PROGRAMA OPTIMIZACIÓN DISEÑO DE PAVIMENTOS

JOSÉ ANDRÉS CRUZ WILCHES

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2002

PROGRAMA OPTIMIZACIÓN DISEÑO DE PAVIMENTOS

JOSÉ ANDRÉS CRUZ WILCHES

Proyecto de grado para optar al título de
Magíster en Ingeniería Civil

Director
BERNARDO CAICEDO HORMAZA
Ph.D Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2002

Dedico está tesis a mis padres y hermanas con todo mi cariño y a las personas que me ayudaron a dar esté nuevo paso en mi vida profesional.

Bogotá D.C. febrero de 2002

Ingeniero
BERNARDO CAICEDO HORMAZA
Ph.D Ingeniero Civil
Profesor Universidad de los Andes
La Ciudad

Apreciado Doctor

Me permito presentar a usted el informe que contiene el Programa Optimización Diseño de Pavimentos, elaborado como requisito para optar al titulo de la Maestría en Ingeniería Civil.

El informe contiene el manual del usuario y un CD con el programa DOP (Diseño y Optimización de Pavimentos)

José Andrés Cruz Wilches
Ingeniero Civil

CONTENIDO

OBJETIVO GENERAL 1

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

INTRODUCCIÓN 3

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 4

1.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO 4
1.1.1 Etapa 1 - Predimensionamiento 4
1.1.2 Etapa 2 - Cálculo de la Estructura 4
1.1.3 Etapa 3 - Verificación en fatiga de la estructura y de las deformaciones del soporte 6
1.1.4 Etapa 4 - Ajuste de los Espesores Calculados 7

2. MODELOS 8

2.1 Modelo K-θ 8

2.2 Modelo K-θ Modificado 10

2.3 Modelo de Boyce 10

2.4 Modelo de Boyce anisotrópico 12

2.5 Predimensionamiento 13

2.6 Calculo para capas granulares no tratadas 13

3. FAMILIAS DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO 15

3.1 Pavimentos flexibles (bajo tráfico) 15

3.2 Pavimentos con capas asfálticas gruesas 16

3.3 Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos 16

3.4 Pavimentos con estructura mixta 17

3.5 Pavimentos con estructura inversa 17

3.6 Pavimentos en concreto hidráulico 18

4. MANUAL 20

4.1 Instalación 20

4.2 DEPAV para Windows 20

4.3 Diseño 23
4.3.1 Tráfico 23
4.3.2 Vehículo 24
4.3.3 Estructura 25

4.4 Materiales 25
4.4.1 Materiales Asfálticos 25
4.4.2 Materiales tratados con ligantes hidráulicos y Concretos 27
4.4.3 Materiales granulares no tratados 29

4.5 Modelos para materiales granulares 30
4.5.1 Predimensionamiento 30
4.5.2 Modelo K-θ 30
4.5.3 Modelo K-θ modificado 31
4.5.4 Modelo de Boyce isotrópico 32

4.6 Bases de datos 34

4.7 Pavimentos flexibles de bajo tráfico 37
4.7.1 Modelo 37
4.7.2 Resultados 38

4.8 Pavimentos flexibles con capas asfálticas gruesas 39

4.9 Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos 40

4.10 Pavimentos con estructura mixta 41

4.11 Pavimentos con estructura inversa 43

4.12 Pavimentos rígidos en concreto hidráulico 44

5. CONCLUSIONES 46

BIBLIOGRAFÍA 47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variables del sistema elástico multicapa (6 Capas) 5
Figura 2 Esfuerzos principales. σ_1 y σ_3 sobre una muestra cilíndrica de granular no tratado 9
Figura 3 Variación del módulo secante en las capas granulares de acuerdo a dos modelos no lineales vs la profundidad 12
Figura 4 Modelación de pavimentos de bajo tráfico 15
Figura 5 Modelación de pavimentos con capas asfálticas gruesas 16
Figura 6 Modelación de pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos 17
Figura 7 Modelación de pavimentos estructura mixta 17
Figura 8 Modelación de pavimentos estructura inversa 18
Figura 9 Modelación de pavimentos con losa sin pasadores y capa de subbase 18
Figura 10 Modelación de pavimentos con losas con pasadores y capa de subbase 19
Figura 11 Modelación de pavimentos con losas sin capa de subbase 19
Figura 12 Inicio del programa (Modelo de pavimentos) 22
Figura 13 Entrada y salida de datos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones 23
Figura 14 El Tráfico 24
Figura 15 Vehículo de diseño 24
Figura 16 Familias de estructuras de pavimentos 25
Figura 17 Rodadura Asfáltica 26
Figura 18 Base asfáltica o subbase asfáltica 27
Figura 19 Concreto hidráulico 28
Figura 20 Concreto pobre o materiales tratados con ligantes hidráulicos 28
Figura 21 Materiales granulares no tratados a) para subbase (Modelos), y b) para base granular (material no tratado) y subrasante 29
Figura 22 Predimensionamiento de materiales granulares no tratados 30
Figura 23 Modelo K-θ para materiales granulares no tratados 31
Figura 24 Modelo K-θ modificado para materiales granulares no tratados 31
Figura 25 Invariantes Modelo K-θ modificado a)Esfuerzo promedio y b)Esfuerzo desviador 32
Figura 26 Coeficientes de elasticidad para el modelo de Boyce a)Módulo de Young, b)Poisson, c)Módulo de compresibilidad y d)Módulo de cortante 32
Figura 27 Modelo de Boyce isotópico para materiales granulares no tratados 33
Figura 28 Materiales granulares no tratados (Propiedades) 33
Figura 29 Base granular (material no tratado) 34
Figura 30 Plataforma o subrasante 34
Figura 31 Presentación del formulario cuando se modifican las bases de datos 35
Figura 32 Nuevo registro para la base de datos 35
Figura 33 Edición de un registro de la base de datos 36
Figura 34 Búsqueda de un registro en la base de datos 36
Figura 35 Eliminación de un registro en una base de datos 37
Figura 36 Modelo para pavimentos flexibles de bajo tráfico 38
Figura 37 Resultado al utilizar el predimensionamiento para la capa de subbase 38

Figura 38 Modelo de pavimento con capas asfálticas gruesas con a) Base y subbase y b)Base 39
Figura 39 Modelo de pavimento con capas tratadas con ligantes hidráulicos a) una sola capa y b) dos capas 40
Figura 40 Tabla de salida para pavimentos con dos capas de material tratadas. 41
Figura 41 Modelo estructura mixta 41
Figura 42 Tabla de salida para pavimentos con estructura mixta 42
Figura 43 Tabla y gráfica de datos admisible y calculados 42
Figura 44 Tabla de datos admisible y calculados (Solución) 43
Figura 45 Modelo estructura inversa 44
Figura 46 Tabla de salida para pavimentos con estructura inversa 44
Figura 47 Posibles configuraciones para pavimentos en concreto hidráulico. a) Losa con pasadores, material tratado y plataforma. b) Losa sin pasadores, material tratado y plataforma c) Losa , Granular y plataforma 45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Factores de Conversión para el modelo K-θ 9
Tabla 2 Propiedades y factores de corrección de los materiales asfálticos 26
Tabla 3 Propiedades y factores de corrección de los materiales Tratados con ligantes hidráulicos 27
Tabla 4 Tipo de liga entre capas de material tratado con ligantes hidráulicos 40

RESUMEN

El programa DOP (Diseño y Optimización de Pavimentos) utiliza el método racional presentado en el Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C. Este programa diseña los espesores de las capas y optimiza el costo de la estructura, partiendo de los parámetros de tráfico, vida útil de servicio, datos climáticos y las propiedades de las capas que conforman la estructura sin olvidar la plataforma.

El programa DOP diseña las siguientes estructuras: pavimentos flexibles para bajo tráfico, pavimentos con capas asfálticas gruesas, pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos, pavimento con estructura mixta e inversa y pavimentos en concreto hidráulico.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto de tesis es generar un programa para el diseño y optimización de pavimentos flexibles, semi-rígidos y rígidos por medio de métodos racionales. Igualmente es objetivo de este proyecto la recopilación de ensayos sobre muestras de materiales granulares no tratados, materiales tratados con ligantes hidráulicos, materiales asfálticos o combinaciones de estos, para así poder probar el funcionamiento del programa.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar modelos elásticos no lineales para el diseño de las capas de material granular no tratado (capas con espesor menor a 0.25 m, se supone un comportamiento lineal).

- Adaptar el programa de diseño estructural de pavimentos DEPAV, que trabaja bajo el sistema operativo DOS a Microsoft Windows. Para tal efecto, se utilizará el programa Visual Basic, que es el lenguaje de programación más utilizado en el mundo.

- A partir del programa generar un manual que oriente de una forma clara y sencilla el diseño de las estructuras de pavimento.

INTRODUCCIÓN

El diseño de pavimentos se puede clasificar en tres tipos: Empíricos, Semi-empíricos y Racionales. El diseño totalmente empírico usa generalmente factores de seguridad muy altos, lo que conlleva a estructuras con grandes espesores y por lo tanto, altos costos en la construcción. El diseño semiempirico está basado en ensayos arbitrarios de laboratorio correlacionados con teorías más o menos razonables. A diferencia de estos dos métodos, el diseño racional está basado en teorías de esfuerzos y deformaciones respaldadas con ensayos de laboratorio y ensayos in situ. Esto da como resultado, un diseño económico que a su vez permite el uso eficiente de los recursos no renovables.

La metodología usada en el Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C. está basada en una aproximación de la estructura, usando el modelo de Burmister, el cual representa los pavimentos como una sistema multi capas. Cada capa es isotrópica, homogénea y posee un comportamiento elástico lineal. El problema es simétrico con respecto a un eje, y las capas están definidas por el espesor, el módulo elástico, la relación de poisson y por el contacto entre capas (Ligadas o no ligadas). La carga esta representada por dos discos con radio de 0.125 m y una separación entre estos de 0.375 m. La presión aplicada sobre estos discos es de 0.662 MPa (Eje de referencia de 0.130 MN)

Los granulares no tratados tienen un comportamiento elástico no lineal, el cual esta siendo estudiado en diferentes lugares. En Europa por ejemplo, se desarrollo la Acción COST 337 *(European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research*) encaminada al estudio de este tipo de material. En esta acción se presenta una recopilación de los modelos no lineales utilizados en los diferentes países participantes. En el caso particular de este trabajo, el uso de estos modelos para el cálculo de las capas de los granulares no tratados, se hace mediante una aproximación, ya que el modelo de Burmister es elástico lineal

El diseño de estructuras por medio de métodos racionales, es un proceso iterativo que conlleva a un gran número de operaciones. Debido a esto, se hace necesario el uso de un programa de computador que determine de una forma rápida, los esfuerzos y las deformaciones máximas en las interfaces de las capas, generados por un eje de referencia. Para tal efecto se utilizara el programa DEPAV, diseñado en la Universidad del Cauca por los ingenieros Alfonso Murgueitio, Carlos Benavides y Efraín Solano.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El programa DOP sigue la metodología del Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C. la cual se presenta a continuación

1.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

El método racional de diseño de estructuras de pavimento combina diferentes aspectos de su comportamiento:

- Un análisis mecánico del funcionamiento de la estructura.
- Los resultados de ensayos de laboratorio referentes a ensayos de fatiga y módulos dinámicos.
- Los conocimientos obtenidos luego de la observación del comportamiento de los pavimentos in situ.

Las etapas que sigue el diseño de pavimentos se presentan a continuación:

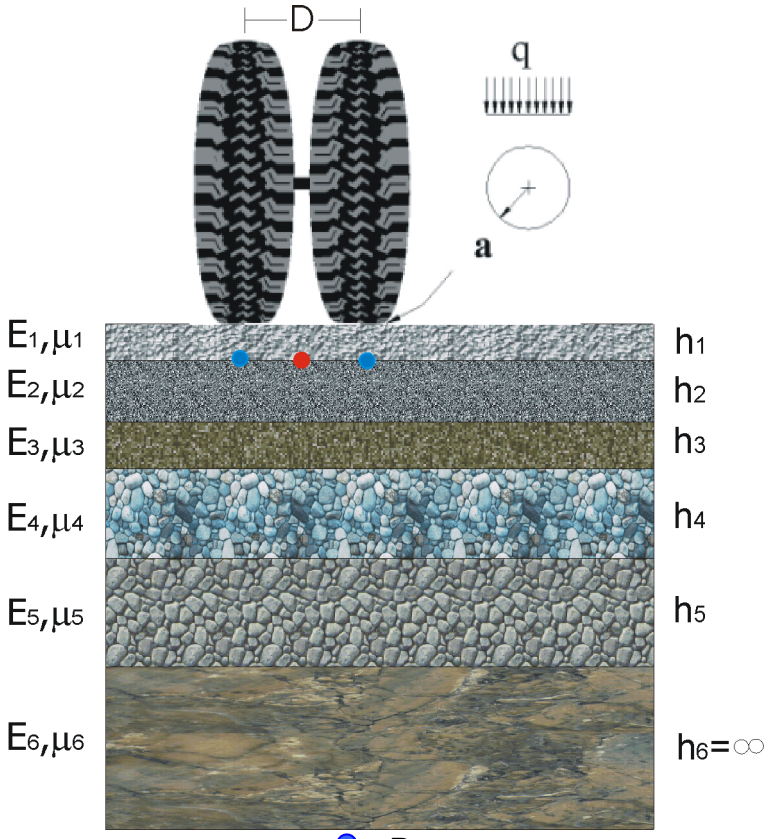
1.1.1 Etapa 1 - Predimensionamiento

Una vez reunidos los datos para el cálculo se procede a una primera selección de la capa de rodadura y a un predimensionamiento de la estructura con base en vías comparables.

1.1.2 Etapa 2 - Cálculo de la Estructura

Se calculan los esfuerzos y las deformaciones utilizando un modelo matemático de la estructura de pavimento. Para este cálculo se toma un eje de referencia de 130 kN con ruedas gemelas, representado por dos cargas que ejercen una presión uniformemente repartida de 0.662 MPa sobre dos discos de 0.125 m de radio y con una separación entre ruedas de 0.375 m.

Para la determinación de los esfuerzos y las deformaciones en las uniones de las capas, se utilizó el programa DEPAV (desarrollado por el Instituto de Vias de la Universidad del Cauca, Septiembre de 1993). Este programa usa el método de Busrmister, el cual representa el pavimento como una sucesión de capas isotropicas, homogéneas y elásticas lineales. El programa calcula los esfuerzos y las deformaciones máximas en las interfaces de las capas que conforman el pavimento, debidas a una rueda simple o doble colocada en la superficie. Además calcula la deflexión y el radio de curvatura al centro de la rueda. Si la rueda es simple, el programa calcula los esfuerzos y las deformaciones bajo la rueda, pero si está es doble el programa determina el máximo en tres puntos diferentes (ver Figura 1) escogiendo el máximo valor.



A Bajo una rueda simple **B** Bajo una de las ruedas de la carga **C** Al centro de la carga

Figura 1 Variables del sistema elástico multicapa (6 Capas)

El sistema elástico multicapa puede estar constituido de dos a seis capas, caracterizadas por el espesor, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el tipo de adherencia entre capas.

1.1.3 Etapa 3 - Verificación en fatiga de la estructura y de las deformaciones del soporte

La verificación se hace comparando los esfuerzos y las deformaciones calculadas en la etapa 2 con los valores admisibles. Estos valores admisibles se determinan dependiendo de:

- El tráfico acumulado en el período de cálculo considerado (tomando el coeficiente de agresividad del tráfico CAM para cada capa)
- La probabilidad de falla admitida para este período
- Las características de resistencia a la fatiga de los materiales
- Los efectos térmicos
- Los datos de observación del comportamiento de pavimentos del mismo tipo.

Las verificaciones que se deben realizar durante el diseño son las siguientes:

- Deformación relativa de tracción por flexión (ε_t) en la base de las capas de materiales tratados con ligantes asfálticos. El limite admisible se calcula para un número de ciclos de carga, una temperatura y una probabilidad de falla dados.
- Esfuerzo de tracción por flexión (σ_t) en la base de los materiales tratados con ligantes hidráulicos. El limite admisible se calcula para un número de ciclos y una probabilidad de falla dados.
- El esfuerzo o la deformación relativa vertical en la subrasante.

Para determinar el espesor de las capas es necesario repetir el cálculo con el fin de determinar la estructura que corresponde a σ_{adm} y ε_{adm} (esfuerzo o deformación admisible del material).

La validez del cálculo depende del cumplimiento de las siguientes hipótesis:

- Carga del eje equivalente y número de repeticiones
- Probabilidad de falla aceptada, es decir la probabilidad de falla asociada al carácter aleatorio de la calidad de los materiales y de sus condiciones de colocación.
- Características de los materiales (propiedades mecánicas, espesores y dispersión de las características en el terreno) y características de la subrasante.

1.1.4 Etapa 4 - Ajuste de los Espesores Calculados

Los espesores de las capas que se obtienen en la Etapa 3 deben ajustarse para:

- Tener en cuenta las facilidades tecnológicas respecto a los espesores mínimos y máximos que dependen de los equipos que se utilicen.
- Reducir los riesgos de defectos de liga entre las interfaces y limitar el número de capas.
- Asegurar una protección suficiente de las capas tratadas con ligantes hidráulicos para tener en cuenta fenómenos como el de las fisuras de retracción, el cual no puede tenerse en cuenta en el modelo matemático.

2. MODELOS

Los materiales tratados con ligantes hidráulicos, materiales asfáltico y concretos hidráulicos presentan un comportamiento elástico lineal. Por el contrario los granulares no tratados, presentan un comportamiento elástico no lineal. Como el cálculo se debe realizar con el programa DEPAV, se supone un comportamiento lineal para subcapas menores de 0.25 m de espesor, aunque trabajos realizados por Boissoudy (1996) sugiere que las sub capas deben ser de 0.10 m, es decir entre mayor numero de capas, el granular no tratado presenta un comportamiento más cercano al de un material elástico lineal. Esto se ve limitado al número máximo de capas que trabaja el DEPAV:

Los siguientes modelos se utilizan para describir el comportamiento de los granulares no tratados:

- Modelo K-θ (Brown and Pell, 1967; Hicks and Monismith, 1972)
- Modelo Uzan (Uzan et al. 1992)
- Modelo Boyce (Boyce, 1990)
- Modelo de Boyce Anisotropico (Hornych et al, 1998)
- Modelo Hiper elástico (Hoff and Nordal, 1998)
- Modelo Hipo-Quasi-Elasticity (Tatsuoka et al, 1999)

Para diseñar las capas de granulares no tratados, el programa DOP utiliza los siguientes modelos no lineales:

2.1 Modelo K-θ

Este modelo trató de describir los resultados de un triaxial cíclico con presión de confinamiento constante (CCP “constant confining pressure”) fue propuesto por Brown y Pell 1967 y Hicks y Monismith, 1972

El módulo elástico E del granular es

$$E = k1 * p_a * \left(\frac{3 * p}{p_a} \right)^{k2}$$

donde:

p :Promedio de esfuerzos principales $p = \frac{\sigma_1 + 2 * \sigma_3}{3}$ σ1 y σ2 esfuerzo desviador y esfuerzo de confinamiento respectivamente(ver Figura 2)

p_a Esfuerzo de referencia 100 kPa

k1 y k2 son parámetros del material (constantes de regresión)

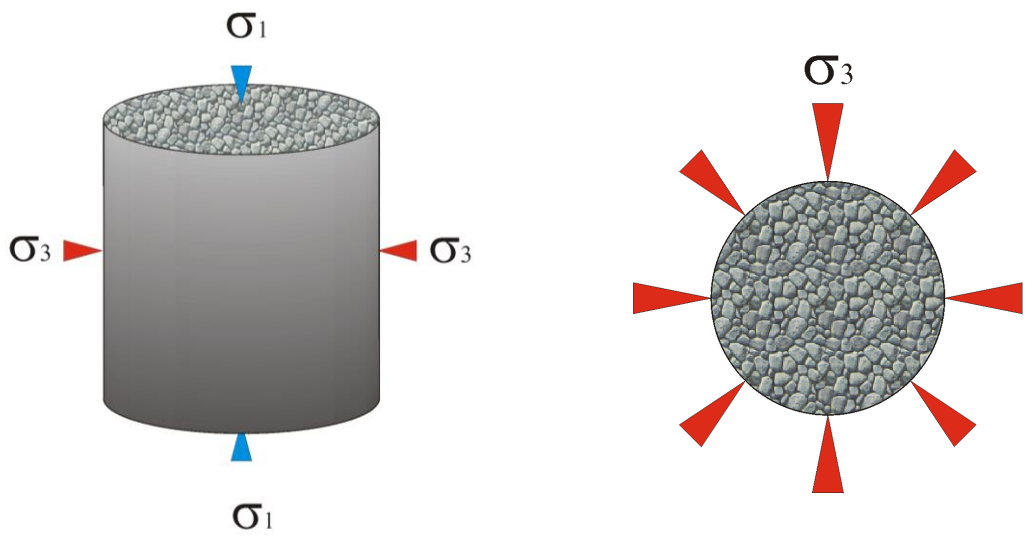


Figura 2 Esfuerzos principales. σ_1 y σ_3 sobre una muestra cilíndrica de granular no tratado

En este modelo la relación de Poisson es constante y el valor adoptado es generalmente igual a 0.3.

En la Tabla 1 se presentan los factores de conversión para pasar el módulo resiliente del modelo K-θ a MPa

Tabla 1 Factores de Conversión para el modelo K-θ

Unidades	**Factor**
psi o lbs/in^2	$145.038^{(K2-1)}$
bares o kg/cm^2	$10^{(K2-1)}$

2.2 Modelo K-θ Modificado

El modelo K-θ fue modificado en 1992 por Uzan al suponer que, el módulo depende tanto del esfuerzo promedio p, como del esfuerzo desviador q

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$Er = k_1 * p_a * \left(\frac{3 * p}{p_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{q}{p_a}\right)^{k_3}$$

k1, k2, k3 son parámetros del material, el poisson es el mismo que en el método original.

2.3 Modelo de Boyce

Este modelo es utilizado para describir los resultados de un ensayo triaxial con presión de confinamiento variable (VCP "variable confining pressure"). Este ensayo da como resultado diferentes trayectorias de esfuerzos y simula de una forma más real las condiciones de carga in situ

El comportamiento de los materiales granulares según este modelo depende de:

- Promedio de esfuerzos p
- Trayectoria de esfuerzos
- De la relación de q/p
- Relación de Poisson variable

$$K = \frac{p}{\varepsilon_v}$$

$$G = \frac{q}{3 * \varepsilon_q}$$

ε_v Deformación elástica volumétrica $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2 * \varepsilon_3$

ε_q Deformación elástica cortante $\varepsilon_q = \frac{2}{3} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$

Los valores de K (módulo volumétrico) y G (módulo de cortante) dependen de los esfuerzos de acuerdo con las siguientes relaciones

$$K = \frac{\left(\frac{p}{p_a}\right)^{1-n}}{\frac{1}{K_a} - \frac{\beta}{K_a} * \left(\frac{q}{p}\right)^2}$$

$$G = G_a * \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1-n}$$

K_a, G_a y β son parámetros del modelo

$$\beta = (1-n) * \frac{K_a}{6 * G_a}$$

Donde la expresión para de deformación volumétrica y la deformación por cortante están dadas por:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{K_a} * p_a^{1-n} * p^n * \left(1 - \beta * \left(\frac{q}{p}\right)^2\right)$$

$$\varepsilon_q = \frac{1}{3 * G_a} * p_a^{1-n} * p^n * \left(\frac{q}{p}\right)$$

De la teoría elástica E y ν son

$$E = \frac{9 * G_a * \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1-n}}{3 + \left(\frac{G_a}{K_a}\right) * \left(1 - \beta * \left(\frac{q}{p}\right)^2\right)}$$

$$\nu = \frac{\frac{3}{2} - \left(\frac{G_a}{K_a}\right) * \left(1 - \beta * \left(\frac{q}{p}\right)^2\right)}{3 + \left(\frac{G_a}{K_a}\right) * \left(1 - \beta * \left(\frac{q}{p}\right)^2\right)}$$

En la Figura 3 tomada del "Review Models and Modelling of unbound granular materials" [8] se presenta la variación del módulo secante de las capas granulares con dos modelos no lineales. La figura muestra que el modelo K-θ es más conservador que el modelo de Boyce. Esto indica que diseños realizados con el modelo de Boyce presentan espesores menores que los del modelo K-θ.

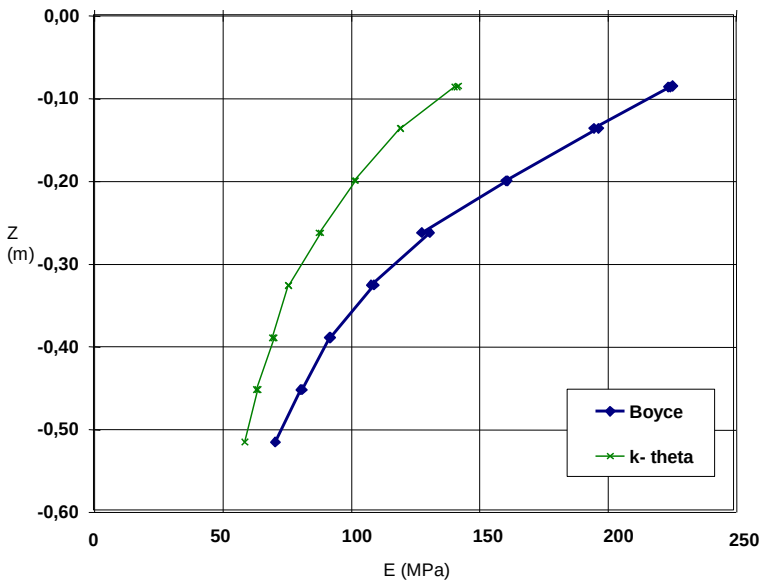


Figura 3 Variación del módulo secante en las capas granulares de acuerdo a dos modelos no lineales vs la profundidad

2.4 Modelo de Boyce anisotrópico

Hornych y al (1998) proponen una versión anisotrópica del modelo de Boyce, Introduciendo en la expresión el coeficiente elástico de potencial de anisotropía γ, el cual afecta el esfuerzo principal σ_1 como un multiplicador ($\gamma * \sigma_1$). Esto conlleva a las siguientes relaciones de esfuerzo deformación

$$\varepsilon_v = \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} * \left[\frac{\gamma+2}{3+K_a} + \frac{n-1}{18*G_a} * (\gamma+2) * \left(\frac{q^*}{p^*}\right)^2 + \frac{\gamma-1}{3*G_a} * \left(\frac{q^*}{p^*}\right) \right]$$

$$\varepsilon_q = \frac{2*p^{*n}}{3*p_a^{n-1}} * \left[\frac{\gamma-1}{3*K_a} + \frac{n-1}{18*G_a} * (\gamma-1) * \left(\frac{q^*}{p^*}\right)^2 + \frac{2*\gamma+1}{6*G_a} * \left(\frac{q^*}{p^*}\right) \right]$$

$$p^* = \frac{\gamma*\sigma_1 + 2*\sigma_3}{3}$$

$$q^* = \gamma*\sigma_1 - \sigma_3$$

El parámetro γ significa que el material es isotrópico siempre que γ=1, y el material se comporta más anisotropicamente a medida que γ es mayor que 1. Si el coeficiente elástico de potencial de anisotropía es menor a 1, el material es más rígido verticalmente que horizontalmente.

2.5 Predimensionamiento

En ausencia de resultados experimentales y para efectos de un predimensionamiento el Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C. presenta en la Tabla C.7 un procedimiento simplificado para calcular los módulos de las capas de material granular no tratado.

2.6 Calculo para capas granulares no tratadas

Boissoudy en 1996 ("*Introducing the nonlinearity of the granular material in routine analitycal pavement design*") presento un método iterativo por medio del cual aplicaba el modelo de Boyce isotópico, al diseño de pavimentos con capas de

material granular no tratado. Él utilizó el programa Alize, (Autret 1982) que esta basado en el multicapa de Burmister.

Boissoudy utilizó una rueda simple de radio 0.168 con una presión de 0.68 MPa y usó la siguiente aproximación iterativa

- Dividió la capa de granular no tratado en subcapas (5 o 10 capas)
- Calculó los esfuerzos en la mitad de las subcapas con ALIZE
- Aplicó el Modelo de Boyce calculando el un nuevo módulo en función de los invariantes de esfuerzos (p y q)
- Repitió el proceso hasta la convergencia de los módulos de las subcapas

Boissoudy encontró al realizar los cálculos una incompatibilidad con los principios de la termodinámica, es decir relaciones de poisson superiores a 0.5 y módulos de elasticidad menores que 0. Para esto fijo un módulo minino que depende únicamente del promedio de esfuerzos. Trabajos posteriores introdujeron una pseudo cohesión (recordemos que los granulares no poseen cohesión) que se le sumo al promedio de esfuerzos p.

Para que el poisson fuera menor que 0.5 se debía cumplir que $1-\beta*\left(\frac{q}{p}\right)^2>0$.

Cumpliendo esta relación obtuvieron módulos mayores que cero. Sin embargo tomaron un módulo mínimo de 10 MPa y acotaron la relación de poisson ($-0.99 > \nu > 0.499$)

3. FAMILIAS DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

Las estructuras multicapas pueden clasificarse en diferentes familias dependiendo del material o materiales que la conforman. A continuación, se hace una breve descripción de cada una de estas.

3.1 Pavimentos flexibles (bajo tráfico)

Esta familia de pavimentos corresponde a tráficos menores a 250.000 vehículos pesados. Los pavimentos flexibles están constituidos por una capa superior en material asfáltico relativamente delgado (inferior a 0.10 m). Frecuentemente cuando se trata de vías de bajo tráfico esta cobertura se reduce a un tratamiento superficial doble colocado directamente sobre las capas de materiales no tratados. El espesor de esta estructura varia aproximadamente entre 0.30 y 1.00 m

La capa de rodadura puede ser un tratamiento superficial simple hasta un trafico de 100.000 vehículos pesados o una mezcla asfáltica. El espesor de la capa de base se puede fijar en 0.15 m

El criterio a verificar es la deformación vertical ε_z en la parte superior de la plataforma soporte del pavimento y asegurar las especificaciones de los granulares no tratados y la impermeabilización de estos (ver Figura 4).

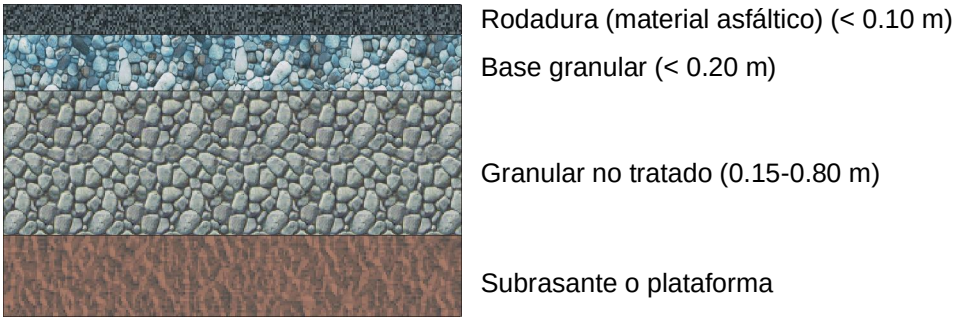


Figura 4 Modelación de pavimentos de bajo tráfico

3.2 Pavimentos con capas asfálticas gruesas

Estas estructuras están compuestas de una capa de rodadura en material asfáltico cuyo espesor varía entre 0.06 y 0.15 m que reposa sobre el cuerpo del pavimento. Las capas de cuerpo están constituidas por materiales tratados con ligantes asfálticos en una o dos capas (base y subbase). El espesor del conjunto de capas de cuerpo varía entre 0.15 y 0.40 m.

Se debe verificar la deformación ε_t en la base de las capas asfálticas y que la deformación ε_z en las capas granulares sea menor a la admisible (ver Figura 5)

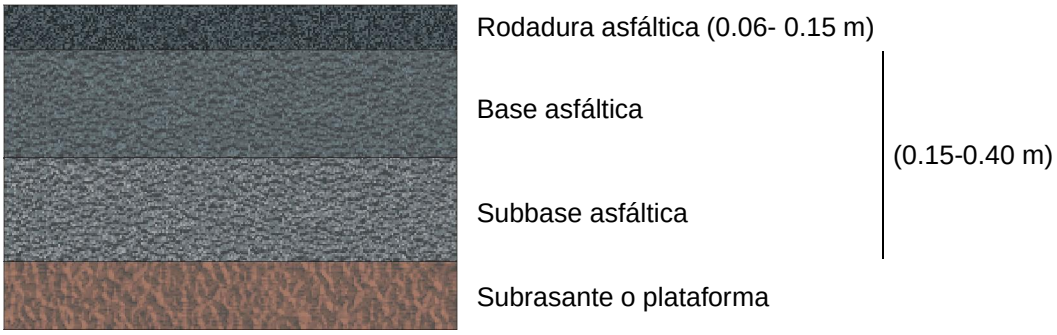


Figura 5 Modelación de pavimentos con capas asfálticas gruesas

3.3 Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos

Estas estructuras se denominan generalmente estructuras semi rígidas. Están compuestas por una capa de rodadura en material asfáltico cuyo espesor varía entre 0.06 y 0.015 cm. Esta capa reposa sobre un cuerpo de pavimento en materiales tratados con ligantes hidráulicos colocados en una o dos capas (base y subbase). El espesor del conjunto de capas de base y subbase varía entre 0.20 y 0.50 m (ver Figura 6)

Figura 6 Modelación de pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos

3.4 Pavimentos con estructura mixta

Estas estructuras tienen una capa de rodadura cuyo espesor varía entre 0.06 y 0.015 m y una capa de base en material asfáltico (espesor de la base de 0.10 a 0.20 m). La capa de base reposa sobre una capa de sub-base en materiales tratados con ligantes hidráulicos (0.20 a 0.40 m). Las estructuras mixtas tienen una relación entre el espesor de los materiales asfálticos y el espesor total alrededor de 1/2. (ver Figura 7)

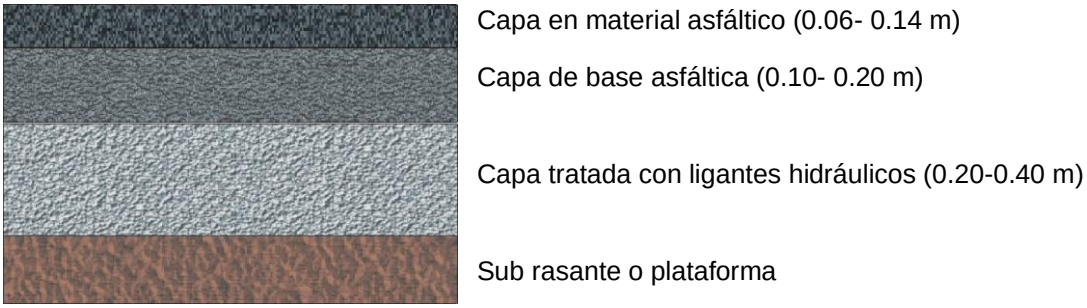


Figura 7 Modelación de pavimentos estructura mixta

3.5 Pavimentos con estructura inversa

Estas estructuras están formadas por capas en material asfáltico de aproximadamente quince centímetros de espesor. Esta capa de material asfáltico reposa sobre una capa en material no tratado (alrededor de 0.12 m) la cual a su vez reposa sobre una capa de subbase construida con materiales tratados con

ligantes hidráulicos con espesores entre 0.15 y 0.50 m. El espesor total varía entre 0.60 y 0.80 cm. (ver Figura 8)

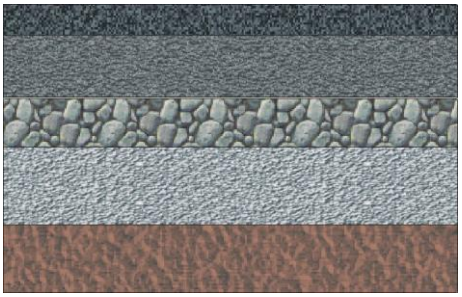


Figura 8 Modelación de pavimentos estructura inversa

3.6 Pavimentos en concreto hidráulico

Estas estructuras tienen una capa de concreto hidráulico de 0.15 a 0.40 m de espesor que eventualmente puede estar cubierta por una capa delgada de material asfáltico. La capa de concreto reposa sobre una capa de subbase que puede estar constituida por materiales tratados con ligantes hidráulicos, en concreto hidráulico o en material drenante no tratado (ver Figura 11). También se puede colocar directamente sobre la subrasante, en cuyo caso se interpone frecuentemente una capa en material asfáltico. La losa de concreto puede construirse con un refuerzo longitudinal discontinuo con o sin elementos de transferencia de esfuerzos en las juntas (ver Figura 9 y Figura 10 respectivamente)

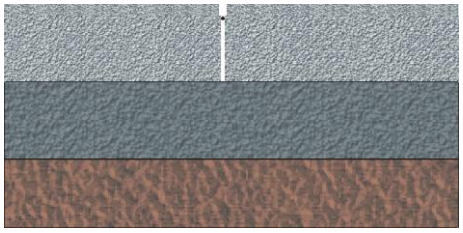


Figura 9 Modelación de pavimentos con losa sin pasadores y capa de subbase

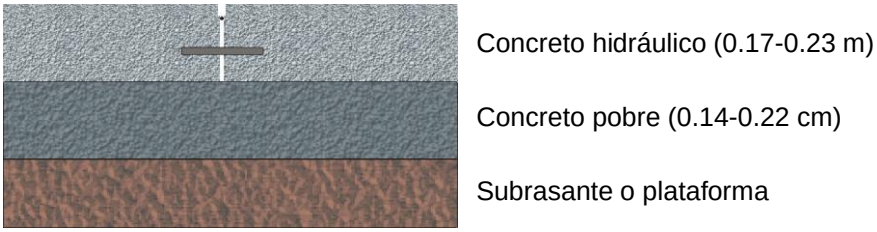


Figura 10 Modelación de pavimentos con losas con pasadores y capa de subbase

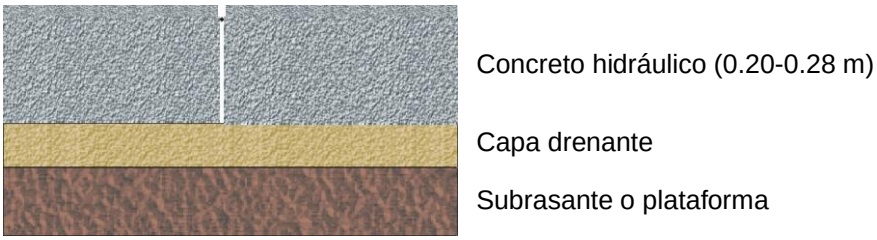


Figura 11 Modelación de pavimentos con losas sin capa de subbase

4. MANUAL

El programa DOP esta basado en el Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C. El cual expone los fundamentos de la metodología racional de diseño de estructuras de pavimento.

4.1 Instalación

El programa requiere:

- Microsoft Access 97 o una versión más reciente
- WinZip
- 25 MB en disco duro
- Para instalar el programa inserte el disco 1 o el CD en la unidad correspondiente y pulse sobre el archivo Setup.exe. Siga las instrucciones del asistente

4.2 DEPAV para Windows

El primer módulo del programa presenta el DEPAV adaptado a Windows. Este módulo permite calcular esfuerzos y deformaciones al igual que el programa original. Una de las ventajas es la presentación de los datos de entrada y salida en un solo formulario.

La extensión de los archivos para guardar las propiedades de las capas es *.jac.

La Figura 12 presenta el inicio del programa, en el cual se pueden apreciar los siguientes elementos: menús en la parte superior, una barra de herramientas, un marco con el nombre del proyecto, los datos del eje de referencia, el número de capas que tiene el modelo, las unidades de trabajo y por último una imagen que

representa un sistema multicapas con las variables de entrada (Distancia entre llantas, radio de curvatura, presión de contacto y las propiedades elásticas de las capas)

La barra de menús consta de las siguientes opciones:

- Archivo
- Gráfico
- Calcular
- Diseño
- Acerca de

La primera opción despliega las funciones de Abrir, Guardar, Imprimir y Salir.

La opción gráfico presenta el modelo (ver Figura 12)

La opción calcular, como su nombre lo indica, calcula los esfuerzos y las deformaciones en las interfaces de las diferentes capas

La opción de diseño despliega el formulario de diseño. y oculta el inicio del programa

La última opción presenta el nombre del proyecto y el nombre de la tesis.

La barra de herramientas presenta las mismas funciones del menú, y además las opciones de alineación de la información presente en las cajas de texto.

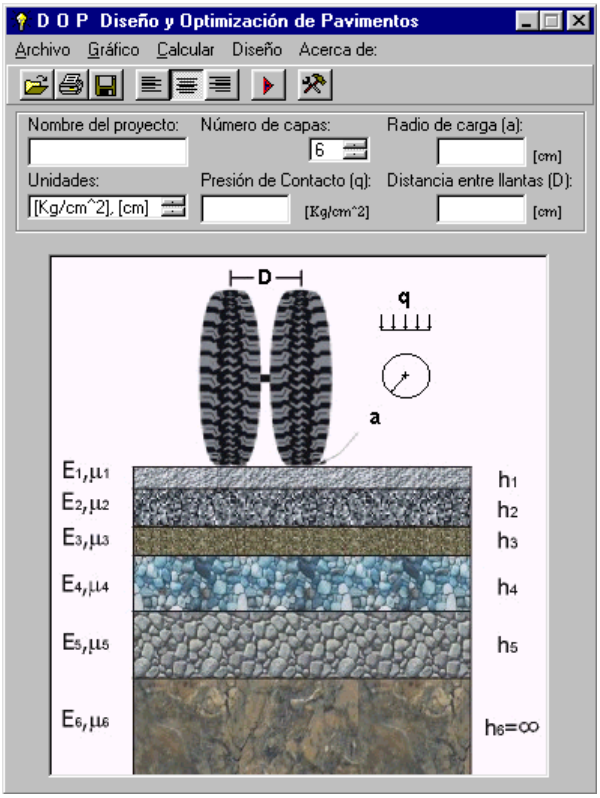


Figura 12 Inicio del programa (Modelo de pavimentos)

La Figura 13 muestra la entrada y salida de datos del programa. A la izquierda los datos de entrada y a la derecha los datos de salida.

El programa permite trabajar en kg/cm^2, Bares, Psi y en MPa para las unidades de presión y cm, cm, in y m para las unidades de longitud.

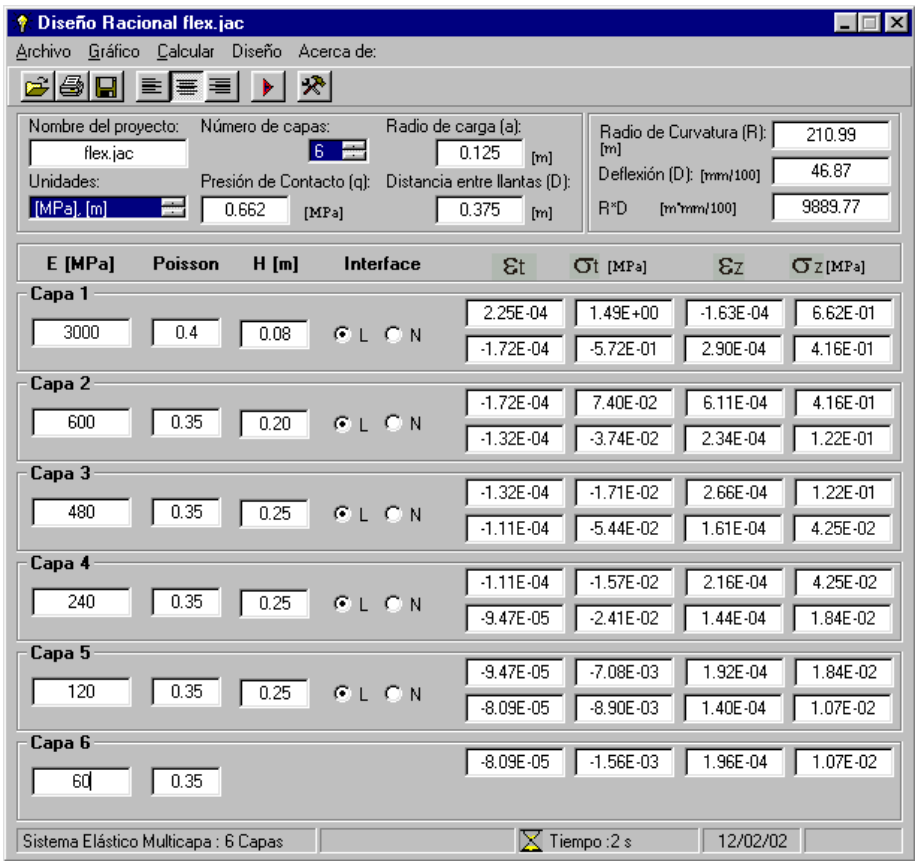


Figura 13 Entrada y salida de datos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones

4.3 Diseño

Este formulario se activa cuando se escoge la opción de diseño en el menú o al obturar el último botón de la barra de herramientas

El formulario de diseño consta de 3 hojas, la primera contiene los parámetros de tráfico, la segunda los datos del eje de referencia y la ultima hoja presenta las diferentes familias de estructuras.

4.3.1 Tráfico

En la Figura 14 se muestran las variables utilizadas para determinar el número de vehículos pesados que transitarán por la vía durante la vida útil de la estructura.

Para calcular el tráfico se presentan dos modelos matemáticos: uno exponencial y el otro lineal. En la parte inferior de la Figura 14 el programa calcula el tráfico y lo clasifica según la definición presentada en la Tabla C.1 del Manual de diseño de pavimentos.

Figura 14 El Tráfico

4.3.2 Vehículo

El vehículo o el eje de referencia esta caracterizado por las siguientes variables: el radio de carga (m), la presión de contacto (MPa) y la distancia entre llantas (m).

Figura 15 Vehículo de diseño

4.3.3 Estructura

En la ultima hoja del formulario de diseño se presentan las familias de pavimentos que el programa diseña (ver Figura 16) Para escoger un tipo de estructura se selecciona marcando el nombre correspondiente.

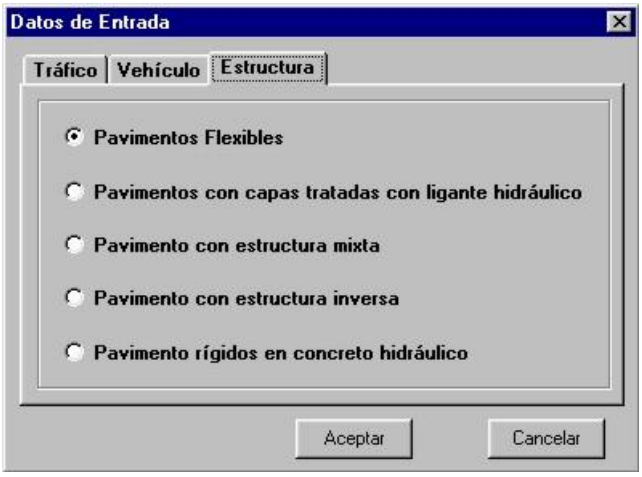


Figura 16 Familias de estructuras de pavimentos

4.4 Materiales

Los materiales utilizados para el diseño de las diferentes familias de pavimento se pueden clasificar en cuatro grupos: materiales asfálticos, materiales tratados con ligantes hidráulicos, concretos hidráulicos y granulares no tratados. A continuación se hace una breve descripción del de cada uno de estos

4.4.1 Materiales Asfálticos

Las propiedades de estos materiales (ver Tabla 2) se ven influenciadas por la temperatura y la frecuencia de aplicación de la carga. El Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C, presenta en, el titulo D valores indicativos de las propiedades de estos materiales.

Estos materiales están presentes en la capa de rodadura, capa de base y capa de subbase. El programa guarda las propiedades de los materiales en 2 bases de datos. La primera para los materiales de rodadura y la otra, para los de Base y Subbase. Además de las propiedades ya mencionadas el usuario puede acotar el espesor de la capa entre un espesor mínimo y uno máximo (ver Figura 17 y Figura 18)

Tabla 2 Propiedades y factores de corrección de los materiales asfálticos

Propiedad	Nombre
E	Módulo de Elasticidad
ν	Módulo de Poisson
σ_N	Desviación estándar de la ley de fatiga expresada en logaritmo decimal del numero de ciclos.
σ_H	Desviación estándar de los espesores de material colocado in situ.
C	Coeficiente adimencional que depende del material (varia entre 0.015-0.04)
C.A.M.	Coeficiente de agresividad media
ε_6	Deformación de tracción en flexión que corresponde a 10^6 ciclos de carga.
b	Pendiente de la ley de fatiga del material considerado en escala bilogarítmica.
K_t	Coeficiente corrector destinado a tener en cuenta la influencia de la temperatura
K_c	Coeficiente de calibración
K_s	Coeficiente de reducción que depende del suelo que subyace.
Pf	Probabilidad de falla.
Valor	Costo de material por metro cubico.
Peso	Peso del material

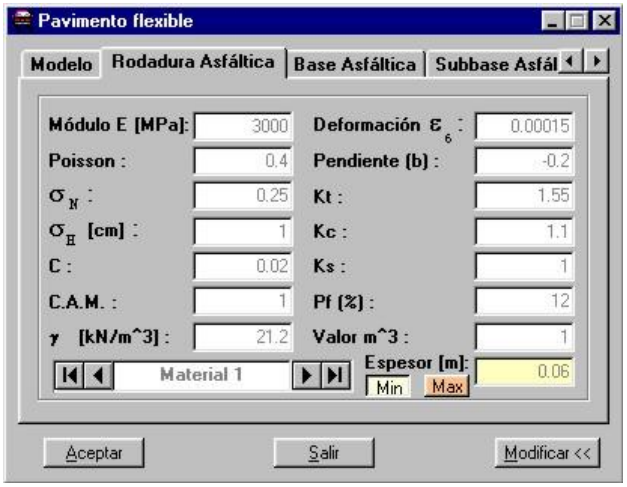


Figura 17 Rodadura Asfáltica

Figura 18 Base asfáltica o subbase asfáltica

4.4.2 Materiales tratados con ligantes hidráulicos y Concretos

Los tipos de Ligantes Hidráulicos se describen en el RSV-2000 En los formularios se presentan las variables y en la Tabla 3 la identificación de cada un de estas

Tabla 3 Propiedades y factores de corrección de los materiales Tratados con ligantes hidráulicos

Propiedad	**Nombre**
E	Módulo de Elasticidad
ν	Módulo de Poisson
σ_N	Desviación estándar de la ley de fatiga expresada en logaritmo decimal del numero de ciclos.
σ_H	Desviación estándar de los espesores de material colocado in situ.
C	Coeficiente adimencional que depende del material (varia entre 0.015-0.04)
C.A.M.	Coeficiente de agresividad media
σ_6	Esfuerzo que produce la rotura de una probeta en fatiga por flexión que corresponde a 10^6 ciclos de carga.
b	Pendiente de la ley de fatiga del material considerado en escala bilogarítmica.
Kd	Coeficiente corrector destinado a tener en cuenta la concentración de esfuerzos en las proximidades de las fisuras de retracción
K_c	Coeficiente de calibración
K_s	Coeficiente de reducción que depende del suelo que subyace.
Pf	Probabilidad de falla.
Valor	Costo de material por metro cubico.
Peso	Peso del material

Las Figura 19 y Figura 20 presentan los formularios para concretos y para materiales tratados con Ligantes hidráulicos respectivamente. Estos materiales, son usados en el diseño de pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos, pavimentos con estructura mixta e inversa y pavimentos en concreto hidráulico

Figura 19 Concreto hidráulico

Figura 20 Concreto pobre o materiales tratados con ligantes hidráulicos

Para seleccionar el nombre de un material guardado en la base de datos se hace uso del siguiente control

. La función de cada uno de los botones se presenta a continuacion

- Primer registro de la base de datos
- Registro anterior
- Registro siguiente
- Último registro de la base de datos

4.4.3 Materiales granulares no tratados

Para el diseño de los materiales granulares no tratados y para la plataforma o subrasante, se utilizan los modelos presentados en el capitulo 2.

La Figura 21 a) permite escoger los diferentes modelos utilizados para el diseño de las capas granulares para sub base y las relaciones de predimensionamiento de estas capas presentadas en la tabla C.7 del Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D:C). La Figura 21 b) muestra los modelos utilizados para el diseño de la subrasante y de las bases granulares. La diferencia entre los dos figuras anteriores es el primer botón

a)

b)

Figura 21 Materiales granulares no tratados a) para subbase (Modelos), y b) para base granular (material no tratado) y subrasante

4.5 Modelos para materiales granulares

Al escoger un modelo de la Figura 21 el programa muestra a continuación un formulario con los datos o propiedades de cada uno de los modelos elásticos no lineales. La definición de los parámetros de cada uno de los modelos se hizo en el capitulo 2

4.5.1 Predimensionamiento

Para predimensionar, se escoge una categoría de material que cumpla con las especificaciones detalladas en la tabla, Aunque se puede cambiar la relación de poisson del material el manual aconseja un valor de 0.35.

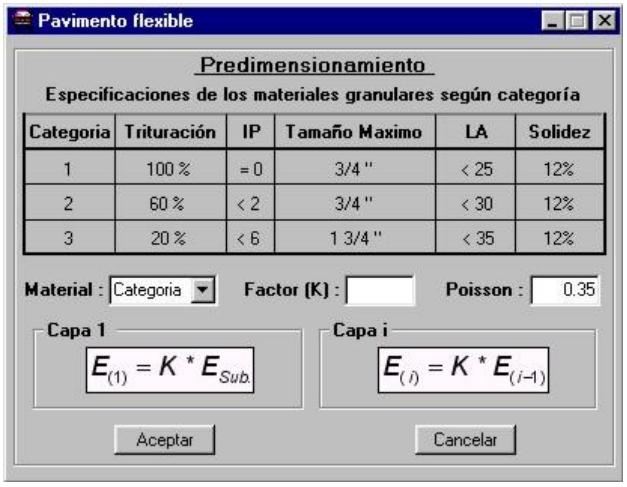


Figura 22 Predimensionamiento de materiales granulares no tratados

4.5.2 Modelo K-θ

El modelo K-θ tiene los siguientes parámetros *K1, K2, pa* (esfuerzo de referencia), un módulo máximo posible y una relación de poisson de 0.3

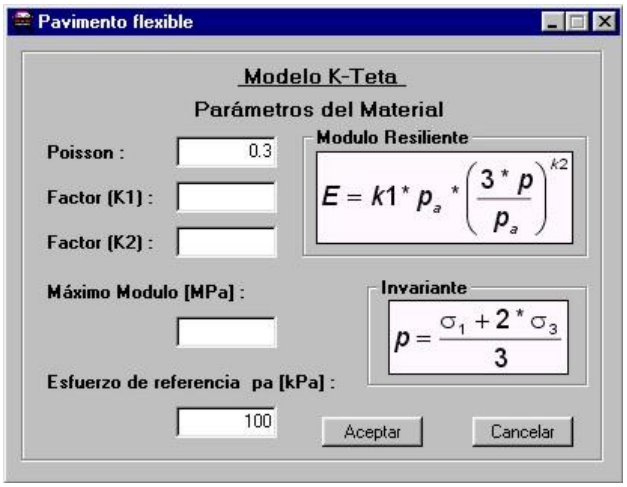


Figura 23 Modelo K-θ para materiales granulares no tratados

4.5.3 Modelo K-θ modificado

El modelo K-θ modificado a diferencia del modelo K-θ, depende tanto del esfuerzo promedio como del esfuerzo desviador y posee un parámetro más (*K3*)

La Figura 24 y la Figura 25 presentan los parámetros y las ecuaciones del modelo K-θ modificado

Figura 24 Modelo K-θ modificado para materiales granulares no tratados

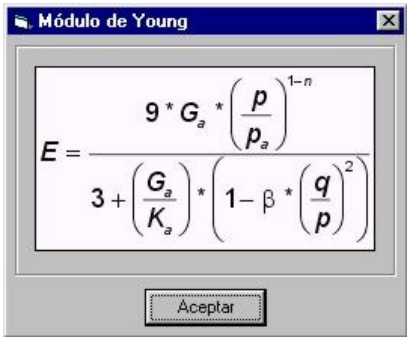
a)

b)

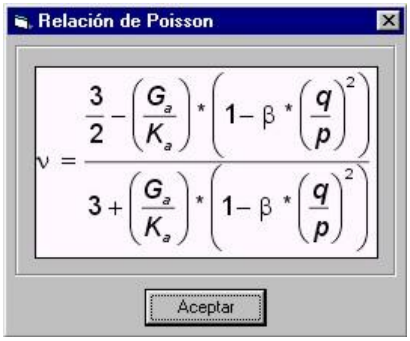
Figura 25 Invariantes Modelo K-θ modificado a)Esfuerzo promedio y b)Esfuerzo desviador

4.5.4 Modelo de Boyce isotrópico

El valor del poisson al igual que el módulo elástico, dependen de *p* y de *q* La Figura 27 y la Figura 26 muestran los parámetros y las formulas del modelo de Boyce isotrópico. En la Figura 27 al pulsar sobre cada uno de los botones que están marcados con letras se presenta las ecuaciones de la Figura 27



a)



b)

c)

d)

Figura 26 Coeficientes de elasticidad para el modelo de Boyce a)Módulo de Young, b)Poisson, c)Módulo de compresibilidad y d)Módulo de cortante

Figura 27 Modelo de Boyce isotópico para materiales granulares no tratados

Al seleccionar cualquiera de los modelos y llenar las propiedades de cada uno de los modelos se pulsa el botón **Aceptar** y el programa presenta las Figura 28 si el material es de subbase, Figura 29 si es de base o la Figura 30 para plataforma o subrasante

Figura 28 Materiales granulares no tratados (Propiedades)

Figura 29 Base granular (material no tratado)

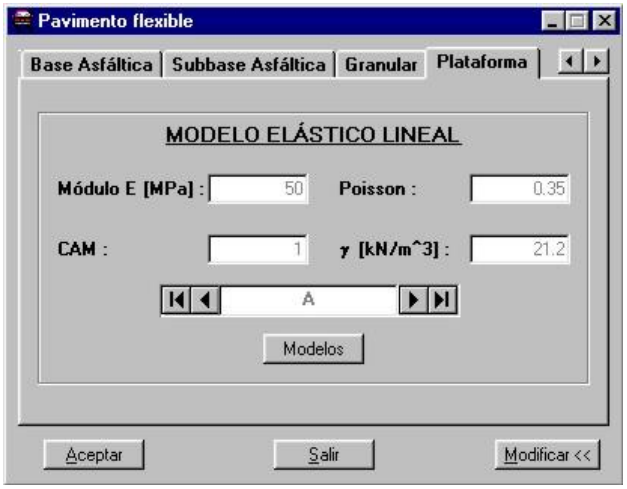


Figura 30 Plataforma o subrasante

4.6 Bases de datos

Las propiedades de los diferentes materiales se guardan en bases de datos de Microsoft Access. Estas bases de datos pueden ser modificadas al pulsar el botón **Modificar<<** que está ubicado en la parte inferior derecha de los formularios de las estructuras. Luego de esto, el formulario muestra un marco con 5 botones. (ver Figura 31). El primer botón, permite modificar un registro existente de la base de datos (ver Figura 33), el segundo crea un nuevo registro en la base de dato (ver Figura 32). El botón grabar que estaba inhabilitado se prende al pulsar cualquiera de los dos botones anteriores, permitiendo guardar la información digitada. El

cuarto botón despliega una caja donde le pide al usuario el nombre del registro a utilizar(ver Figura 34) El ultimo botón borra el registro que se muestra en pantalla y lo elimina de la base de datos(Figura 35).

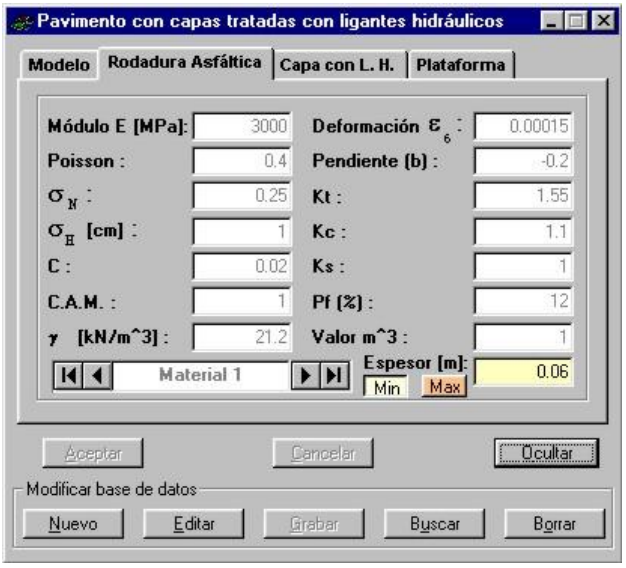


Figura 31 Presentación del formulario cuando se modifican las bases de datos

Figura 32 Nuevo registro para la base de datos

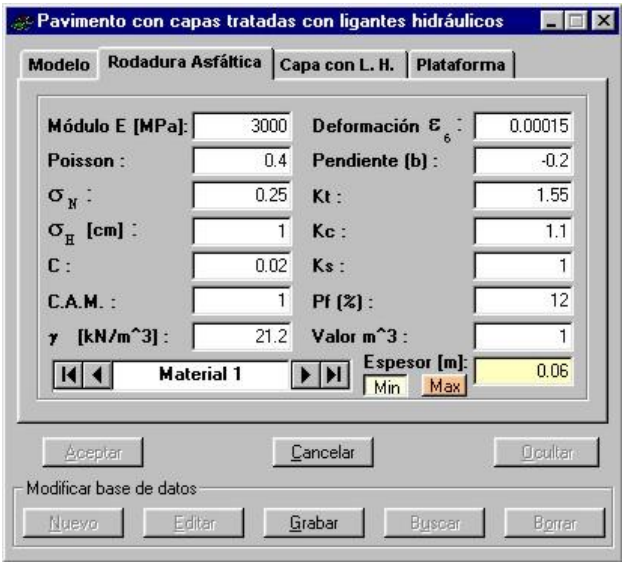


Figura 33 Edición de un registro de la base de datos

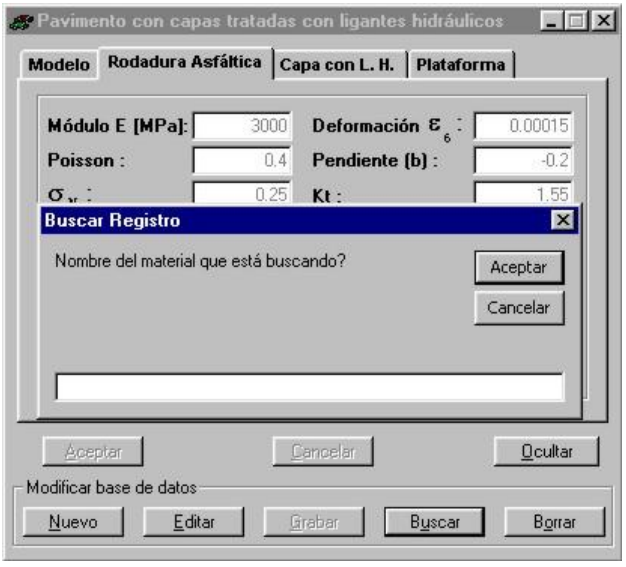


Figura 34 Búsqueda de un registro en la base de datos

Figura 35 Eliminación de un registro en una base de datos

4.7 Pavimentos flexibles de bajo tráfico

4.7.1 Modelo

El pavimento consta de tres materiales y la plataforma. El primer material es una rodadura asfáltica la cual se puede cambiar por un tratamiento superficial, el segundo una base granular, el tercer material es una subbase granular y por ultimo la plataforma o subrasante. La Figura 36 presenta el modelo con todas las capas enumeradas anteriormente.

Si el tráfico es menor a 100 000 vehículo pesados, se puede remplazar la capa de rodadura por un tratamiento superficial simple y el espesor de la base granular se toma como 0.15 m.

El criterio a verificar es la deformación vertical en la parte superior de la plataforma.

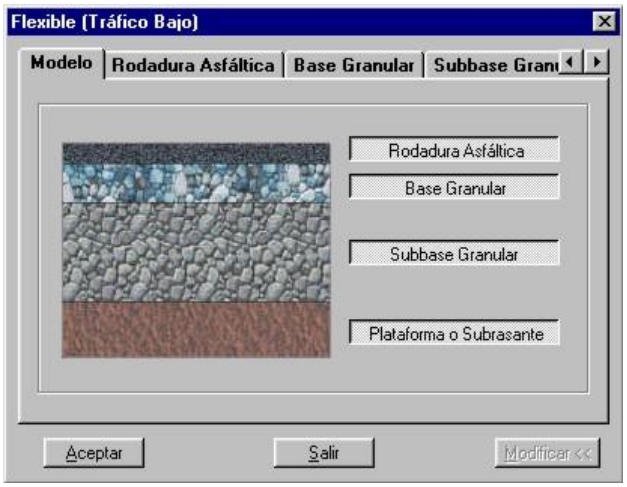


Figura 36 Modelo para pavimentos flexibles de bajo tráfico

4.7.2 Resultados

El programa presenta las propiedades mecánicas, los esfuerzos admisibles y los esfuerzos calculados, para cada una de las capas. Además el tipo de modelo utilizado por cada uno de los materiales.

Capa	Módulo [MPa]	Poisson	Ligada	Espesor [m]	Admisibles	Calculados	Modelo
Rodadura	3000	0.4	Si	0.06	2.98E-02	4.14E-04	Lineal
Base Granular	400	0.35	Si	0.2	1.21E-03	9.75E-04	
Subbase Granular 5							
Subbase Granular 4							
Subbase Granular 3							
Subbase Granular 2	200	0.35	Si	0	1.04E-03	7.03E-04	Predimensión
Subbase Granular 1	100	0.35	Si	0.16	1.04E-03	9.69E-04	
Plataforma	50	0.35			1.04E-03	1.01E-03	Lineal
Subrasante 1							
Subrasante							

Figura 37 Resultado al utilizar el predimensionamiento para la capa de subbase

4.8 Pavimentos flexibles con capas asfálticas gruesas

El programa verifica la rotura por fatiga en la base de las capas asfálticas y la deformación vertical de la subrasante, comparándolas con los datos admisibles.

La estructura puede estar conformada por una rodadura asfáltica, base y subbase o por una rodadura y base asfáltica sobre una plataforma.

a) b)

Figura 38 Modelo de pavimento con capas asfálticas gruesas con a) Base y subbase y b)Base

El programa presenta el diseño de está estructura en una tabla similar a la Figura 37.

4.9 Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos

Las estructuras con capas ligadas con materiales hidráulicos se clasificaron en dos casos. El primer caso consta de una sola capa de material con ligante hidráulico y el segundo posee dos capas. Sobre las capas de material asfáltico se coloca una capa de rodadura asfáltica

a) b)

Figura 39 Modelo de pavimento con capas tratadas con ligantes hidráulicos a) una sola capa y b) dos capas

Se verifica la rotura por fatiga en la base de la capas tratadas y la deformación en la subrasante. En el segundo caso la interfase entre las capas tratadas de pende del material utilizado. (ver Tabla) El programa permite escoger el tipo de liga a utilizar (ver Figura 40 b)

Tabla 4 Tipo de liga entre capas de material tratado con ligantes hidráulicos

Material	**Liga**
Grava ceniza volante cal	No ligadas
Grava escoria granulada	Ligadas
Otros ligantes	Promedio

Los resultados se presentan en una tabla (ver Figura 40)

Capa	Módulo [MPa]	Poisson	Ligada	Espesor [m]	Admisibles	Calculados	Modelo
Rodadura Asfáltica	5400	0.35	Prom.	0.14	8.61E-05	-4.17E-06	Lineal
Capa con Lig. H 1	15000	0.25	Prom.	0.2	5.10E-01	3.78E-01	
Capa con Lig. H 2	15000	0.25	Prom.	0.2	5.10E-01	4.40E-01	
Plataforma	50	0.35			3.61E-04	7.59E-05	
Subrasante 1							
Subrasante							

Figura 40 Tabla de salida para pavimentos con dos capas de material tratadas.

El botón Datos presenta las propiedades mecánicas de cada una de las capas.

4.10 Pavimentos con estructura mixta

La estructura de pavimento mixta tiene dos periodos de vida bien definidos. En el primero, las capas que lo conforman están ligadas, pero después de cierto tiempo el material tratado con ligante hidráulicos se fisura y el módulo cae a una quinta parte del inicial. Al degradarse el material tratado, la liga entre los materiales se pierde y comienza el material asfáltico a degradarse

Figura 41 Modelo estructura mixta

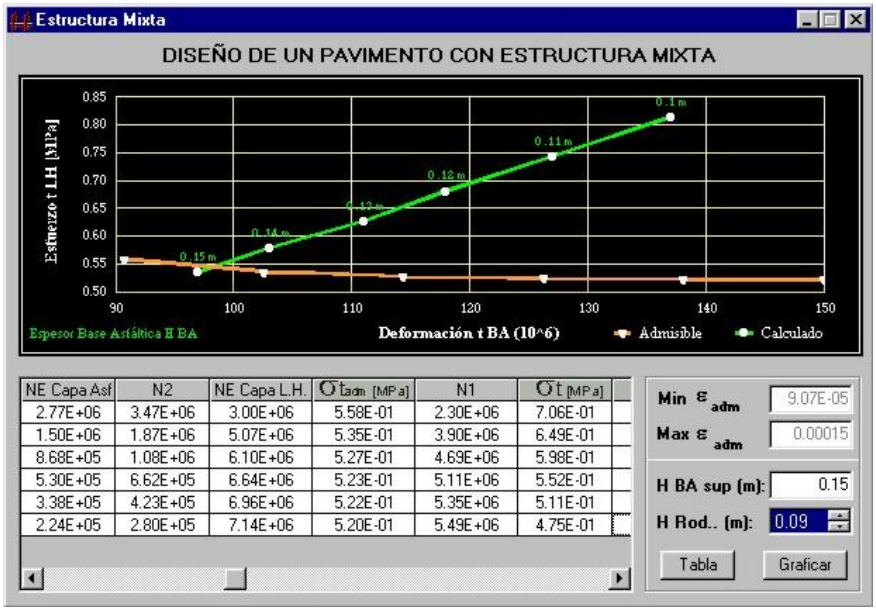
Después de escoger los materiales se pulsa el botón Aceptar y el programa calcula la primera y segunda etapa para los espesores mínimos.

Para encontrar los esfuerzos y las deformaciones para las dos etapas de los demás espesores se debe pulsar el botón Calcular (ver Figura 42)

Capa	Módulo [MPa]	Poisson	Ligada	Espesor [m]	Admisibles	Calculados	Etapa
Rodadura Asfáltica	5400	0.35	Si	0.06		-3.03E-05	Primera
Base Asfáltica	9300	0.35	Si	0.1		1.08E-06	
Capa con Lig. H.	15000	0.25	Si	0.16		9.45E-01	
Plataforma	50	0.35				1.94E-04	
Rodadura Asfáltica	5400	0.35	Si	0.06		-4.39E-05	Segunda
Base Asfáltica	9300	0.35	No	0.1		1.50E-04	
Capa con Lig. H.	3000	0.25	Si	0.16		5.18E-01	
Plataforma	50	0.35				5.84E-04	

Figura 42 Tabla de salida para pavimentos con estructura mixta

Para determinar el diseño se grafican los valores admisibles y los calculados y el punto de interseccion de estas dos lines determina la solución



NE Capa Asf	N2	NE Capa L.H.	σtadm [MPa]	N1	σt [MPa]
2.77E+06	3.47E+06	3.00E+06	5.58E-01	2.30E+06	7.06E-01
1.50E+06	1.87E+06	5.07E+06	5.35E-01	3.90E+06	6.49E-01
8.68E+05	1.08E+06	6.10E+06	5.27E-01	4.69E+06	5.98E-01
5.30E+05	6.62E+05	6.64E+06	5.23E-01	5.11E+06	5.52E-01
3.38E+05	4.23E+05	6.96E+06	5.22E-01	5.35E+06	5.11E-01
2.24E+05	2.80E+05	7.14E+06	5.20E-01	5.49E+06	4.75E-01

Figura 43 Tabla y gráfica de datos admisible y calculados

Se puede revisar las graficas para los diferentes espesores de la rodadura escogiendo el valor en la lista presentada en la parte uinferior derecha (verv Figura 43 cuadro resaltado en azul)

Con los espesores calculados se obtinen los valores de deformación en la plataforma y se comparan con los valores admisibles.

Estructura Mixta

DISEÑO DE UN PAVIMENTO CON ESTRUCTURA MIXTA

Capa	Módulo [MPa]	Poisson	Ligada	Espesor [m]	Admisibles	Calculados	Etapa
Rodadura Asfáltica	5400	0.35	Si	0.12	9.95E-05	-1.28E-05	Primera
Base Asfáltica	9300	0.35	Si	0.15	9.08E-05	1.85E-06	
Capa con Lig. H.	15000	0.25	Si	0.27	5.40E-01	4.75E-01	
Plataforma	50	0.35			4.24E-04	9.29E-05	
Rodadura Asfáltica	5400	0.35	Si	0.12	1.08E-04	-3.25E-05	Segunda
Base Asfáltica	9300	0.35	No	0.15	9.83E-05	9.07E-05	
Capa con Lig. H.	3000	0.25	Si	0.27	5.58E-01	3.35E-01	
Plataforma	50	0.35			4.64E-04	3.33E-04	

Esfuerzo de tracción σ_t | Deformación de tracción ε_t | Deformación axial ε_z

Gráfica | Salir | Calcular | Datos

Figura 44 Tabla de datos admisible y calculados (Solución)

4.11 Pavimentos con estructura inversa

Para el diseño de la estructura inversa se debe verificar la rotura por fatiga en la parte inferior de las capas asfáltica y en la capa tratada con ligantes hidráulicos. Además, se debe controlar la deformación vertical en la capa granular y en la plataforma

La deformación vertical admisible de la capa granular puede aumentarse un 20% debido a la buena calidad que de está

Los demás criterios se presentan en el manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá

Figura 45 Modelo estructura inversa

Al igual que las estructutras anteriores, los resultados se consignan en una tabla (ver Figura 46)

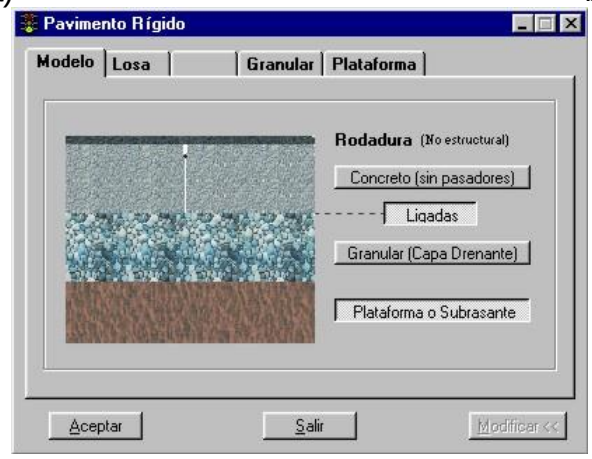
Capa	Módulo [MPa]	Poisson	Ligada	Espesor [m]	Admisibles	Calculados	Modelo
Rodadura Asfáltica	5400	0.35	Si	0.1	8.61E-05	4.08E-06	Lineal
Base Asfáltica	9300	0.35	Si	0.2	7.86E-05	3.85E-05	
Granular	480	0.35	Si	0.5	4.34E-04	-1.13E-04	
Capa con Lig. H.	15000	0.25	Si	0.5	5.10E-01	1.23E-01	
Plataforma	50	0.35			3.61E-04	2.65E-05	
Subrasante 1							
Subrasante							

Figura 46 Tabla de salida para pavimentos con estructura inversa

4.12 Pavimentos rígidos en concreto hidráulico

El programa verifica la fatiga de las capas de base (Losa) y de subbase (**Figura 47** casos a y b) y la fatiga y la deformación vertical en el granular (**Figura 47** caso c)

a) b)



c)

Figura 47 Posibles configuraciones para pavimentos en concreto hidráulico. a) Losa con pasadores, material tratado y plataforma. b) Losa sin pasadores, material tratado y plataforma c) Losa , Granular y plataforma

El programa tambien diseña el refuerzo en acero

5. CONCLUSIONES

- El programa es una herramienta importante para cualquier ingeniero Civil, ya que ayuda en el diseño de estructuras de una forma rápida y amigable

- Los resultados obtenidos por el programa DOP para el diseño de las diferentes familias de estructuras, mostraron iguales resultados salvo algunos errores tipográficos presentados en el Manual

- Los modelos elásticos no lineales presentados para el diseño de las capas granulares no tratadas, que dependen del esfuerzo desviador q (Modelo k-θ modificado y modelo de Boyce) no se logró la convergencia de los módulos ni de la relación de Poisson (Modelo de Boyce). Esto debido al comportamiento del modelo multicapa utilizado en el programa DEPAV. El Ingeniero A. Gomes Correia en el paper "Review of models and modelling of unbound granular materials" dice que, al usar modelos elásticos lineales para materiales granulares no tratados, los esfuerzos en la base de las capas granulares poseen una pendiente negativa es decir la base se encuentra en tracción debido a la flexión. Estos esfuerzos son plásticamente no posibles y exceden la resistencia a la falla del granular(El comportamiento de los granulares depende del confinamiento y de las propiedades de la capa subyacente).

- La utilización de un método diferente (Elementos finitos o diferencias finitas) para el calculo de los esfuerzos y las deformaciones permitiría el uso de este programa de la misma forma que se utilizo el DEPAV.

BIBLIOGRAFÍA

[1] AKOW Y. Heck J. V. Modelling of flexible pavement using the finite element method and a simplified approach

[2] ARBOLES Sergio. Visual basic 5 a fondo. Editorial inforbook's impreso en España

[3] BOISSOUDY A. de Introducing the nonlinearity of the granular material in routine analytical pavement design

[4] CORNELL Gary. Manual Visual Basic 5. Traducción Antonio Leopoldo Corral Liria, Manuel Torres Gil Departamento de Lenguas y Computación Universidad de Almeria. Editorial McGraw-Hill

[5] DAWSON A. R. Parametric study flexible pavement University of Nottingham, UK

[6] DELGADO Estévez Jairo Alonso, Diseño Racional de Pavimentos, programa de computador. Tesis magíster Universidad de los Andes.

[7] Flexible pavements: proceedings of the European Symposium Euroflex 1993 : Lisbon, Portugal, 20-22 September 1993 / edited by A. Gomes Correia.

[8] GOMES Correia A., Hornych Pierre and Akou Yasmina. Review of models and modelling of unbound granular materials

[9] MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BOGOTÁ D.C. Instituto de Desarrollo Urbano, Universidad de los Andes

[10] MONTEJO Fonseca Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Segunda edición ,1998 Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones.

[11] SÁNCHEZ Sabogal Fernando. Pavimentos Tomo I. Primera edición 1984, Universidad la Gran Colombia Colección textos y consulta