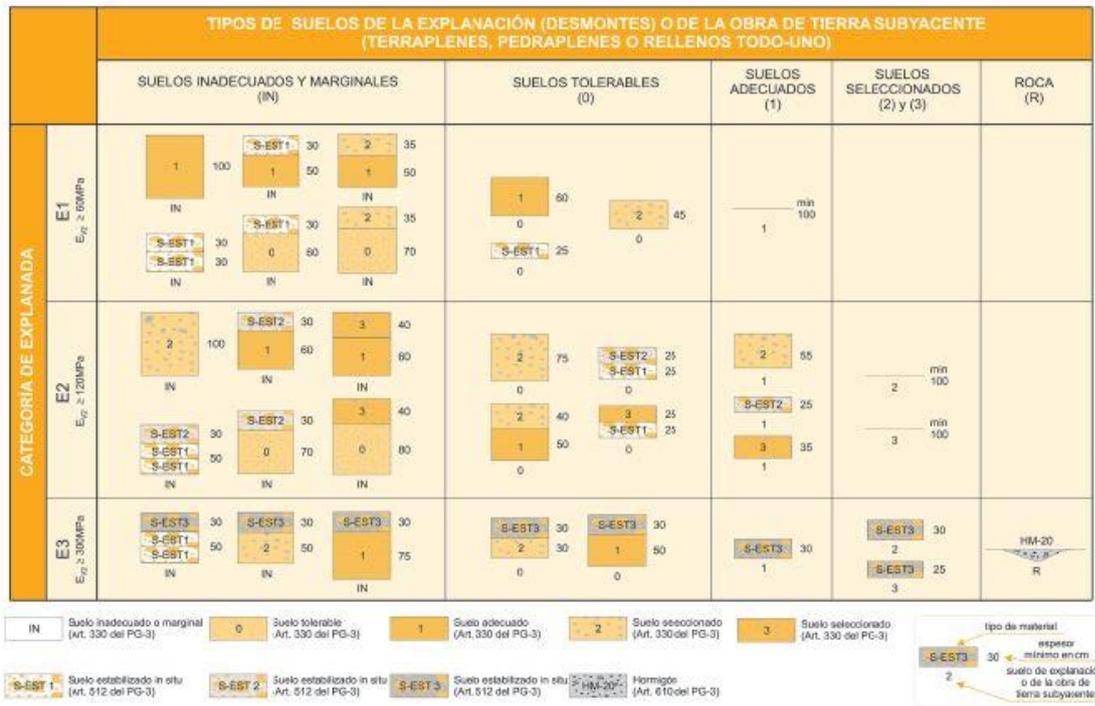


FIGURA 1. FORMACIÓN DE LA EXPLANADA

Figura 2.1 CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME PARA CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2 EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE EXPLANADA.

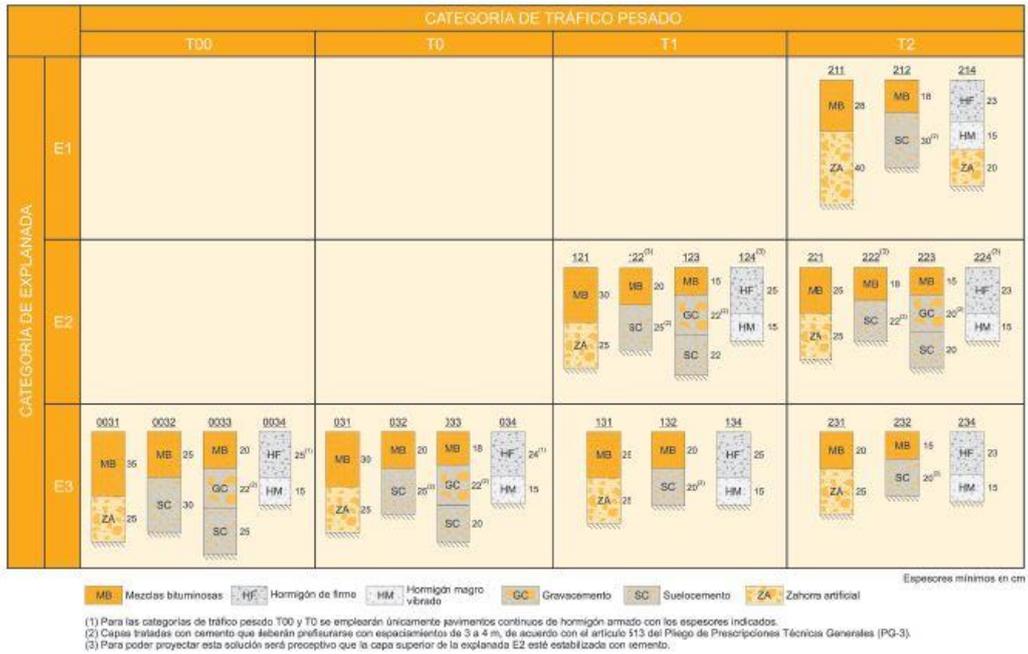


FIGURA 2.1. CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME PARA LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2, EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE EXPLANADA

FIGURA 2.2 CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME PARA LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 (T31 y T32) y T4 (T41 y T42), EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE EXPLANADA.

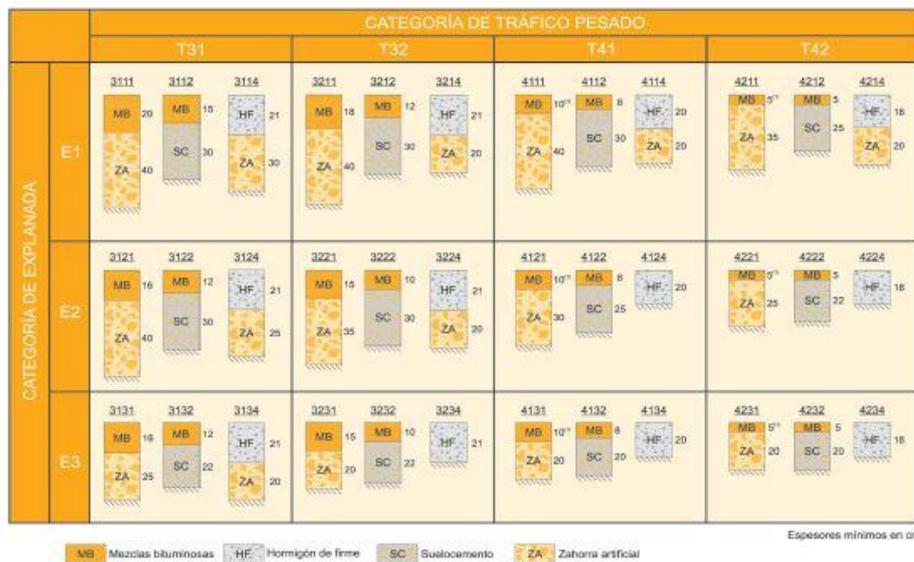


FIGURA 2.2. CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME PARA LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 (T31 y T32) y T4 (T41 y T42), EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE EXPLANADA

## IV.2) Secciones de estudio

Categorías de tráfico T31, T32, T41 y T42.

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T31	T32	T41	T42
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	<p>3111</p>	<p>3211</p>	<p>4111</p>	<p>4211</p>
	E2	<p>3121</p>	<p>3221</p>	<p>4121</p>	<p>4221</p>
	E3	<p>3131</p>	<p>3231</p>	<p>4131</p>	<p>4231</p>

Espesores mínimos en cm

MB Mezclas bituminosas	HF Hormigón de firme	SC Suelocemento	ZA Zahorra artificial
1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)	2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)	S. EST. 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.



ANEJO VII. RESULTADOS WESLEA ANÁLISIS TIPO 1



# 3131(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_3131\_A2  
 Date: Sun Sep 18 11:17:52 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.99	1
2	6000.00	0.33	10.01	1
3	480.00	0.35	24.99	1
4	1000.00	0.25	30.00	1
5	90.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	2 0.00	0.00	16.00	-920.01	-1234.66	270.10	-100.28	-170.03	163.52	13.61	0.00	582.34	0.00	-34.92	0.00
	2	2 18.75	0.00	16.00	-545.00	-1191.84	264.22	-39.81	-183.20	139.56	0.00	0.00	598.19	0.00	0.00	0.00
	3	4 0.00	0.00	41.10	-10.25	-21.33	115.29	-33.74	-47.59	123.19	6.80	0.00	498.04	0.00	-35.58	0.00
	4	4 18.75	0.00	41.10	-10.60	-21.60	128.38	-37.30	-51.05	136.43	0.00	0.00	510.06	0.00	0.00	0.00

### 3121(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output																
File:	C:\Users\Antonio\Desktop\WESLEA_3121.xls															
Date:	Tue Oct 04 03:37:45 2016															
***STRUCTURAL INFORMATION***																
Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip												
1	6000.00	0.33	16.00	1												
2	500.00	0.35	15.01	1												
3	300.00	0.35	24.99	1												
4	200.00	0.35	2537.46	1												
5	200.00	0.35	Infinite													
***LOADING CONFIGURATION***																
Axle Type:	Other															
Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)												
1	0.00	0.00	65	800.0												
2	37.49	0.00	65	800.0												
***PREDICTED PAVEMENT LIFE***																
Non-standard locations were selected. Empirical transfer functions are not applicable.																
***ENGINEERING RESPONSES***																
Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	1	0.00	0.00	16.00	-1120.82	-1460.00	242.60	-119.85	-195.03	182.38	17.77	0.00	490.25	0.00	-40.75	0.00
2	1	18.75	0.00	16.00	-779.77	-1439.13	230.49	-63.49	-209.65	160.46	0.00	0.00	510.87	0.00	0.00	0.00
3	4	0.00	0.00	56.01	0.38	-4.52	69.59	-111.98	-145.09	355.22	23.17	0.00	344.85	0.00	-11.93	0.00
4	4	18.75	0.00	56.01	-1.28	-4.86	75.15	-129.42	-153.60	386.52	0.00	0.00	356.51	0.00	0.00	0.00

# 3111(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output																
File:	C:\Users\Antonio\Desktop\WESLEA_3111.xls															
Date:	Tue Oct 04 03:51:27 2016															
***STRUCTURAL INFORMATION***																
Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip												
1	6000.00	0.33	3.99	1												
2	6000.00	0.33	16.00	1												
3	500.00	0.35	19.99	1												
4	180.00	0.35	19.99	1												
5	600.00	0.35	Infinite													
***LOADING CONFIGURATION***																
Axle Type:	Other															
Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)												
1	0.00	0.00	65	800.0												
2	37.49	0.00	65	800.0												
***PREDICTED PAVEMENT LIFE***																
Non-standard locations were selected. Empirical transfer functions are not applicable.																
***ENGINEERING RESPONSES***																
Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	19.99	-897.89	-1164.21	190.31	-96.08	-155.12	145.13	15.60	0.00	272.54	0.00	-30.23	0.00
2	2	18.75	0.00	19.99	-727.36	-1177.96	187.27	-66.74	-166.62	136.01	0.00	0.00	287.28	0.00	0.00	0.00
3	5	0.00	0.00	60.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	5	18.75	0.00	60.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 3231(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output																
File:	C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00_TFG\11_RESULTADOS_NUEVO_ICAIFR\1_EXPALANADA ELEGIDA\E3\E3_1_3231\w_3231.xls															
Date:	Thu Sep 15 14:27:59 2016															
***STRUCTURAL INFORMATION***																
Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip												
1	6000.00	0.33	5.00	1												
2	6000.00	0.33	10.01	1												
3	480.00	0.35	19.99	1												
4	1000.00	0.25	30.00	1												
5	90.00	0.35	Infinite													
***LOADING CONFIGURATION***																
Axle Type:	Other															
Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)												
1	0.00	0.00	65	800.0												
2	35.74	0.00	65	800.0												
***PREDICTED PAVEMENT LIFE***																
Non-standard locations were selected. Empirical transfer functions are not applicable.																
***ENGINEERING RESPONSES***																
Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	14.99	-940.16	-1281.72	297.82	-102.58	-178.29	171.84	13.79	0.00	616.59	0.00	-39.48	0.00
2	2	18.75	0.00	14.99	-607.49	-1275.73	298.84	-47.52	-195.65	153.38	-0.41	0.00	634.12	0.00	-0.26	0.00
3	4	18.75	0.00	35.10	-2.74	-17.86	162.74	-38.96	-57.87	167.90	-0.34	0.00	552.68	0.00	2.10	0.00
4	4	17.15	0.00	69.98	-225.71	-246.44	38.41	-173.71	-199.62	156.45	1.26	0.00	506.76	0.00	0.42	0.00

# 3221(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_3221\_A2.xls  
 Date: Sat Sep 24 13:33:07 2016

## \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	15.01	1
2	500.00	0.35	15.01	1
3	300.00	0.35	19.99	1
4	200.00	0.35	54.99	1
5	200.00	0.35	Infinite	

## \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	37.49	0.00		65 800.0
2	34.29	0.00		65 800.0

## \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

## \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	0.00	0.00	14.99	224.33	-517.92	84.49	61.23	-103.31	30.23	36.96	0.00	416.94	0.00	-92.06	0.00
	2	18.75	0.00	14.99	-994.76	-1640.67	270.33	-90.43	-233.60	190.00	39.84	0.00	547.00	0.00	-146.83	0.00
	3	4.00	0.00	50.04	8.27	-4.10	62.35	-60.58	-144.13	304.48	51.67	0.00	342.89	0.00	-28.73	0.00
	4	18.75	0.00	50.04	-1.40	-5.74	90.13	-154.70	-183.98	463.15	31.50	0.00	391.03	0.00	-20.26	0.00

# 3211(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonin\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_3211\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:35:16 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	8.00	1
2	6000.00	0.33	10.01	1
3	500.00	0.35	19.99	1
4	180.00	0.35	19.99	1
5	60.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	17.98	-1247.48	-1559.53	187.75	-132.47	-201.64	185.68	21.71	0.00	976.32	0.00	-46.17	0.00
2	2	18.75	0.00	17.98	-1023.16	-1569.98	177.99	-93.97	-215.18	172.29	0.00	0.00	1001.55	0.00	0.00	0.00
3	5	0.00	0.00	58.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	5	18.75	0.00	58.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

# 4131(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output																
File:	C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00_TFG\11_RESULTADOS_NUEVO_ICAIFR\1_EXPALANADA ELEGIDA\E3\E3_1_4131\W_A2_4131.xls															
Date:	Fri Sep 16 19:13:52 2016															
***STRUCTURAL INFORMATION***																
Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip												
1	6000.00	0.33	3.99	1												
2	6000.00	0.33	5.99	1												
3	480.00	0.35	19.99	1												
4	1000.00	0.25	30.00	1												
5	90.00	0.35	Infinite													
***LOADING CONFIGURATION***																
Axle Type:	Other															
Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)												
1	0.00	0.00	65	800.0												
2	37.49	0.00	65	800.0												
***PREDICTED PAVEMENT LIFE***																
Non-standard locations were selected. Empirical transfer functions are not applicable.																
***ENGINEERING RESPONSES***																
Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	9.96	-1072.07	-1457.94	435.84	-122.46	-208.00	211.79	9.41	0.00	703.22	0.00	-37.87	0.00
2	2	18.75	0.00	9.96	-30.52	-1238.53	380.43	42.11	-225.67	133.20	0.00	0.00	716.13	0.00	0.00	0.00
3	4	0.00	0.00	30.10	12.15	-9.29	203.14	-36.31	-63.12	202.43	6.49	0.00	595.29	0.00	-55.46	0.00
4	4	18.75	0.00	30.10	20.95	-8.85	220.28	-31.90	-69.17	217.26	0.00	0.00	614.11	0.00	0.00	0.00



# 4121(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_4121\_A2.xls  
 Date: Sat Sep 24 14:57:41 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	3.99	1
2	6000.00	0.33	5.99	1
3	480.00	0.35	30.00	1
4	200.00	0.35	54.99	1
5	200.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00	65 800.0	65 800.0
2	37.49	0.00	65 800.0	65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	2 0.00	0.00	9.96	-1309.67	-1738.15	411.52	-145.31	-240.29	236.22	14.27	0.00	597.51	0.00	-48.82	0.00
	2	2 18.75	0.00	9.96	-307.01	-1547.64	352.26	14.58	-260.43	160.72	0.00	0.00	618.67	0.00	0.00	0.00
	3	4 0.00	0.00	40.01	4.48	-8.39	118.26	-169.85	-256.79	598.15	35.44	0.00	447.33	0.00	-22.58	0.00
	4	4 18.75	0.00	40.01	2.82	-9.22	130.08	-197.42	-278.67	661.60	0.00	0.00	470.17	0.00	0.00	0.00

# 4111(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_4111\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:13:06 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	3.99	1
2	6000.00	0.33	5.99	1
3	500.00	0.35	19.99	1
4	180.00	0.35	19.99	1
5	60.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00	65 800.0	65 800.0
2	37.49	0.00	65 800.0	65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	9.96	-1515.86	-1974.45	386.16	-165.29	-266.94	256.33	18.72	0.00	1261.40	0.00	-68.93	0.00
2	2	18.75	0.00	9.96	-561.75	-1813.12	320.70	-11.54	-288.93	184.07	0.00	0.00	1298.90	0.00	0.00	0.00
3	5	0.00	0.00	50.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	5	18.75	0.00	50.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

# 4231(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonin\Desktop\civiling\00\_TFG\11\_RESULTADOS\_NUEVO\_ICAIFR\1\_EXPALANADA ELEGIDA\E3\E3\_1\_4231\w\_4231.xls  
 Date: Thu Sep 15 13:35:18 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.00	1
2	500.00	0.35	19.99	1
3	1000.00	0.25	30.00	1
4	90.00	0.35	2537.46	1
5	90.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	1	0.00	0.00	5.00	-828.48	-1049.78	704.74	-119.10	-168.16	220.76	-2.68	0.00	824.06	0.00	-22.65	0.00
2	1	18.75	0.00	5.00	1465.43	-531.96	422.67	250.25	-192.51	19.10	0.00	0.00	798.52	0.00	0.00	0.00
3	3	0.00	0.00	25.02	34.40	3.22	302.98	-42.15	-81.13	293.58	4.47	0.00	665.50	0.00	-63.61	0.00
4	3	18.75	0.00	25.02	66.48	2.45	293.89	-7.60	-87.64	276.66	0.00	0.00	686.43	0.00	0.00	0.00

# 4221(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_4221\_A2.xls  
 Date: Sat Sep 24 15:49:08 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.00	1
2	480.00	0.35	24.99	1
3	200.00	0.35	2537.46	1
4	200.00	0.35	2537.46	1
5	200.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	1	0.00	0.00	5.00	-1161.80	-1441.68	681.76	-151.84	-213.88	256.82	2.86	0.00	766.28	0.00	-41.78	0.00
2	2	18.75	0.00	5.00	1180.76	-922.61	406.46	225.18	-241.07	53.54	0.00	0.00	757.27	0.00	0.00	0.00
3	3	0.00	0.00	30.02	12.84	-12.68	190.47	-246.93	-419.22	952.07	45.97	0.00	566.11	0.00	-33.26	0.00
4	4	18.75	0.00	30.02	18.85	-14.47	201.62	-233.27	-458.18	1000.43	0.00	0.00	599.15	0.00	0.00	0.00

# 4211(ANÁLISIS TIPO 1)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_4211\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:06:33 2016

## \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.00	1
2	500.00	0.35	15.01	1
3	180.00	0.35	19.99	1
4	60.00	0.35	2537.46	1
5	60.00	0.35	Infinite	

## \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

## \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

## \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	0.00	0.00	5.00	-1250.86	-1587.65	652.52	-157.05	-231.70	264.87	4.45	0.00	1645.17	0.00	-71.88	0.00
	2	18.75	0.00	5.00	1041.35	-1103.29	381.09	213.28	-262.12	66.92	0.00	0.00	1672.19	0.00	0.00	0.00
	3	40.00	0.00	40.01	-1.16	-11.12	92.09	-491.78	-715.77	1606.57	100.76	0.00	1285.20	0.00	-17.48	0.00
	4	40.01	0.00	40.01	-2.70	-12.28	99.88	-556.12	-771.55	1752.09	0.00	0.00	1339.03	0.00	0.00	0.00



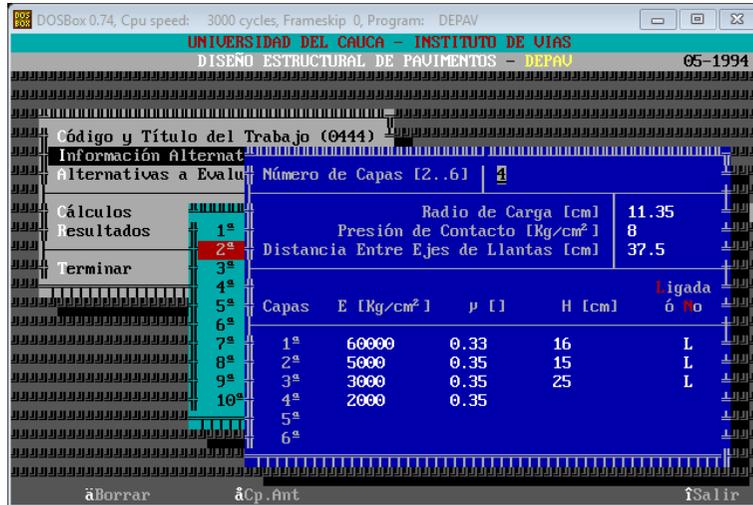
ANEJO VIII. RESULTADOS DEPAV ANÁLISIS TIPO 1



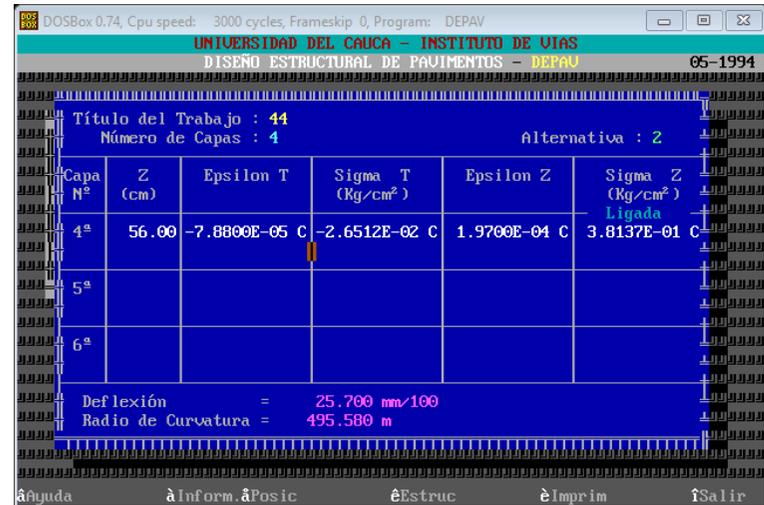
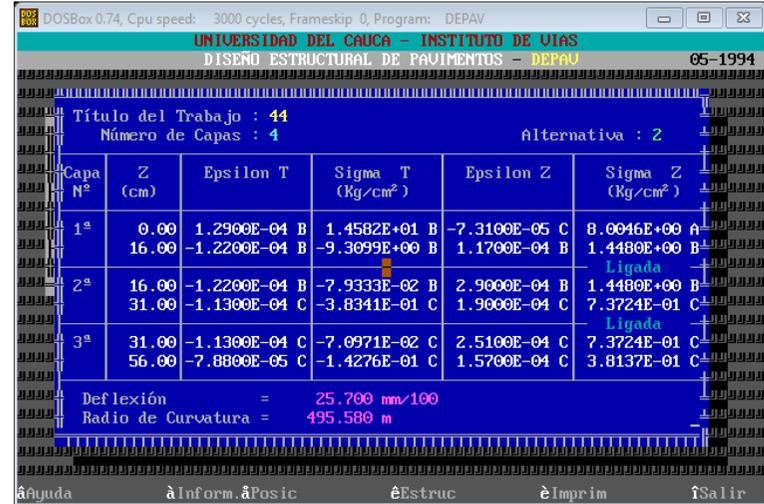


### 3121(ANÁLISIS TIPO 1)

#### Inputs



#### Resultado



# 3111(ANÁLISIS TIPO 1)

## Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Código y Título del Trabajo (0005)

Información Alternativa  
 Alternativas a Evaluar

Número de Capas [2..6] | 5

Cálculos  
 Resultados

Terminar

Radio de Carga [cm] 11.35  
 Presión de Contacto [Kg/cm²] 8  
 Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] 37.5

Capas	E [Kg/cm²]	$\mu$ [ ]	H [cm]	Ligada ó No
1ª	60000	0.33	4	L
2ª	60000	0.33	16	L
3ª	5000	0.35	20	L
4ª	1800	0.35	20	L
5ª	500	0.35		
6ª				

íSalir

## Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
 Número de Capas : 5 Alternativa : 10

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	1.2300E-04 B	1.4276E+01 B	-8.0300E-05 C	8.0046E+00 A
	4.00	5.8700E-05 C	7.6885E+00 B	-5.5800E-05 C	7.4846E+00 B
2ª	4.00	5.8700E-05 C	7.6885E+00 B	-5.5800E-05 C	7.4846E+00 B
	20.00	-1.0700E-04 B	-8.4227E+00 B	1.0000E-04 B	9.3201E-01 B
3ª	20.00	-1.0700E-04 B	-2.7022E-01 C	2.1400E-04 B	9.3201E-01 B
	40.00	-1.2800E-04 C	-7.5356E-01 C	1.6300E-04 C	3.2324E-01 C

Deflexión = 47.230 mm/100  
 Radio de Curvatura = 610.680 m

âAyuda    à Inform.    â Posic    ê Estruc    è Imprim    í Salir

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
 Número de Capas : 5 Alternativa : 10

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	40.00	-1.2800E-04 C	-1.6009E-01 C	2.3500E-04 C	3.2324E-01 C
	60.00	-1.3000E-04 C	-2.5289E-01 C	1.9500E-04 C	1.8049E-01 C
5ª	60.00	-1.3000E-04 C	-1.9578E-02 C	3.2000E-04 C	1.8049E-01 C
6ª					

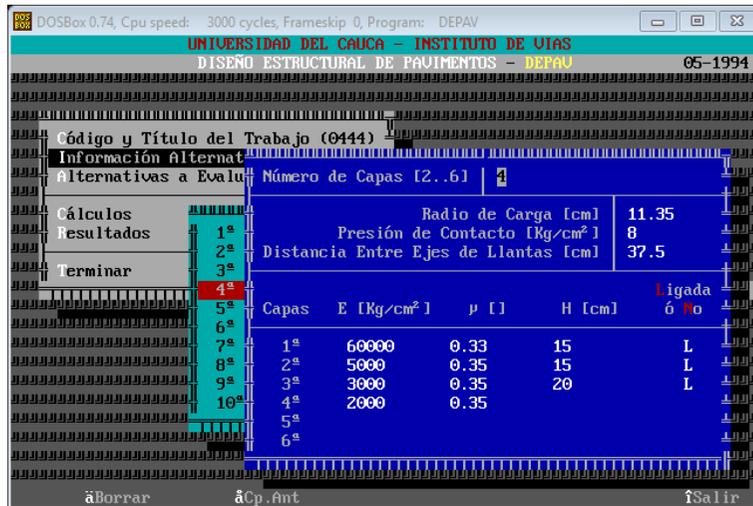
Deflexión = 47.230 mm/100  
 Radio de Curvatura = 610.680 m

âAyuda    à Inform.    â Posic    ê Estruc    è Imprim    í Salir



# 3221(ANÁLISIS TIPO 1)

## Inputs



## Resultado



### 3211(ANÁLISIS TIPO 1)

Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Código y Título del Trabajo (0005)					
Información Alternativa					
Alternativas a Evaluar					
Número de Capas [2..6]   5					
Cálculos					
Resultados					
Terminar					
Radio de Carga [cm]   11.35					
Presión de Contacto [Kg/cm²]   8					
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]   37.5					
Capas					
	E [Kg/cm²]	μ [ ]	H [cm]	Ligada	ó No
1ª	60000	0.33	8	L	
2ª	60000	0.33	10	L	
3ª	5000	0.35	20	L	
4ª	1800	0.35	20	L	
5ª	600	0.35			
6ª					

Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 03					
Número de Capas : 5					
Alternativa : 9					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	1.3600E-04 B	1.5296E+01 B	-8.8100E-05 C	8.0046E+00 A
	8.00	-8.9600E-06 A	2.4779E+00 B	-1.6000E-05 C	5.4758E+00 B
2ª	8.00	-8.9600E-06 A	2.4779E+00 B	-1.6000E-05 C	5.4758E+00 B
	18.00	-1.2000E-04 B	-9.3710E+00 B	1.1300E-04 B	1.1115E+00 B
3ª	18.00	-1.2000E-04 B	-2.6300E-01 C	2.4800E-04 B	1.1115E+00 B
	38.00	-1.4400E-04 C	-8.4125E-01 C	1.8300E-04 C	3.6811E-01 C
Deflexión = 50.110 mm/100					
Radio de Curvatura = 525.390 m					

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 03					
Número de Capas : 5					
Alternativa : 9					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	38.00	-1.4400E-04 C	-1.7641E-01 C	2.6400E-04 C	3.6811E-01 C
	58.00	-1.4600E-04 C	-2.8348E-01 C	2.1700E-04 C	1.9986E-01 C
5ª	58.00	-1.4600E-04 C	-2.2637E-02 C	3.5500E-04 C	1.9986E-01 C
6ª					
Deflexión = 50.110 mm/100					
Radio de Curvatura = 525.390 m					

# 4131(ANÁLISIS TIPO 1)

## Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS																																															
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU																																															
65-1994																																															
Código y Título del Trabajo (0003)																																															
Información Alternativa																																															
Alternativas a Evaluar																																															
Número de Capas [2..6]   5																																															
Cálculos																																															
Resultados																																															
Terminar																																															
<table border="1"> <tr> <td>Radio de Carga [cm]</td> <td>11.35</td> </tr> <tr> <td>Presión de Contacto [Kg/cm<sup>2</sup>]</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]</td> <td>37.5</td> </tr> </table>						Radio de Carga [cm]	11.35	Presión de Contacto [Kg/cm <sup>2</sup> ]	8	Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]	37.5																																				
Radio de Carga [cm]	11.35																																														
Presión de Contacto [Kg/cm <sup>2</sup> ]	8																																														
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]	37.5																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Capas</th> <th>E [Kg/cm<sup>2</sup>]</th> <th>μ [ ]</th> <th>H [cm]</th> <th>Ligada</th> <th>No</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1ª</td> <td>60000</td> <td>0.33</td> <td>4</td> <td>L</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2ª</td> <td>60000</td> <td>0.33</td> <td>6</td> <td>L</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3ª</td> <td>4800</td> <td>0.35</td> <td>20</td> <td>L</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4ª</td> <td>10000</td> <td>0.25</td> <td>30</td> <td>L</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5ª</td> <td>900</td> <td>0.35</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6ª</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Capas	E [Kg/cm <sup>2</sup> ]	μ [ ]	H [cm]	Ligada	No	1ª	60000	0.33	4	L		2ª	60000	0.33	6	L		3ª	4800	0.35	20	L		4ª	10000	0.25	30	L		5ª	900	0.35				6ª					
Capas	E [Kg/cm <sup>2</sup> ]	μ [ ]	H [cm]	Ligada	No																																										
1ª	60000	0.33	4	L																																											
2ª	60000	0.33	6	L																																											
3ª	4800	0.35	20	L																																											
4ª	10000	0.25	30	L																																											
5ª	900	0.35																																													
6ª																																															
ãBorrar      ãCp.Ant      ãSalir																																															

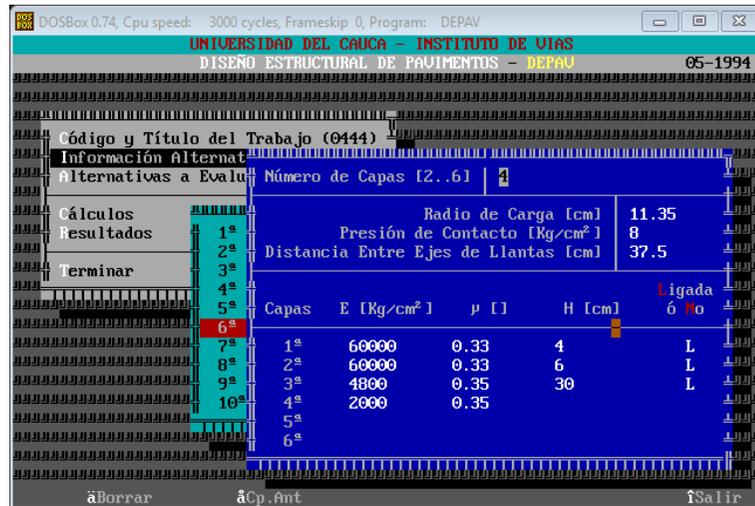
## Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 01					
Número de Capas : 5      Alternativa : 2					
Capa N <sup>o</sup>	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm <sup>2</sup> )	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm <sup>2</sup> )
1ª	0.00	1.7800E-04 B	1.8762E+01 B	-6.4700E-05 C	8.0046E+00 A
	4.00	3.5700E-05 C	5.8021E+00 B	-2.5200E-05 C	6.4649E+00 B
2ª	4.00	3.5700E-05 C	5.8021E+00 B	-2.5200E-05 C	6.4649E+00 B
	10.00	-1.6000E-04 B	-1.1930E+01 B	1.7500E-04 A	2.8144E+00 B
3ª	10.00	-1.6000E-04 B	4.2216E-01 B	5.1400E-04 B	2.8144E+00 B
	30.00	-3.7600E-05 C	3.8341E-01 C	1.7700E-04 C	1.1421E+00 C
Deflexión = 35.760 mm/100					
Radio de Curvatura = 298.520 m					
ãAyuda      ãInform.ãPosic      ãEstruc      ãImprim      ãSalir					

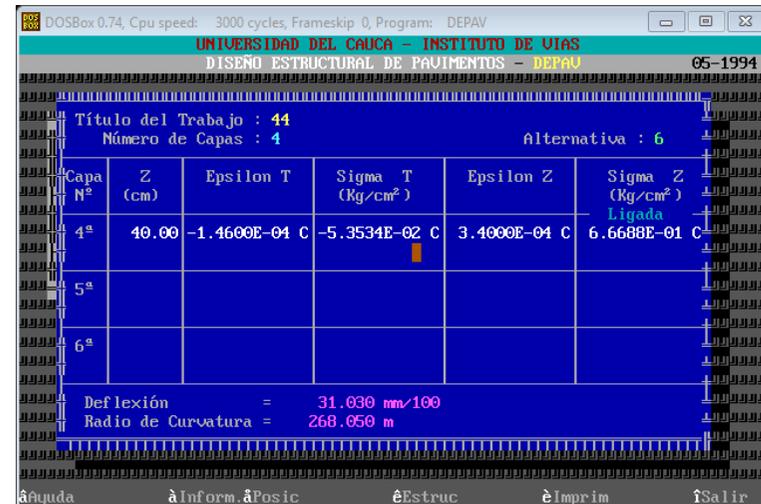
UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 01					
Número de Capas : 5      Alternativa : 2					
Capa N <sup>o</sup>	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm <sup>2</sup> )	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm <sup>2</sup> )
4ª	30.00	-3.7600E-05 C	-6.0468E-02 B	1.1300E-04 C	1.1421E+00 C
	60.00	-1.0100E-04 C	-1.2236E+00 C	8.0200E-05 C	2.2535E-01 C
5ª	60.00	-1.0100E-04 C	-1.2032E-02 C	2.5500E-04 C	2.2535E-01 C
6ª					
Deflexión = 35.760 mm/100					
Radio de Curvatura = 298.520 m					
ãAyuda      ãInform.ãPosic      ãEstruc      ãImprim      ãSalir					

# 4121(ANÁLISIS TIPO 1)

## Inputs



## Resultado



# 4111(ANÁLISIS TIPO 1)

## Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Código y Título del Trabajo (0005)

Información Alternativa  
 Alternativas a Evaluar: Número de Capas [2..6] | 5

Cálculos  
 Resultados  
 Terminar

Radio de Carga [cm] 11.35  
 Presión de Contacto [Kg/cm²] 8  
 Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] 37.5

Capas	E [Kg/cm²]	$\mu$ [ ]	H [cm]	Ligada ó No
1ª	60000	0.33	4	L
2ª	60000	0.33	6	L
3ª	5000	0.35	20	L
4ª	1800	0.35	20	L
5ª	500	0.35		
6ª				

íSalir

## Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
 Número de Capas : 5 Alternativa : 8

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	2.2700E-04 B	2.2841E+01 B	-1.1200E-04 C	8.0046E+00 A
	4.00	5.4000E-05 C	7.1277E+00 B	-4.1900E-05 C	6.4037E+00 B
2ª	4.00	5.4000E-05 C	7.1277E+00 B	-4.1900E-05 C	6.4037E+00 B
	10.00	-1.9000E-04 B	-1.4582E+01 B	1.9000E-04 B	2.5594E+00 B
3ª	10.00	-1.9000E-04 B	-5.0067E-02 C	4.9500E-04 B	2.5594E+00 B
	30.00	-2.4800E-04 C	-1.3766E+00 C	2.9900E-04 C	6.5669E-01 C

Deflexión = 64.930 mm/100  
 Radio de Curvatura = 233.370 m

âAyuda    âInform.âPosic    êEstruc    èImprim    íSalir

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
 Número de Capas : 5 Alternativa : 8

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	30.00	-2.4800E-04 C	-2.6818E-01 C	4.4500E-04 C	6.5669E-01 C
	50.00	-2.4100E-04 C	-4.6396E-01 C	3.4400E-04 C	3.1509E-01 C
5ª	50.00	-2.4100E-04 C	-4.1604E-02 C	5.6200E-04 C	3.1509E-01 C
6ª					

Deflexión = 64.930 mm/100  
 Radio de Curvatura = 233.370 m

âAyuda    âInform.âPosic    êEstruc    èImprim    íSalir



## 4221(ANÁLISIS TIPO 1)

### Inputs

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAV 05-1994

Código y Título del Trabajo (0444)

Información Alternativa

Alternativas a Evaluar: Número de Capas [2..6] | 3

Cálculos

Resultados

Terminar

Radio de Carga [cm]	11.35
Presión de Contacto [Kg/cm <sup>2</sup> ]	8
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]	37.5

Capas	E [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\mu$ [ ]	H [cm]	Ligada
1ª	60000	0.33	5	L
2ª	4800	0.35	25	L
3ª	2000	0.35		
4ª				
5ª				
6ª				

âBorrar    âCp.Ant    îSalir

### Resultado

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAV 05-1994

Título del Trabajo : 44

Número de Capas : 3      Alternativa : 8

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm <sup>2</sup> )	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm <sup>2</sup> )
1ª	0.00	2.9500E-04 B	2.9265E+01 B	-1.7500E-04 B	8.0046E+00 A
	5.00	-2.2400E-04 B	-1.7029E+01 A	-1.8400E-05 C	5.4044E+00 A
2ª	5.00	-2.2400E-04 B	1.3154E+00 B	9.3800E-04 A	5.4044E+00 A
	30.00	-2.4900E-04 C	-1.0085E+00 C	3.3300E-04 B	1.0401E+00 C
3ª	30.00	-2.4900E-04 C	-9.4628E-02 C	5.1900E-04 B	1.0401E+00 C

Deflexión = 37.400 mm/100

Radio de Curvatura = 138.500 m

âAyuda    âInform.âPosic    êEstruc    èImprim    îSalir



ANEJO IX. RESULTADOS ICAFIR. ANÁLISIS TIPO 2



COMPROBACIÓN ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONAL SECCIONES

CATEGORIA DE TRÁFICO T31

3131

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	6,00	MB-SD	6000	0,33																							
1	10,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000101659	0,000133644	0,000127724	1,336E-004	1,857E-004	SIN CS							-1,015165E-005	-2,156938E-005	-7,799628E-005	-	-	-			
					Inferior	6,00	3,40563E-06	1,3189E-05	2,43196E-05	2,432E-005	1,857E-004	1741,71	6,722701E-005	6,236901E-005	-2,684730E-005	-	-	-									
2	25,00	ZA	480	0,35	Superior	6,00	3,40563E-06	1,3189E-05	2,43196E-05	2,432E-005	1,857E-004	1741,71							6,722701E-005	6,236901E-005	-2,684730E-005	-	-	-			
					Inferior	16,00	-9,9502E-05	-0,000124875	-0,000118488	1,249E-004	1,857E-004	4,29	1,119535E-004	1,192654E-004	7,822758E-005	-	-	-									
3	#¡NUM!	CIM	160	0,35	Superior	16,00													2,679814E-004	2,965137E-004	2,147389E-004	-	-	-			
					Inferior	41,00							1,159202E-004	1,661331E-004	1,808110E-004	-	-	-									
					Superior	41,00													1,920840E-004	2,813540E-004	3,051595E-004	3,052E-004	5,243E-004	6,91	2,513.537		
																							Agrietamiento		3131		
N C1 LI	585.324	vehp			N C1 LS	1.170.647	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.															FS ICAFIR C1 LI	4,29	FS ICAFIR C1 LS	2,15	
N C2 LI	647.307	vehp			N C2 LS	1.294.615	vehp	Contacto adherente															FS ICAFIR C2 LI	3,88	FS ICAFIR C2 LS	1,94	
N C3 LI	717.354	vehp			N C3 LS	1.434.708	vehp																FS ICAFIR C3 LI	3,50	FS ICAFIR C3 LS	1,75	
N C4 LI	590.899	vehp			N C4 LS	1.181.799	vehp																FS ICAFIR C4 LI	4,25	FS ICAFIR C4 LS	2,13	

3121

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	6,00	MB-SD	6000	0,33																							
1	10,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000101634	0,000133518	0,000127702	1,335E-004	1,857E-004	SIN CS								-1,012664E-005	-2,127279E-005	-7,712617E-005	-	-	-		
					Inferior	6,00	2,44119E-06	1,13482E-05	2,24568E-05	2,246E-005	1,857E-004	2333,49	6,819760E-005	6,413808E-005	-2,509997E-005	-	-	-									
2	15,00	ZA	500	0,35	Superior	6,00	2,44119E-06	1,13482E-05	2,24568E-05	2,246E-005	1,857E-004	2333,49							6,819760E-005	6,413808E-005	-2,509997E-005	-	-	-			
					Inferior	16,00	-0,000102038	-0,000129713	-0,000123662	1,297E-004	1,857E-004	3,74	1,145572E-004	1,237537E-004	8,334548E-005	-	-	-									
3	25,00	ZA	480	0,35	Superior	16,00														2,654474E-004	2,957542E-004	2,153831E-004	-	-	-		
					Inferior	31,00							1,730689E-004	2,246956E-004	2,341048E-004	-	-	-									
4	#¡NUM!	CIM	160	0,35	Superior	31,00														7,276163E-005	9,077309E-005	9,266223E-005	9,266E-005	5,243E-004	487,69		
					Inferior	56,00							8,056851E-005	1,216524E-004	1,335866E-004	1,336E-004	5,243E-004	132,06									
					Superior	56,00													1,449570E-004	2,244066E-004	2,448134E-004	2,448E-004	5,243E-004	15,18	2,186.191		
																							Agrietamiento		3121		
N C1 LI	585.324	vehp			N C1 LS	1.170.647	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.															FS ICAFIR C1 LI	3,74	FS ICAFIR C1 LS	1,87	
N C2 LI	647.307	vehp			N C2 LS	1.294.615	vehp	Contacto adherente															FS ICAFIR C2 LI	3,38	FS ICAFIR C2 LS	1,69	
N C3 LI	717.354	vehp			N C3 LS	1.434.708	vehp																FS ICAFIR C3 LI	3,05	FS ICAFIR C3 LS	1,52	
N C4 LI	590.899	vehp			N C4 LS	1.181.799	vehp																FS ICAFIR C4 LI	3,70	FS ICAFIR C4 LS	1,85	

3111

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	4,00	MB-SD	6000	0,33																							
1	6,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	9,120954E-005	1,290577E-004	1,239261E-004	1,291E-004	1,857E-004	SIN CS								1,419462E-007	-2,066569E-005	-8,585724E-005	-	-	-		
					Inferior	4,00	2,926594E-005	5,213625E-005	6,215958E-005	6,216E-005	1,857E-004	55,59	5,510750E-005	4,115827E-005	-5,911929E-005	-	-	-									
2	10,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	4,00	2,926594E-005	5,213625E-005	6,215958E-005	6,216E-005	1,857E-004	55,59								5,510750E-005	4,115827E-005	-5,911929E-005	-	-	-		
					Inferior	10,00	-1,764858E-005	-1,538384E-005	-5,564835E-006	1,765E-005	1,857E-004	5650,67	6,873239E-005	6,639598E-005	-1,475848E-006	-	-	-									
3	20,00	ZA	500	0,35	Superior	10,00	-1,764858E-005	-1,538384E-005	-5,564835E-006	1,765E-005	1,757E-004	5650,67								6,873239E-005	6,639598E-005	-1,475848E-006	-	-	-		
					Inferior	20,00	-8,296423E-005	-1,151482E-004	-1,148664E-004	1,151E-004	1,853E-004	5,78	9,022938E-005	1,068838E-004	8,695513E-005	-	-	-									
4	20,00	ZA	180	0,35	Superior	20,00														1,835483E-004	2,158070E-004	1,747118E-004	2,158E-004	5,243E-004	23,81		
					Inferior	40,00							1,237554E-004	1,861349E-004	1,984862E-004	1,985E-004	5,243E-004	32,11									
5	#¡NUM!	CIM	60	0,35	Superior	40,00														7,813092E-005	1,159131E-004	1,226906E-004	1,227E-004				
					Inferior	60,00							9,153398E-005	1,498894E-004	1,606122E-004	1,606E-004											
					Superior	60,00													1,715546E-004	2,876099E-004	3,060381E-004	3,060E-004	5,243E-004	6,84	3,385.034		
																							Agrietamiento		3111		
N C1 LI	585.324	vehp			N C1 LS	1.170.647	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.															FS ICAFIR C1 LI	5,78	FS ICAFIR C1 LS	2,89	
N C2 LI	647.307	vehp			N C2 LS	1.294.615	vehp	Contacto adherente															FS ICAFIR C2 LI	5,23	FS ICAFIR C2 LS	2,61	
N C3 LI	717.354	vehp			N C3 LS	1.434.708	vehp																FS ICAFIR C3 LI	4,72	FS ICAFIR C3 LS	2,36	
N C4 LI	590.899	vehp			N C4 LS	1.181.799	vehp																FS ICAFIR C4 LI	5,73	FS ICAFIR C4 LS	2,86	



COMPROBACIÓN ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONAL SECCIONES

CATEGORIA DE TRÁFICO T32

3231

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	5,00	MB-SD	6000	0,33																							
1	10,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000111885	0,000146496	0,000140417	1,465E-004	2,243E-004	SIN CS								-2,022535E-005	-3,186436E-005	-8,447895E-005	-	-	-	3231	
					Inferior	5,00	1,59998E-05	2,92681E-05	3,95132E-05	3,951E-005	2,243E-004	586,51	5,921647E-005	5,333025E-005	-3,729670E-005	-	-	-									
2	20,00	ZA	480	0,35	Superior	5,00	1,59998E-05	2,92681E-05	3,95132E-05	3,951E-005	2,243E-004	586,51								5,921647E-005	5,333025E-005	-3,729670E-005	-	-	-	3231	
					Inferior	15,00	-0,000110194	-0,000137484	-0,00012923	1,375E-004	2,243E-004	6,03	1,234759E-004	1,309253E-004	8,285289E-005	-	-	-									
3	#¡NUM!	CIM	160	0,35	Superior	15,00														2,909240E-004	3,195178E-004	2,218975E-004	-	-	-	3231	
					Inferior	35,00							1,462641E-004	1,993646E-004	2,138928E-004	-	-	-									
					Superior	35,00													2,429851E-004	3,397266E-004	3,641105E-004	3,641E-004	6,366E-004	7,35	1.765.781		
																							Agrietamiento				
N C1 LI	292.662	vehp			N C1 LS	585.324	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.															FS ICAFIR C1 LI	6,03	FS ICAFIR C1 LS	3,02	3231
N C2 LI	323.654	vehp			N C2 LS	647.307	vehp	Contacto adherente															FS ICAFIR C2 LI	5,46	FS ICAFIR C2 LS	2,73	
N C3 LI	358.677	vehp			N C3 LS	717.354	vehp																FS ICAFIR C3 LI	4,92	FS ICAFIR C3 LS	2,46	
N C4 LI	295.450	vehp			N C4 LS	590.899	vehp																FS ICAFIR C4 LI	5,98	FS ICAFIR C4 LS	2,99	

3221

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	6,00	MB-SD	6000	0,33																							
1	9,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000104398	0,000134439	0,000127368	1,344E-004	2,243E-004	SIN CS								-1,284924E-005	-2,206183E-005	-7,415138E-005	-	-	-	3221	
					Inferior	6,00	1,20443E-06	9,59714E-06	2,00381E-05	2,004E-005	2,243E-004	7090,96	6,785670E-005	6,369251E-005	-2,245466E-005	-	-	-									
2	15,00	ZA	500	0,35	Superior	6,00	1,20443E-06	9,59714E-06	2,00381E-05	2,004E-005	2,243E-004	7090,96								6,785670E-005	6,369251E-005	-2,245466E-005	-	-	-	3221	
					Inferior	15,00	-0,000103004	-0,000125585	-0,000116591	1,256E-004	2,243E-004	8,41	1,178328E-004	1,223162E-004	7,330472E-005	-	-	-									
3	20,00	ZA	480	0,35	Superior	15,00														2,922327E-004	3,171392E-004	2,202430E-004	-	-	-	3221	
					Inferior	30,00							1,366971E-004	1,733751E-004	1,782881E-004	-	-	-									
4	#¡NUM!	CIM	160	0,35	Superior	30,00														0,000139805	0,000177374	0,000182426	-	-	-	3221	
					Inferior	50,00							9,31084E-05	0,000140011	0,000153552	-	-	-									
					Superior	50,00													1,533623E-004	2,346905E-004	2,561958E-004	2,562E-004	6,366E-004	25,81	2.461.777		
																							Agrietamiento				
N C1 LI	292.662	vehp			N C1 LS	585.324	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.															FS ICAFIR C1 LI	8,41	FS ICAFIR C1 LS	4,21	3221
N C2 LI	323.654	vehp			N C2 LS	647.307	vehp	Contacto adherente															FS ICAFIR C2 LI	7,61	FS ICAFIR C2 LS	3,80	
N C3 LI	358.677	vehp			N C3 LS	717.354	vehp																FS ICAFIR C3 LI	6,86	FS ICAFIR C3 LS	3,43	
N C4 LI	295.450	vehp			N C4 LS	590.899	vehp																FS ICAFIR C4 LI	8,33	FS ICAFIR C4 LS	4,17	

3211

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	8,00	MB-SD	6000	0,33																							
1	10,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000102016	0,000142898	0,000138141	1,429E-004	2,243E-004	SIN CS								-1,050275E-005	-3,171493E-005	-9,397173E-005	-	-	-	3211	
					Inferior	8,00	-8,89775E-06	-1,84672E-06	9,54566E-06	9,546E-006	2,243E-004	107856,04	6,949709E-005	6,452424E-005	-1,626217E-005	-	-	-									
2	20,00	ZA	500	0,35	Superior	8,00	-8,89775E-06	-1,84672E-06	9,54566E-06	9,546E-006	2,243E-004	107856,04								6,949709E-005	6,452424E-005	-1,626217E-005	-	-	-	3211	
					Inferior	18,00	-9,52337E-05	-0,000128862	-0,000126423	1,289E-004	2,243E-004	7,65	1,041727E-004	1,202328E-004	9,191342E-005	-	-	-									
3	20,00	ZA	180	0,35	Superior	18,00														2,173330E-004	2,498389E-004	1,914703E-004	-	-	-	3211	
					Inferior	38,00							1,426901E-004	2,104567E-004	2,243590E-004	-	-	-									
4	#¡NUM!	CIM	60	0,35	Superior	38,00														9,00284E-05	0,000130625	0,000138036	-	-	-	3211	
					Inferior	58,00							0,000104886	0,000169234	0,000182009	-	-	-									
					Superior	58,00													1,954778E-004	3,231777E-004	3,451569E-004	3,452E-004	6,366E-004	8,90	2.239.668		
																							Agrietamiento				
N C1 LI	292.662	vehp			N C1 LS	585.324	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.															FS ICAFIR C1 LI	7,65	FS ICAFIR C1 LS	3,83	3211
N C2 LI	323.654	vehp			N C2 LS	647.307	vehp	Contacto adherente															FS ICAFIR C2 LI	6,92	FS ICAFIR C2 LS	3,46	
N C3 LI	358.677	vehp			N C3 LS	717.354	vehp																FS ICAFIR C3 LI	6,24	FS ICAFIR C3 LS	3,12	
N C4 LI	295.450	vehp			N C4 LS	590.899	vehp																FS ICAFIR C4 LI	7,58	FS ICAFIR C4 LS	3,79	



COMPROBACIÓN ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONAL SECCIONES

CATEGORIA DE TRÁFICO T41

4131

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)									
0	4,00	MB-SD	6000	0,33																														
4131 MB 10" ZA 20 S-EST3 30 1	6,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000172693	0,000210653	0,00019199	2,107E-004	2,781E-004	SIN CS								-8,012549E-005	-8,626259E-005	-9,474822E-005	-	-	-	4131 MB 10" ZA 20 S-EST3 30 1								
					Inferior	4,00	2,62402E-05	3,89423E-05	4,43526E-05	4,435E-005	2,781E-004	844,34	4,561995E-005	4,092915E-005	-3,237165E-005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-						
2	20,00	ZA	480	0,35	Superior	4,00	2,62402E-05	3,89423E-05	4,43526E-05	4,435E-005	2,781E-004	844,34								4,561995E-005	4,092915E-005	-3,237165E-005	-	-	-	4131 MB 10" ZA 20 S-EST3 30 1								
					Inferior	10,00	-0,000165239	-0,000189341	-0,000160815	1,893E-004	2,781E-004	4,10	1,900959E-004	1,888434E-004	7,493890E-005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-						
3	#NUM!	CIM	160	0,35	Superior	10,00														4,932516E-004	5,077257E-004	2,598852E-004	-	-	-	4131 MB 10" ZA 20 S-EST3 30 1								
					Inferior	30,00																	2,287459E-004	2,842490E-004	2,970286E-004		-	-	-					
					Superior	30,00														3,794168E-004	4,845221E-004	5,084010E-004	5,084E-004	7,939E-004	4,91	545.432								
																							Contacto adherente		FS ICAFIR C1 LI 4,10 FS ICAFIR C1 LS 2,05		FS ICAFIR C2 LI 3,71 FS ICAFIR C2 LS 1,85		FS ICAFIR C3 LI 3,35 FS ICAFIR C3 LS 1,67		FS ICAFIR C4 LI 4,06 FS ICAFIR C4 LS 2,07		4131	

4121

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)									
0	4,00	MB-SD	6000	0,33																														
4121 MB 10" ZA 30 min 100 1	6,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000163778	0,00019727	0,000177116	1,973E-004	2,781E-004	SIN CS								-7,134350E-005	-7,594712E-005	-8,270316E-005	-	-	-	4121 MB 10" ZA 30 min 100 1								
					Inferior	4,00	2,38412E-05	3,55455E-05	4,05061E-05	4,051E-005	2,781E-004	1177,97	4,832574E-005	4,372227E-005	-2,908173E-005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-						
2	30,00	ZA	480	0,35	Superior	4,00	2,38412E-05	3,55455E-05	4,05061E-05	4,051E-005	2,781E-004	1177,97								4,832574E-005	4,372227E-005	-2,908173E-005	-	-	-	4121 MB 10" ZA 30 min 100 1								
					Inferior	10,00	-0,00015836	-0,000178378	-0,000148816	1,784E-004	2,781E-004	5,10	1,845205E-004	1,811010E-004	6,583907E-005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-						
3	#NUM!	CIM	160	0,35	Superior	10,00														4,997004E-004	5,107946E-004	2,617107E-004	-	-	-	4121 MB 10" ZA 30 min 100 1								
					Inferior	40,00																	1,566539E-004	2,109037E-004	2,310955E-004		-	-	-					
					Superior	40,00														2,580664E-004	3,553535E-004	3,883852E-004	3,884E-004	7,939E-004	12,85	678.933								
																							Contacto adherente		FS ICAFIR C1 LI 5,10 FS ICAFIR C1 LS 2,55		FS ICAFIR C2 LI 4,61 FS ICAFIR C2 LS 2,31		FS ICAFIR C3 LI 4,16 FS ICAFIR C3 LS 2,08		FS ICAFIR C4 LI 5,06 FS ICAFIR C4 LS 2,58		4121	

4111

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	E MPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)									
0	4,00	MB-SD	6000	0,33																														
4111 MB 10" ZA 40 min 100 1	6,00	MB-SD	6000	0,33	Superior	0,00	0,000188442	0,000240012	0,00022922	2,400E-004	2,781E-004	SIN CS								-9,563923E-005	-1,127746E-004	-1,241001E-004	-	-	-	4111 MB 10" ZA 40 min 100 1								
					Inferior	4,00	3,25269E-05	5,03863E-05	5,63847E-05	5,638E-005	2,781E-004	349,85	3,938456E-005	3,057338E-005	-4,400694E-005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-						
2	20,00	ZA	500	0,35	Superior	4,00	3,25269E-05	5,03863E-05	5,63847E-05	5,638E-005	2,781E-004	349,85								3,938456E-005	3,057338E-005	-4,400694E-005	-	-	-	4111 MB 10" ZA 40 min 100 1								
					Inferior	10,00	-0,000172484	-0,000203843	-0,000176254	2,038E-004	2,781E-004	3,13	1,967666E-004	2,013261E-004	8,914955E-005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-						
3	20,00	ZA	180	0,35	Superior	10,00														4,832792E-004	5,008042E-004	2,544525E-004	-	-	-	4111 MB 10" ZA 40 min 100 1								
					Inferior	30,00																	2,828570E-004	3,695051E-004	3,850845E-004		-	-	-					
4	#NUM!	CIM	60	0,35	Superior	30,00														0,000180814	0,000228979	0,000233007	-	-	-	4111 MB 10" ZA 40 min 100 1								
					Inferior	50,00																	0,000196474	0,00028913	0,00031577		-	-	-					
					Superior	50,00														3,560793E-004	5,395979E-004	5,857811E-004	5,858E-004	7,939E-004	2,96	393.933								
																							Contacto parcial		FS ICAFIR C1 LI 2,96 FS ICAFIR C1 LS 1,48		FS ICAFIR C2 LI 2,68 FS ICAFIR C2 LS 1,34		FS ICAFIR C3 LI 2,42 FS ICAFIR C3 LS 1,21		FS ICAFIR C4 LI 2,93 FS ICAFIR C4 LS 1,50		4111	



COMPROBACIÓN ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONAL SECCIONES

CATEGORIA DE TRÁFICO T42

4231

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	EMPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)	
0	5,00	MB-SD	6000	0,33																						
4231 MB 5 <sup>(1)</sup> ZA 20 S-EST3 30	1	20,00	ZA	480	0,35	Superior	0,00	2,833767E-004	3,174802E-004	0,000234786	3,175E-004	2,781E-004	SIN CS						-1,891571E-004	-1,919479E-004	-4,885312E-005	-	-	-		
						Inferior	5,00	-2,258751E-004	-2,308560E-004	-0,000139846	2,309E-004	2,781E-004	1,98										2,823042E-004	2,715126E-004	-1,332098E-005	-
	2	#NUM!	CIM	160	0,35	Superior	5,00													9,333300E-004	9,227327E-004	1,514322E-004	-	-	-	
						Inferior	25,00																3,967558E-004	4,379137E-004	3,954291E-004	4,379E-004
						Superior	25,00													6,559680E-004	7,443579E-004	6,873852E-004	7,444E-004	7,939E-004	1,26	
																							167.428	Hundimiento		
N C1 LI	vehp		N C1 LS	133.028	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.																FS ICAFIR C1 LI	FS ICAFIR C1 LS	1,26	4231	
N C2 LI	vehp		N C2 LS	147.115	vehp	Contacto parcial																FS ICAFIR C2 LI	FS ICAFIR C2 LS	1,14		
N C3 LI	vehp		N C3 LS	163.035	vehp															FS ICAFIR C3 LI	FS ICAFIR C3 LS	1,03				
N C4 LI	vehp		N C4 LS	134.295	vehp															FS ICAFIR C4 LI	FS ICAFIR C4 LS	1,25				

4221

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	EMPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)		
0	5,00	MB-SD	6000	0,33																							
4221 MB 5 <sup>(1)</sup> ZA 25 min 100	1	25,00	ZA	480	0,35	Superior	0,00	2,734359E-004	3,048707E-004	0,000220694	3,049E-004	2,781E-004	SIN CS							-1,793646E-004	-1,828316E-004	-3,965827E-005	-	-	-		
						Inferior	5,00	-2,207082E-004	-2,237295E-004	-0,000132023	2,237E-004	2,781E-004	2,22											2,779587E-004	2,666291E-004	-1,862997E-005	-
	2	#NUM!	ZA	160	0,35	Superior	5,00														9,363547E-004	9,239588E-004	1,492278E-004	-	-	-	
						Inferior	30,00																	3,057804E-004	3,527129E-004	3,475845E-004	-
						Superior	30,00														5,032427E-004	5,965415E-004	5,945707E-004	5,965E-004	7,939E-004	2,77	
																							295.597	Arietamiento			
N C1 LI	vehp		N C1 LS	133.028	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.																FS ICAFIR C1 LI	FS ICAFIR C1 LS	2,22	4221		
N C2 LI	vehp		N C2 LS	147.115	vehp	Contacto adherente																FS ICAFIR C2 LI	FS ICAFIR C2 LS	2,01			
N C3 LI	vehp		N C3 LS	163.035	vehp																FS ICAFIR C3 LI	FS ICAFIR C3 LS	1,81				
N C4 LI	vehp		N C4 LS	134.295	vehp																FS ICAFIR C4 LI	FS ICAFIR C4 LS	2,20				

4211

Capa	Esp. cm	Tipo de Capa	EMPa	v	Lado	Prof. cm	et (1)	et (2)	et (3)	et max	et fallo ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ot (1) Mpa	ot (2) Mpa	ot (3) Mpa	ot MAX Mpa	ot FALLO ICAFIR para C1	FS (C1) x capa*	ev (1)	ev (2)	ev (3)	ez max	ez fallo ICAFIR para C1	CS x capa* para C1	Fallo Estructural (Nadm)			
0	5,00	MB-SD	6000	0,33																								
4211 MB 5 <sup>(1)</sup> ZA 35 min 100	1	15,00	ZA	500	0,35	Superior	0,00	3,260220E-004	3,822150E-004	0,000306525	3,822E-004	2,781E-004	SIN CS								-2,311659E-004	-2,436464E-004	-1,065768E-004	-	-	-		
						Inferior	5,00	-2,412469E-004	-2,551787E-004	-0,000168539	2,552E-004	2,781E-004	1,37												2,954505E-004	2,884052E-004	9,912686E-006	-
	2	20,00	ZA	180	0,35	Superior	5,00															9,001681E-004	8,954083E-004	1,547248E-004	-	-	-	
						Inferior	20,00																		6,499618E-004	7,219317E-004	5,993659E-004	-
1	3	#NUM!	CIM	60	0,35	Superior	20,00															4,462812E-004	4,801832E-004	3,601515E-004	-	-	-	
						Inferior	40,00																		4,012899E-004	5,194392E-004	5,550209E-004	-
						Superior	40,00															7,071224E-004	9,473026E-004	1,013647E-003	1,014E-003	7,939E-004	0,42	
																							55.575	Hundimiento				
N C1 LI	vehp		N C1 LS	133.028	vehp	(1) Bajo rueda simple. (2) Bajo una de las ruedas gemelas. (3) Bajo el centro de las ruedas gemelas.																FS ICAFIR C1 LI	FS ICAFIR C1 LS	0,42	4211			
N C2 LI	vehp		N C2 LS	147.115	vehp	Contacto parcial																FS ICAFIR C2 LI	FS ICAFIR C2 LS	0,38				
N C3 LI	vehp		N C3 LS	163.035	vehp																	FS ICAFIR C3 LI	FS ICAFIR C3 LS	0,34				
N C4 LI	vehp		N C4 LS	134.295	vehp																	FS ICAFIR C4 LI	FS ICAFIR C4 LS	0,41				



ANEJO X. RESULTADOS WESLEA ANÁLISIS TIPO 3



### 3131(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_3131\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 11:19:45 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.99	1
2	6000.00	0.33	10.01	1
3	480.00	0.35	24.99	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	16.00	-1171.22	-1514.33	237.03	-124.95	-201.01	187.21	18.73	0.00	571.62	0.00	-43.77	0.00
2	2	18.75	0.00	16.00	-829.82	-1494.45	224.88	-68.48	-215.80	165.31	0.00	0.00	593.95	0.00	0.00	0.00
3	4	0.00	0.00	41.10	2.55	-5.05	86.43	-162.10	-226.21	545.67	33.49	0.00	481.07	0.00	-15.30	0.00
4	4	18.75	0.00	41.10	1.07	-5.58	93.76	-186.17	-242.36	595.86	0.00	0.00	500.07	0.00	0.00	0.00

# 3121(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_3121\_A1.xls  
 Date: Sat Sep 24 13:03:30 2016

## \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	16.00	1
2	500.00	0.35	15.01	1
3	480.00	0.35	24.99	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

## \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

## \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

## \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	0.00	0.00	16.00	-1041.41	-1366.10	254.66	-112.44	-184.41	174.86	16.16	0.00	514.98	0.00	-40.94	0.00
	2	18.75	0.00	16.00	-685.50	-1334.78	244.11	-54.26	-198.19	151.80	0.00	0.00	533.89	0.00	0.00	0.00
	3	4.00	0.00	56.03	-0.63	-5.00	60.97	-126.38	-163.30	393.41	26.09	0.00	394.82	0.00	-10.48	0.00
	4	4.00	0.00	56.03	-2.14	-5.37	65.80	-145.61	-172.80	427.68	0.00	0.00	407.36	0.00	0.00	0.00

### 3111(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_3111\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:39:03 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	3.99	1
2	6000.00	0.33	16.00	1
3	500.00	0.35	19.99	1
4	180.00	0.35	19.99	1
5	60.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	2 0.00	0.00	19.99	-1168.15	-1446.56	160.98	-123.99	-185.70	170.64	21.06	0.00	922.34	0.00	-40.77	0.00
	2	2 18.75	0.00	19.99	-1013.24	-1470.48	155.13	-96.53	-197.88	162.46	0.00	0.00	944.67	0.00	0.00	0.00
	3	5 0.00	0.00	60.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	5 18.75	0.00	60.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 3231(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_3231\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 11:04:57 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.00	1
2	6000.00	0.33	10.01	1
3	480.00	0.35	19.99	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1		2 0.00	0.00	14.99	-1274.39	-1646.62	247.75	-135.46	-217.97	201.95	20.06	0.00	615.62	0.00	-47.16	0.00
2		2 18.75	0.00	14.99	-882.87	-1620.95	230.70	-70.68	-234.29	176.16	0.00	0.00	640.94	0.00	0.00	0.00
3		4 0.00	0.00	35.00	5.13	-4.96	104.61	-185.88	-271.10	653.43	38.02	0.00	533.81	0.00	-18.57	0.00
4		4 18.75	0.00	35.00	4.21	-5.60	113.30	-209.27	-292.08	711.19	0.00	0.00	557.25	0.00	0.00	0.00

### 3221(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_3221\_A1.xls  
 Date: Sat Sep 24 13:29:55 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	15.01	1
2	500.00	0.35	15.01	1
3	300.00	0.35	19.99	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	37.49	0.00		65 800.0
2	34.29	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	1 0.00	0.00	14.99	198.19	-548.76	81.88	58.71	-106.86	32.93	38.24	0.00	484.51	0.00	-96.08	0.00
	2	1 18.75	0.00	14.99	-1030.87	-1678.03	265.79	-94.14	-237.59	193.29	40.52	0.00	618.64	0.00	-149.31	0.00
	3	4 0.00	0.00	50.04	6.55	-4.62	57.75	-75.29	-169.60	356.77	60.80	0.00	409.41	0.00	-26.19	0.00
	4	4 18.75	0.00	50.04	-2.51	-6.41	82.24	-181.56	-214.48	533.51	36.72	0.00	462.88	0.00	-18.33	0.00

### 3211(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonin\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_3211\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:35:16 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	8.00	1
2	6000.00	0.33	10.01	1
3	500.00	0.35	19.99	1
4	180.00	0.35	19.99	1
5	60.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	2 0.00	0.00	17.98	-1247.48	-1559.53	187.75	-132.47	-201.64	185.68	21.71	0.00	976.32	0.00	-46.17	0.00
	2	2 18.75	0.00	17.98	-1023.16	-1569.98	177.99	-93.97	-215.18	172.29	0.00	0.00	1001.55	0.00	0.00	0.00
	3	5 0.00	0.00	58.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	5 18.75	0.00	58.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

# 4131(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonin\Desktop\civiling\00\_TFG\11\_RESULTADOS\_NUEVO\_ICAIFR\1\_EXPALANADA ELEGIDA\E3\E3\_1\_4131\W\_A1\_4131.xls  
 Date: Fri Sep 16 19:15:13 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	3.99	1
2	6000.00	0.33	5.99	1
3	480.00	0.35	19.99	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	2 0.00	0.00	9.96	-1484.06	-1950.37	389.98	-161.52	-264.89	253.89	17.80	0.00	747.40	0.00	-58.26	0.00
	2	2 18.75	0.00	9.96	-514.17	-1784.47	328.60	-5.62	-287.21	181.19	0.00	0.00	777.47	0.00	0.00	0.00
	3	4 0.00	0.00	30.10	9.24	-7.77	146.43	-245.57	-389.14	912.02	49.12	0.00	629.79	0.00	-26.63	0.00
	4	4 18.75	0.00	30.10	10.08	-8.75	158.52	-264.64	-423.49	987.84	0.00	0.00	663.81	0.00	0.00	0.00

# 4121(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_4121\_A1.xls  
 Date: Sat Sep 24 14:56:06 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	3.99	1
2	6000.00	0.33	5.99	1
3	480.00	0.35	30.00	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	2	0.00	0.00	9.96	-1337.52	-1770.41	407.36	-147.95	-243.91	238.83	14.84	0.00	681.56	0.00	-52.54	0.00
2	2	18.75	0.00	9.96	-339.57	-1583.19	347.40	11.37	-264.30	163.65	0.00	0.00	705.17	0.00	0.00	0.00
3	4	0.00	0.00	40.01	3.10	-8.36	107.89	-198.33	-295.07	685.82	41.27	0.00	530.69	0.00	-20.44	0.00
4	4	18.75	0.00	40.01	1.44	-9.19	118.31	-229.70	-319.43	756.43	0.00	0.00	556.16	0.00	0.00	0.00

# 4111(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_4111\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:13:06 2016

\*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	3.99	1
2	6000.00	0.33	5.99	1
3	500.00	0.35	19.99	1
4	180.00	0.35	19.99	1
5	60.00	0.35	Infinite	

\*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

\*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

\*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	2 0.00	0.00	9.96	-1515.86	-1974.45	386.16	-165.29	-266.94	256.33	18.72	0.00	1261.40	0.00	-68.93	0.00
	2	2 18.75	0.00	9.96	-561.75	-1813.12	320.70	-11.54	-288.93	184.07	0.00	0.00	1298.90	0.00	0.00	0.00
	3	5 0.00	0.00	50.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	5 18.75	0.00	50.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 4231(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output																
File:	F:\tfg\11_RESULTADOS_NUEVO_ICAIFR\1_EXPALANADA ELEGIDA\E3\E3_1_4231\4231_wesLEANUEVO.xls															
Date:	Tue Oct 04 07:09:41 2016															
***STRUCTURAL INFORMATION***																
Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip												
1	6000.00	0.33	5.00	1												
2	480.00	0.35	19.99	1												
3	160.00	0.35	2537.46	1												
4	160.00	0.35	2537.46	1												
5	160.00	0.35	Infinite													
***LOADING CONFIGURATION***																
Axle Type:	Other															
Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)												
1	0.00	0.00	65	800.0												
2	37.49	0.00	65	800.0												
***PREDICTED PAVEMENT LIFE***																
Non-standard locations were selected. Empirical transfer functions are not applicable.																
***ENGINEERING RESPONSES***																
Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
1	1	0.00	0.00	5.00	-1242.84	-1551.78	669.82	-158.63	-227.12	265.34	4.18	0.00	927.73	0.00	-52.34	0.00
2	1	18.75	0.00	5.00	1096.69	-1042.35	396.77	218.29	-255.87	63.14	0.00	0.00	930.10	0.00	0.00	0.00
3	3	0.00	0.00	25.02	16.30	-12.05	214.32	-340.56	-579.86	1330.24	59.04	0.00	751.95	0.00	-34.80	0.00
4	3	18.75	0.00	25.02	27.48	-14.12	220.28	-279.23	-630.25	1347.53	0.00	0.00	793.86	0.00	0.00	0.00

# 4221(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonin\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\E2\w\_4221\_A1.xls  
 Date: Sat Sep 24 15:38:49 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.00	1
2	480.00	0.35	24.99	1
3	160.00	0.35	2537.46	1
4	160.00	0.35	2537.46	1
5	160.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	1 0.00	0.00	5.00	-1158.99	-1442.58	678.44	-151.14	-214.00	256.16	2.74	0.00	875.79	0.00	-47.84	0.00
	2	1 18.75	0.00	5.00	1182.56	-925.18	402.89	225.82	-241.40	52.99	0.00	0.00	871.83	0.00	0.00	0.00
	3	3 0.00	0.00	30.02	10.32	-12.69	174.83	-290.18	-484.34	1097.88	54.48	0.00	674.70	0.00	-30.72	0.00
	4	3 18.75	0.00	30.02	15.18	-14.41	185.20	-278.75	-528.44	1155.87	0.00	0.00	712.41	0.00	0.00	0.00

# 4211(ANÁLISIS TIPO 3)

WESLEA for Windows - Simulation Output

File: C:\Users\Antonín\Desktop\civiling\00\_TFG\13\_anejos\ANEJO VI. WESLEA\w\_4211\_A1.xls  
 Date: Sun Sep 18 13:06:33 2016

### \*\*\*STRUCTURAL INFORMATION\*\*\*

Layer	Modulus (MPa)	Poisson	Height (cm)	Slip
1	6000.00	0.33	5.00	1
2	500.00	0.35	15.01	1
3	180.00	0.35	19.99	1
4	60.00	0.35	2537.46	1
5	60.00	0.35	Infinite	

### \*\*\*LOADING CONFIGURATION\*\*\*

Axle Type: Other

Tire#	X (cm)	Y (cm)	Load (kN)	Pressure (kPa)
1	0.00	0.00		65 800.0
2	37.49	0.00		65 800.0

### \*\*\*PREDICTED PAVEMENT LIFE\*\*\*

Non-standard locations were selected.  
 Empirical transfer functions are not applicable.

### \*\*\*ENGINEERING RESPONSES\*\*\*

Loc#	Layer	Coordinates (cm)			Normal Stress (kPa)			Normal MicroStrain			Displacement (micrometer)			Shear Stress (kPa)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	XZ	XY
	1	0.00	0.00	5.00	-1250.86	-1587.65	652.52	-157.05	-231.70	264.87	4.45	0.00	1645.17	0.00	-71.88	0.00
	2	18.75	0.00	5.00	1041.35	-1103.29	381.09	213.28	-262.12	66.92	0.00	0.00	1672.19	0.00	0.00	0.00
	3	40.00	0.00	40.01	-1.16	-11.12	92.09	-491.78	-715.77	1606.57	100.76	0.00	1285.20	0.00	-17.48	0.00
	4	418.75	0.00	40.01	-2.70	-12.28	99.88	-556.12	-771.55	1752.09	0.00	0.00	1339.03	0.00	0.00	0.00

ANEJO XI. RESULTADOS DEPAV ANÁLISIS TIPO 3



### 3131(ANÁLISIS TIPO 3)

#### Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Código y Título del Trabajo (0003)					
Información Alternativa					
Alternativas a Evaluar					
Número de Capas [2..6]   4					
Cálculos					
Resultados					
Terminar					
Radio de Carga [cm] 11.35					
Presión de Contacto [Kg/cm²] 8					
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] 37.5					
Capas E [Kg/cm²] μ [ ] H [cm] Ligada ó No					
1ª	60000	0.33	6	L	
2ª	60000	0.33	10	L	
3ª	4800	0.35	25	L	
4ª	1600	0.35			
5ª					
6ª					

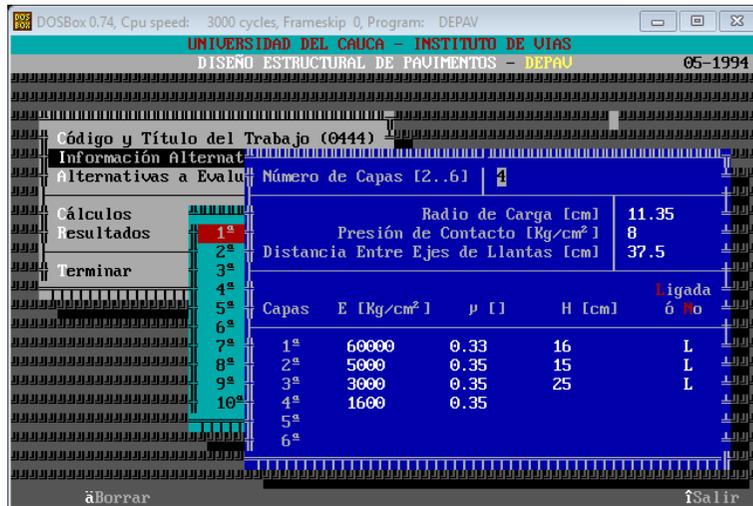
#### Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 01					
Número de Capas : 4					
Alternativa : 5					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	1.3400E-04 B	1.4990E+01 B	-7.8000E-05 C	8.0046E+00 A
	6.00	2.4300E-05 C	4.1094E+00 B	-2.6800E-05 C	6.3323E+00 B
2ª	6.00	2.4300E-05 C	4.1094E+00 B	-2.6800E-05 C	6.3323E+00 B
	16.00	-1.2500E-04 B	-9.5954E+00 B	1.1900E-04 B	1.4174E+00 B
3ª	16.00	-1.2500E-04 B	-8.5145E-02 C	2.9700E-04 B	1.4174E+00 B
	41.00	-1.2600E-04 C	-6.1284E-01 C	1.8100E-04 C	4.7926E-01 C
Deflexión = 29.830 mm/100					
Radio de Curvatura = 482.220 m					

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 01					
Número de Capas : 4					
Alternativa : 5					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	41.00	-1.2600E-04 C	-3.2223E-02 C	3.0500E-04 C	4.7926E-01 C
5ª					
6ª					
Deflexión = 29.830 mm/100					
Radio de Curvatura = 482.220 m					

### 3121(ANÁLISIS TIPO 3)

#### Inputs



#### Resultado



### 3111(ANÁLISIS TIPO 3)

#### Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Código y Título del Trabajo (0005)

Información Alternativa  
 Alternativas a Evaluar: Número de Capas [2..6] | 5

Cálculos  
 Resultados  
 Terminar

Radio de Carga [cm] 11.35  
 Presión de Contacto [Kg/cm²] 8  
 Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] 37.5

Capas	E [Kg/cm²]	$\mu$ [ ]	H [cm]	Ligada ó No
1ª	60000	0.33	4	L
2ª	60000	0.33	16	L
3ª	5000	0.35	20	L
4ª	1800	0.35	20	L
5ª	600	0.35		
6ª				

íSalir

#### Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
 Número de Capas : 5 Alternativa : 10

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	1.2300E-04 B	1.4276E+01 B	-8.0300E-05 C	8.0046E+00 A
	4.00	5.8700E-05 C	7.6885E+00 B	-5.5800E-05 C	7.4846E+00 B
2ª	4.00	5.8700E-05 C	7.6885E+00 B	-5.5800E-05 C	7.4846E+00 B
	20.00	-1.0700E-04 B	-8.4227E+00 B	1.0000E-04 B	9.3201E-01 B
3ª	20.00	-1.0700E-04 B	-2.7022E-01 C	2.1400E-04 B	9.3201E-01 B
	40.00	-1.2800E-04 C	-7.5356E-01 C	1.6300E-04 C	3.2324E-01 C

Deflexión = 47.230 mm/100  
 Radio de Curvatura = 610.680 m

âAyuda    âInform.âPosic    êEstruc    èImprim    íSalir

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
 Número de Capas : 5 Alternativa : 10

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	40.00	-1.2800E-04 C	-1.6009E-01 C	2.3500E-04 C	3.2324E-01 C
	60.00	-1.3000E-04 C	-2.5289E-01 C	1.9500E-04 C	1.8049E-01 C
5ª	60.00	-1.3000E-04 C	-1.9578E-02 C	3.2000E-04 C	1.8049E-01 C
6ª					

Deflexión = 47.230 mm/100  
 Radio de Curvatura = 610.680 m

âAyuda    âInform.âPosic    êEstruc    èImprim    íSalir





### 3211(ANÁLISIS TIPO 3)

Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Código y Título del Trabajo (0005)					
Información Alternativa					
Alternativas a Evaluar					
Número de Capas [2..6]   5					
Cálculos					
Resultados					
Terminar					
Radio de Carga [cm]   11.35					
Presión de Contacto [Kg/cm²]   8					
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]   37.5					
Capas					
	E [Kg/cm²]	μ [ ]	H [cm]	Ligada	ó No
1ª	60000	0.33	8	L	
2ª	60000	0.33	10	L	
3ª	5000	0.35	20	L	
4ª	1800	0.35	20	L	
5ª	600	0.35			
6ª					

Resultado

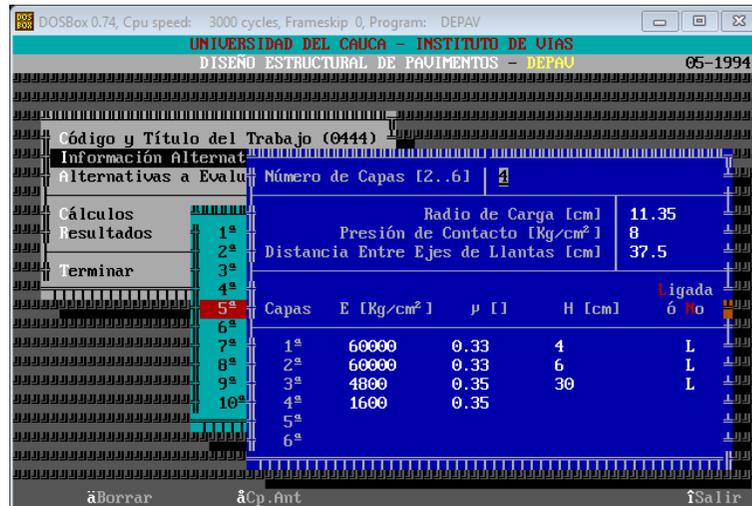
UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 03					
Número de Capas : 5					
Alternativa : 9					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	1.3600E-04 B	1.5296E+01 B	-8.8100E-05 C	8.0046E+00 A
	8.00	-8.9600E-06 A	2.4779E+00 B	-1.6000E-05 C	5.4758E+00 B
2ª	8.00	-8.9600E-06 A	2.4779E+00 B	-1.6000E-05 C	5.4758E+00 B
	18.00	-1.2000E-04 B	-9.3710E+00 B	1.1300E-04 B	1.1115E+00 B
3ª	18.00	-1.2000E-04 B	-2.6300E-01 C	2.4800E-04 B	1.1115E+00 B
	38.00	-1.4400E-04 C	-8.4125E-01 C	1.8300E-04 C	3.6811E-01 C
Deflexión = 50.110 mm/100					
Radio de Curvatura = 525.390 m					

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU					
65-1994					
Título del Trabajo : 03					
Número de Capas : 5					
Alternativa : 9					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	38.00	-1.4400E-04 C	-1.7641E-01 C	2.6400E-04 C	3.6811E-01 C
	58.00	-1.4600E-04 C	-2.8348E-01 C	2.1700E-04 C	1.9986E-01 C
5ª	58.00	-1.4600E-04 C	-2.2637E-02 C	3.5500E-04 C	1.9986E-01 C
6ª					
Deflexión = 50.110 mm/100					
Radio de Curvatura = 525.390 m					

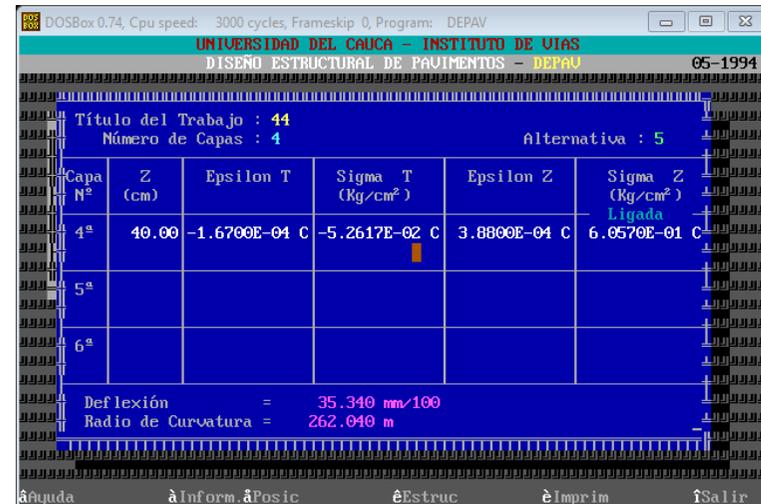


# 4121(ANÁLISIS TIPO 3)

## Inputs



## Resultado



### 4111(ANÁLISIS TIPO 3)

#### Inputs

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Código y Título del Trabajo (0005)

Información Alternativa  
Alternativas a Evaluar: Número de Capas [2..6] | 5

Cálculos  
Resultados

Terminar

Radio de Carga [cm] 11.35  
Presión de Contacto [Kg/cm²] 8  
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] 37.5

Capas	E [Kg/cm²]	$\mu$ [ ]	H [cm]	Ligada ó No
1ª	60000	0.33	4	L
2ª	60000	0.33	6	L
3ª	5000	0.35	20	L
4ª	1800	0.35	20	L
5ª	500	0.35		
6ª				

íSalir

#### Resultado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
Número de Capas : 5 Alternativa : 8

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	2.2700E-04 B	2.2841E+01 B	-1.1200E-04 C	8.0046E+00 A
	4.00	5.4000E-05 C	7.1277E+00 B	-4.1900E-05 C	6.4037E+00 B
2ª	4.00	5.4000E-05 C	7.1277E+00 B	-4.1900E-05 C	6.4037E+00 B
	10.00	-1.9000E-04 B	-1.4582E+01 B	1.9000E-04 B	2.5594E+00 B
3ª	10.00	-1.9000E-04 B	-5.0067E-02 C	4.9500E-04 B	2.5594E+00 B
	30.00	-2.4800E-04 C	-1.3766E+00 C	2.9900E-04 C	6.5669E-01 C

Deflexión = 64.930 mm/100  
Radio de Curvatura = 233.370 m

íAyuda à Inform. à Posic êEstruc èImprim íSalir

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAU 05-1994

Título del Trabajo : 03  
Número de Capas : 5 Alternativa : 8

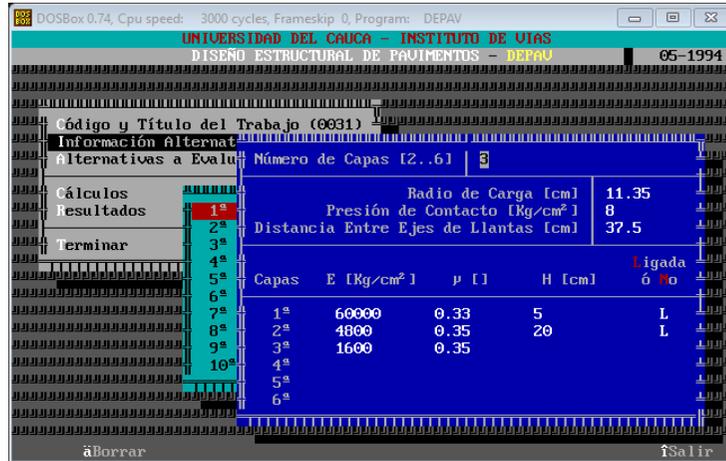
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	30.00	-2.4800E-04 C	-2.6818E-01 C	4.4500E-04 C	6.5669E-01 C
	50.00	-2.4100E-04 C	-4.6396E-01 C	3.4400E-04 C	3.1509E-01 C
5ª	50.00	-2.4100E-04 C	-4.1604E-02 C	5.6200E-04 C	3.1509E-01 C
6ª					

Deflexión = 64.930 mm/100  
Radio de Curvatura = 233.370 m

íAyuda à Inform. à Posic êEstruc èImprim íSalir

# 4231(ANÁLISIS TIPO 3)

## Inputs



## Resultado







