

# Caracterización de los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexibles

## Deflexion Bowls Characterization, in Flexible Pavements' Structures

Carlos Hernando Higuera Sandoval\*

### Resumen

El propósito del artículo es mostrar la caracterización de los cuencos de deflexión en una estructura de pavimento flexible y modelar el comportamiento del cuenco de deflexión ante la variación de los módulos de elasticidad y los espesores de las diferentes capas que integran un modelo estructural de pavimentos. El análisis de la deflexión se hace teniendo en cuenta una estructura de pavimento flexible de referencia, constituida por una capa de rodadura asfáltica, una capa de base granular y una capa de subbase granular, apoyado todo el paquete estructural sobre la subrasante. Para la modelación de los cuencos de deflexión se utilizó el programa BISAR 3.0 de la SHELL, y para el cálculo de los parámetros que caracterizan el cuenco de deflexión se utilizó la metodología de la AASHTO. Finalmente, se presentan las conclusiones del comportamiento de los cuencos de deflexión en pavimentos flexibles. El artículo es producto del proyecto de investigación titulado *Caracterización de los cuencos de deflexión*

### Abstract

The present work aims to show the deflexion bowls' characterization in a flexible pavement structure and to model the behavior of the deflexion bowl in the face of the elasticity modules' variation and the different layers' thickness, that integrate a pavement structural model. The deflexion analysis is carried out, bearing in mind as reference a flexible pavement structure, constituted by a layer of road asphalt, a granular base layer and a granular subbase layer, the whole structural package supported on the sub-grade line. For the deflection bowls modeling, the program used was SHELL'S BISAR 3.0, and for the parameters that characterize the deflexion bowl' calculation, was used the AASHTO's methodology. Finally, the deflexion bowls behavior's conclusions in flexible pavements are presented.

This article is an investigation project's product titled *Characterization of the Deflexion Bowls in Structures of Flexible Pavements*, registered at the University's

Ingeniero en Transportes y Vías, Especialista en Vías Terrestres, Especialista en Carreteras, Especialista en Transportes Terrestres, Magister en Ingeniería de Vías Terrestres, Profesor Asociado de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Investigador del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial -Grinfravial-, carlos.higuera@uptc.edu.co

*en estructuras de pavimentos flexibles*, registrado en la Dirección de Investigaciones de la Uptc con el código SGI-706, que realizó el autor en la Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial -Grinfravial-.

**Palabras clave:** Deflexión, Cuencos de deflexión, Diseño de pavimentos.

Investigations Division with the code SGI-706, that the author carried out in the Transport and Roads' School, at the Engineering School of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, in the Research and Development Group in Vial Infrastructure -Grinfravial-.

**Key words:** Deflexion, Deflexion Bowls, Pavement Design.

## I. Introducción

El presente artículo muestra de manera detallada el comportamiento de los cuencos de deflexión en una estructura de pavimento flexible de referencia, teniendo en cuenta las condiciones de carga y los diferentes valores de los módulos de elasticidad y de los espesores de las capas que integran el modelo estructural del pavimento flexible.

Los cuencos de deflexión se caracterizan por los siguientes parámetros: la deflexión a nivel de la superficie del pavimento y a nivel de la subrasante; la deflexión en el eje del sistema de carga, a 30, 60 y 90 centímetros del eje de carga; la determinación del Índice de Curvatura Superficial (ICS); el Índice de Daño de la Base (IDB); el Índice de la Curvatura de la Base (ICB), y el cálculo de los parámetros AREA, Módulo Equivalente ( $E_p$ ) y Número Estructural (SN).

La modelación de los diferentes parámetros que caracterizan un cuenco de deflexión, para una estructura de pavimento flexible, permite definir su tendencia y su comportamiento ante la variación de la magnitud de los módulos de elasticidad y de los

espesores de las capas del pavimento. También se presenta el análisis de sensibilidad de las variables que caracterizan los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexibles.

## II. Conceptos básicos

Algunos conceptos básicos para definir la caracterización de los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexible son los siguientes:

### A. Concepto de deflexión

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente, la carga es producida por el tránsito vehicular (ver figura 1). Cuando se aplica una carga en la superficie, no solo se desplaza el punto bajo esta, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco de deflexión [1].

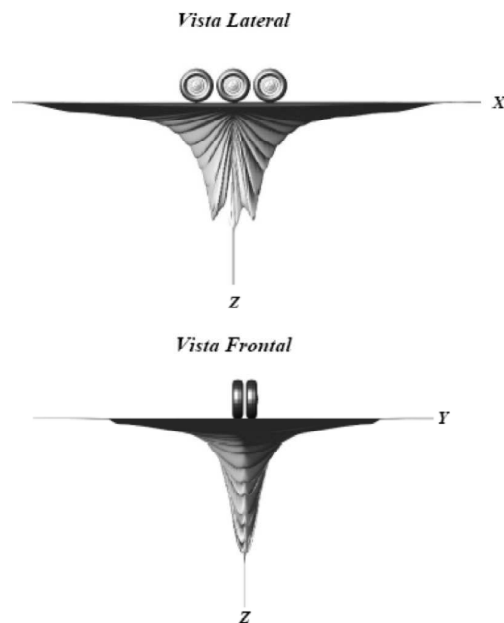


Figura 1. Esquema de un cuenco de deflexión

La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que, en un modelo estructural, si la deflexión es alta, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente, y lo contrario, si la deflexión es baja quiere decir que el modelo estructural del pavimento tiene buena capacidad estructural.

*B. Módulo de elasticidad efectivo de las capas del pavimento,  $E_p$  [2]*

Representa el módulo equivalente de una estructura de un pavimento flexible y se determina con base en la información del cuenco de deflexión, de las condiciones de carga, del espesor total de la estructura del pavimento y de las condiciones de resistencia de la subrasante, por medio de la ecuación (1).

$$\Delta o = 1.5qa \left[ \frac{1}{Mr \sqrt{1 + \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{Mr}}}} + \frac{1}{E_p} \sqrt{1 + \frac{D^2}{a^2}} \right] \quad (1)$$

Donde:

- $o$ : Deflexión máxima corregida a 20 °C, en cm
- $q$ : Presión de contacto, kg/cm<sup>2</sup>
- $a$ : Radio de carga, cm
- $Mr$ : Módulo resiliente de la subrasante, kg/cm<sup>2</sup>

- $D$ : Espesor total del pavimento, cm
- $E_p$ : Módulo efectivo de todas las capas de pavimento, kg/cm<sup>2</sup>

*C. Número estructural efectivo del pavimento,  $SN_{ef}$*

Representa la capacidad estructural de un modelo de pavimento flexible, calculado a partir de la información del cuenco de deflexión, del módulo equivalente y del espesor total del modelo estructural, y se determina por medio de la ecuación (2).

$$SN_{ef} = 0.0045 D \sqrt[3]{E_p} \quad (2)$$

Donde:

- $SN_{ef}$ : Número estructural efectivo de la estructura de referencia
- $D$ : Espesor total del pavimento, pulgadas
- $E_p$ : Módulo efectivo de todo del pavimento, lb/pulg<sup>2</sup>

*D. Índices de los cuencos de deflexión*

Para determinar los índices que caracterizan un cuenco de deflexión se tiene en cuenta la deflexión del modelo estructural medida en los siguientes puntos: en el eje de carga del sistema ( $D_0$ ), a 30 cm del eje de carga ( $D_1$ ), a 60 cm del eje de carga ( $D_2$ ) y a 90 cm del eje de carga ( $D_3$ ), tal como se muestra en la figura 2.

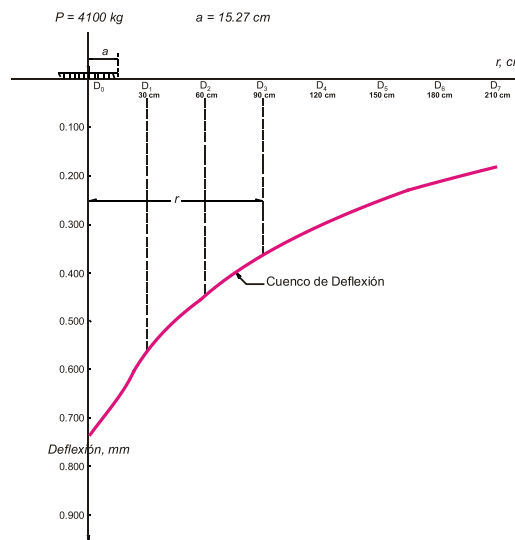


Figura 2. Cuenco de deflexión de un pavimento flexible

**AREA:** Representa la rigidez relativa entre el pavimento y su soporte. Según los criterios de Hoffman y Thompson, citados por Huang [3], el parámetro AREA se determina por medio de la siguiente expresión:

$$AREA = \frac{150(D_0 - 2D_1 + 2D_2 - D_3)}{D_0}, mm \quad (3)$$

Donde:

AREA = Parámetro AREA calculado a partir de las deflexiones, mm

$D_0$  = Deflexión en el eje de carga del sistema ( $r = 0$  cm), mm

$D_1$  = Deflexión a 30 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 30$  cm), mm

$D_2$  = Deflexión a 60 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 60$  cm), mm

$D_3$  = Deflexión a 90 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 90$  cm), mm

El valor máximo del "AREA" es 900 y se presenta cuando las cuatro medidas de deflexión son iguales, situación que corresponde a un pavimento extremadamente rígido, caso que nunca sucede en la práctica. El valor mínimo posible del parámetro es 278, que ocurriría si el pavimento tuviese la misma rigidez de la subrasante.

Los rangos de valores del parámetro "AREA" [4], para diferentes condiciones generales de los pavimentos asfálticos, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Rangos de valores del parámetro AREA

Estructura de pavimento	AREA, mm
Pavimentos con capas asfálticas gruesas (10 cm o más)	525 - 750
Pavimentos con capas asfálticas delgadas (<10 cm)	400 - 525
Pavimentos con tratamientos superficiales	375 - 425
Pavimentos débiles con tratamientos superficiales	300 - 375

**ÍNDICE DE CURVATURA SUPERFICIAL -ICS-** [4]: La pendiente o las diferencias de deflexión cerca del punto de aplicación de la carga reflejan la rigidez relativa en la parte superior de la estructura del pavimento. El índice de curvatura superficial -ICS- da una idea de la rigidez de las capas asfálticas y se determina por medio de la ecuación (4).

$$ICS = D_0 - D_1 \quad (4)$$

Donde:

$D_0$  = Deflexión en el eje de carga del sistema ( $r = 0$  cm), mm

$D_1$  = Deflexión a 30 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 30$  cm), mm

**ÍNDICE DE DAÑO DE LA BASE -IDB-** [4]: Este índice da una idea de la deformación de compresión sobre la capa de base granular. Valores de IDB por encima de 0,150 milímetros indican la posibilidad

de un comportamiento deficiente de la base granular. Se determina por medio de la ecuación (5):

$$IDB = D_1 - D_2 \quad (5)$$

Donde:

$D_1$  = Deflexión a 30 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 30$  cm), mm

$D_2$  = Deflexión a 60 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 60$  cm), mm

**ÍNDICE DE LA CURVATURA DE LA BASE -ICB-** [4]: Este índice da una idea de la rigidez de la subrasante. Valores de ICB superiores 0,080 milímetros pueden representar una condición pobre de la subrasante. Se determina por medio de la ecuación (6):

$$IDB = D_2 - D_3 \quad (6)$$

Donde:

$D_2$  = Deflexión a 60 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 60$  cm), mm

$D_3$  = Deflexión a 90 cm con respecto al eje de carga del sistema ( $r = 90$  cm), mm

La pendiente o las diferencias de deflexión en la parte media del cuenco de deflexión (entre unos 300 y 900 mm del punto de aplicación de la carga) reflejan la rigidez relativa de la capa de base o de las capas inferiores de la estructura del pavimento.

### III. Metodología para la caracterización de cuencos de deflexión

Para determinar la caracterización de los cuencos de deflexión se realizaron los siguientes pasos:

#### A. Definición del modelo de referencia [5, 6]

Para determinar las características de los cuencos de deflexión se parte de un modelo estructural de referencia que cumple con los criterios de diseño, tal como se indica en la figura 3.

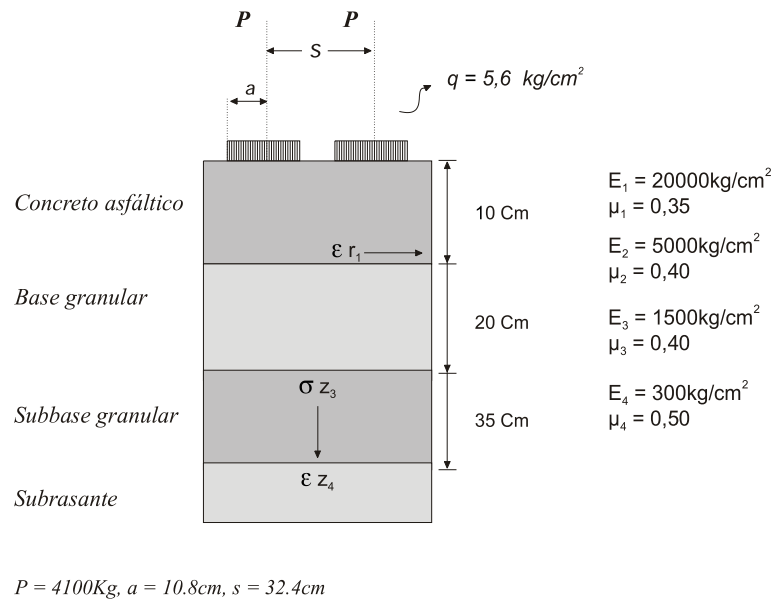


Figura 3. Modelo estructural de referencia

El modelo estructural cumple con los criterios de diseño, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Chequeo del modelo de referencia

Capa	Parámetro	Valor en servicio o Crítico*, $V_s$	Valor admisible, $V_{adm}$	Relación, % $\frac{V_s}{V_{adm}} * 100$	
Concreto asfáltico	$\epsilon r_1$	$1.81 \times 10^{-4}$	SHELL 3.36 x 10 <sup>-4</sup>	54	
Subrasante	$\epsilon z_4$	$3.61 \times 10^{-4}$		5.05 x 10 <sup>-4</sup>	71
Subrasante	$z_3$	0.12 kg/cm <sup>2</sup>	Dormon-Kerhoven	0.379 kg/cm <sup>2</sup>	32
	$z_3$	0.12 kg/cm <sup>2</sup>	CRR	0.12 kg/cm <sup>2</sup>	100
Estructura	$\Delta o$	0.668 mm	Huang	0.694 mm	96

\* Valores de servicio obtenidos de los Programas BISAR 3.0 de la SHELL

De acuerdo con los valores contenidos en la tabla 2, la estructura de referencia se encuentra bien diseñada, pues cumple con todos los criterios de diseño de fatiga, deformación o ahuellamiento y deflexión, y el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible es el adecuado.

#### B. Definición de los modelos estructurales para caracterizar los cuencos de deflexión

Partiendo del modelo estructural de referencia se definió un conjunto de estructuras de pavimento flexible, variando únicamente los módulos dinámicos y los espesores de las diferentes capas del modelo de referencia, tal como se indica en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Variación de los módulos dinámicos de las capas

Variable	Parámetro de diseño	Rango de variación kg/cm <sup>2</sup>	Variación kg/cm <sup>2</sup>
Módulos dinámicos, E <sub>i</sub>	E <sub>1</sub> - Capa asfáltica	10000 - 30000	2000
	E <sub>2</sub> - Capa de base granular	2000 - 8000	1000
	E <sub>3</sub> - Capa de subbase granular	500 - 5000	500
	E <sub>4</sub> - Capa subrasante	100 - 1000	100

Tabla 4. Variación de los espesores de las capas

Variable	Parámetro de diseño	Rango de variación cm	Variación cm
Espesores de las capas, h <sub>i</sub>	h <sub>1</sub> - Capa asfáltica	5 - 15	1
	h <sub>2</sub> - Capa de base granular	10 - 45	5
	h <sub>3</sub> - Capa de subbase granular	20 - 60	5

#### C. Determinación del cuenco de deflexión

Definidos los modelos estructurales y las condiciones de carga, se calcularon los cuencos de deflexión con ayuda del programa BISAR de la SHELL, y los valores de los parámetros D<sub>0</sub>, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> y D<sub>3</sub> se muestran en las tablas 5 a la 11.

#### D. Cálculo de parámetros del cuenco de deflexión

Los parámetros de los cuencos de deflexión se determinaron utilizando las ecuaciones definidas en el apartado II del presente artículo, y sus valores se presentan en las tablas 5 a la 11.

#### E. Modelación y definición de tendencias de comportamiento

Con los valores de los parámetros del cuenco de deflexión se realizó la modelación y la definición de tendencias de comportamiento de cada parámetro.

### IV. Conclusiones del análisis de caracterización de los cuencos de deflexión de una estructura de pavimento flexible

#### A. Caracterización de cuencos de deflexión variando el módulo dinámico de la capa asfáltica, E<sub>1</sub>

Del análisis de la tabla 5 y de la figura 4, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

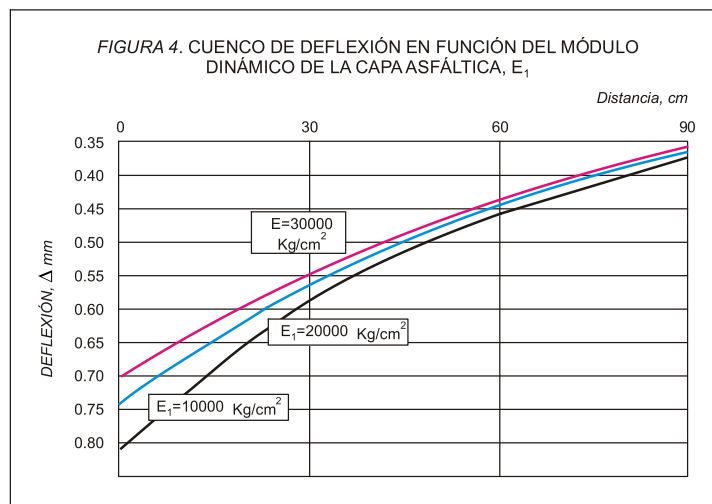
- A medida que se incrementa el valor del módulo dinámico de capa asfáltica se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 71.43%.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa asfáltica y el parámetro AREA es directamente

proporcional, lo cual demuestra el incremento de la rigidez de la capa asfáltica y, por supuesto, de la estructura del pavimento flexible.

- La relación entre el módulo dinámico de la capa asfáltica y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional, su tendencia es decreciente.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa asfáltica y el Módulo Equivalente del Pavimento -Ep- y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa asfáltica y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es baja.

Tabla 5. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del módulo de la mezcla asfáltica

Módulo de la capa asfáltica, kg/cm <sup>2</sup>	Deflexión a 0 mm, Do mm	Deflexión a 300 mm, D1 mm	Deflexión a 600 mm, D2 mm	Deflexión a 900 mm, D3 mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= (Do-D1) mm	Índice de daño de la base, IDB=(D1-D2) mm	Índice de la curvatura de la base, ICB=(D2-D3) mm	Módulo equivalente, Ep kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
10000	0.803	0.584	0.458	0.371	601	0.219	0.126	0.087	2940	4.00
12000	0.783	0.578	0.454	0.369	616	0.205	0.124	0.085	3060	4.06
14000	0.768	0.573	0.450	0.367	621	0.195	0.123	0.083	3160	4.10
16000	0.755	0.568	0.447	0.365	626	0.187	0.121	0.082	3250	4.14
18000	0.744	0.565	0.445	0.363	630	0.179	0.120	0.082	3340	4.18
20000	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.20
22000	0.727	0.558	0.441	0.361	637	0.169	0.117	0.080	3470	4.23
24000	0.719	0.556	0.439	0.360	640	0.163	0.117	0.079	3530	4.25
26000	0.712	0.553	0.438	0.359	643	0.159	0.115	0.079	3590	4.28
28000	0.706	0.551	0.436	0.358	645	0.155	0.115	0.078	3690	4.30
30000	0.700	0.549	0.435	0.357	648	0.151	0.114	0.078	3700	4.32





*B. Caracterización de cuencos de deflexión variando el módulo dinámico de la capa de base granular*

Del análisis de la tabla 6 y de la figura 5, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

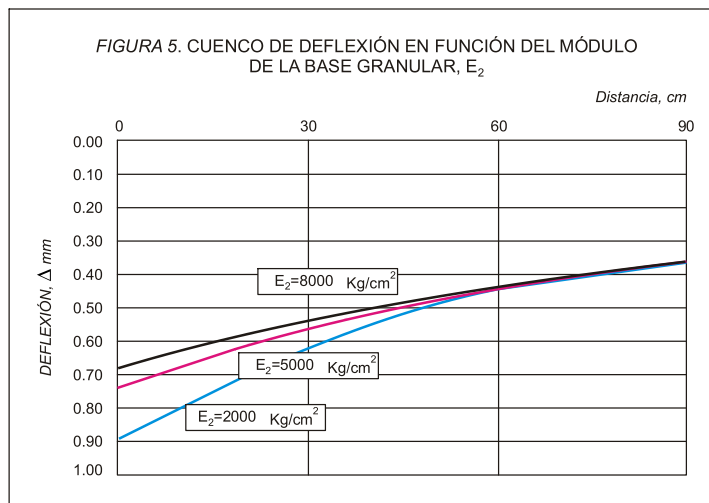
- A medida que se incrementa el valor del módulo dinámico de capa de base granular se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 68.70%.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa

de base granular y el parámetro AREA es directamente proporcional.

- La relación entre el módulo dinámico de la capa de base granular y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional, su tendencia es decreciente.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa de base granular y el Módulo Equivalente del Pavimento -Ep- y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa de base granular y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es media.

Tabla 6. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del módulo de la base granular

Módulo de la base granular, kg/cm <sup>2</sup>	Deflexión a 0 mm, Do mm	Deflexión a 300 mm, D1 mm	Deflexión a 600 mm, D2 mm	Deflexión a 900 mm, D3 mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= (Do-D1) mm	Índice de daño de la base, IDB=(D1-D2) mm	Índice de la curvatura de la base, ICB=(D2-D3) mm	Módulo equivalente, Ep kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
2000	0.887	0.626	0.458	0.365	578	0.261	0.168	0.093	2500	3.78
3000	0.815	0.594	0.45	0.364	601	0.221	0.144	0.086	2870	3.96
4000	0.768	0.575	0.446	0.363	620	0.193	0.129	0.083	3160	4.09
5000	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.19
6000	0.710	0.550	0.440	0.361	645	0.160	0.110	0.079	3610	4.28
7000	0.689	0.542	0.437	0.360	655	0.147	0.105	0.077	3800	4.35
8000	0.673	0.534	0.435	0.360	662	0.139	0.099	0.075	3960	4.41



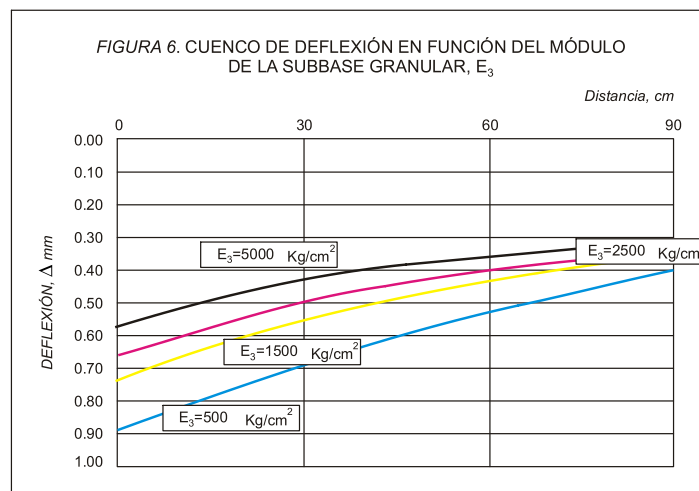
*C. Caracterización de cuencos de deflexión variando el módulo dinámico de la capa de subbase granular*

Del análisis de la tabla 7 y de la figura 6, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- A medida que se incrementa el valor del módulo dinámico de capa de subbase granular se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 69.54%.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa de subbase granular y el parámetro AREA es directamente proporcional.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa de subbase granular y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional, su tendencia es decreciente.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa de subbase granular y el Módulo Equivalente del Pavimento -Ep- y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el módulo dinámico de la capa de subbase granular y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es alta.

Tabla 7. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del módulo de la subbase granular

Módulo de la subbase granular, kg/cm <sup>2</sup>	Deflexión a 0 mm, D <sub>0</sub> mm	Deflexión a 300 mm, D <sub>1</sub> mm	Deflexión a 600 mm, D <sub>2</sub> mm	Deflexión a 900 mm, D <sub>3</sub> mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= (D <sub>0</sub> -D <sub>1</sub> ) mm	Índice de daño de la base, IDB=(D <sub>1</sub> -D <sub>2</sub> ) mm	Índice de la curvatura de la base, ICB=(D <sub>2</sub> -D <sub>3</sub> ) mm	Módulo equivalente, E <sub>p</sub> kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
500	0.891	0.693	0.528	0.409	630	0.198	0.165	0.119	2480	3.78
1000	0.794	0.610	0.474	0.379	631	0.184	0.136	0.095	2990	4.03
1500	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.20
2000	0.693	0.527	0.421	0.350	636	0.166	0.106	0.071	3760	4.34
2500	0.662	0.501	0.404	0.340	637	0.161	0.097	0.064	4070	4.46
3000	0.637	0.480	0.391	0.332	638	0.157	0.089	0.059	4360	4.56
3500	0.616	0.464	0.381	0.326	640	0.152	0.083	0.055	4620	4.65
4000	0.599	0.450	0.372	0.320	641	0.149	0.078	0.052	4860	4.73
4500	0.584	0.438	0.364	0.315	642	0.146	0.074	0.049	5080	4.80
5000	0.572	0.428	0.357	0.311	643	0.144	0.071	0.046	5280	4.87



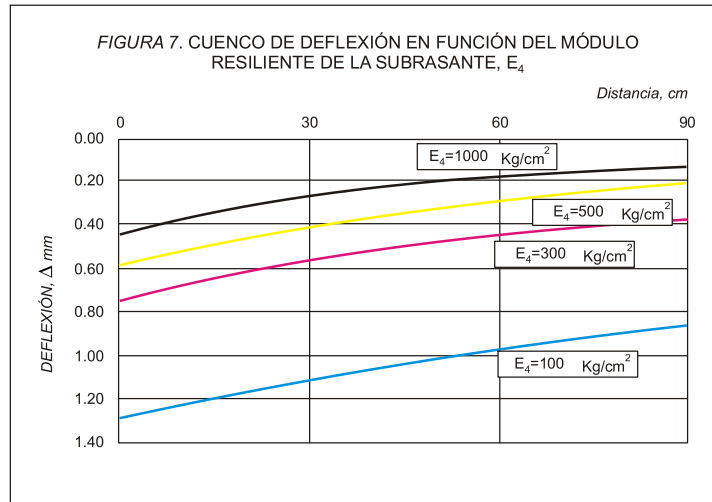
*D. Caracterización de cuencos de deflexión variando el módulo resiliente de la subrasante*

Del análisis de la tabla 8 y de la figura 7, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- A medida que se incrementa el valor del módulo resiliente de la subrasante se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 66.28%.
- La relación entre el módulo resiliente de la subrasante y el parámetro AREA es inversamente proporcional.
- La relación entre el módulo resiliente de la subrasante y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional, su tendencia es decreciente.
- La relación entre el módulo resiliente de la subrasante y el Módulo Equivalente del Pavimento -Ep- y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el módulo resiliente de la subrasante y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es alta. Para estructuras de pavimentos con baja resistencia de la subrasante se produce una gran deflexión tanto a nivel de la superficie del pavimento como de la subrasante, lo cual afecta directamente el comportamiento estructural y funcional de la estructura del pavimento, ya que son estructuras que se fatigan y se deforman en poco tiempo de servicio, debido a su debilidad en el soporte de la estructura y la alta deflexión que se produce ante la aplicación de las cargas generadas por el tránsito.

Tabla 8. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del módulo resiliente de la subrasante

Módulo resiliente de la subrasante, kg/cm <sup>2</sup>	Deflexión a 0 mm, Do mm	Deflexión a 300 mm, D1 mm	Deflexión a 600 mm, D2 mm	Deflexión a 900 mm, D3 mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= (Do-D1) mm	Índice de daño de la base, IDB=(D1-D2) mm	Índice de la curvatura de la base, ICB=(D2-D3) mm	Módulo equivalente, Ep kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
100	1.293	1.111	0.972	0.862	733	0.182	0.139	0.110	3020	4.04
200	0.894	0.717	0.591	0.499	673	0.177	0.126	0.092	3270	4.15
300	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.20
400	0.638	0.466	0.356	0.280	602	0.172	0.110	0.076	3570	4.27
500	0.577	0.406	0.298	0.231	576	0.171	0.108	0.067	3670	4.31
600	0.533	0.364	0.259	0.197	556	0.169	0.105	0.062	3760	4.34
700	0.499	0.332	0.230	0.171	539	0.167	0.102	0.059	3850	4.38
800	0.474	0.307	0.208	0.152	524	0.167	0.099	0.056	3900	4.40
900	0.453	0.287	0.189	0.136	510	0.166	0.098	0.053	3950	4.42
1000	0.435	0.270	0.175	0.124	500	0.165	0.095	0.051	4000	4.44



*E. Caracterización de cuencos de deflexión variando el espesor de la capa asfáltica*

Del análisis de la tabla 9 y de la figura 8, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtiene las siguientes conclusiones:

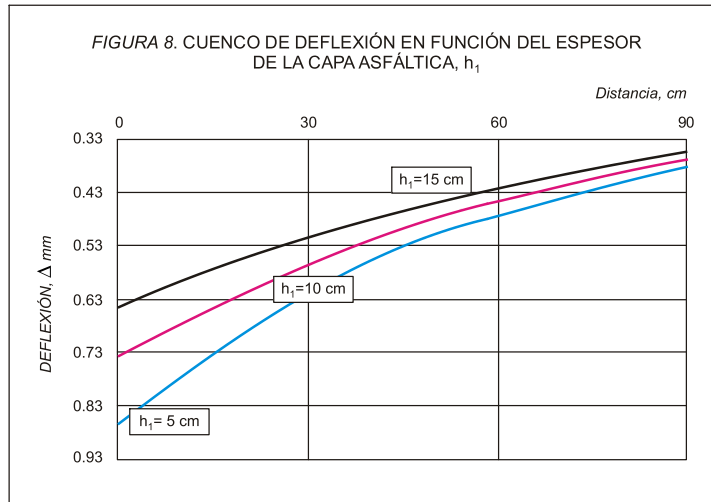
- A medida que se incrementa el valor del espesor de la capa asfáltica se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 69.99%.
- La relación entre el espesor de la capa asfáltica y el parámetro AREA es directamente proporcional,

lo cual demuestra el incremento de la rigidez de la capa asfáltica y, por supuesto, de la estructura del pavimento flexible.

- La relación entre el espesor de la capa asfáltica y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional; su tendencia es decreciente.
- La relación entre el espesor de la capa asfáltica y el Módulo Equivalente del Pavimento -Ep- y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el espesor de la capa asfáltica y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es media.

*Tabla 9. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del espesor de la capa asfáltica*

Espesor de la capa asfáltica, cm	Deflexión a 0 mm, Do mm	Deflexión a 300 mm, D1 mm	Deflexión a 600 mm, D2 mm	Deflexión a 900 mm, D3 mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= (Do-D1) mm	Índice de daño de la base, IDB=(D1-D2) mm	Índice de la curvatura de la base, ICB=(D2-D3) mm	Módulo equivalente, Ep kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
5	0.863	0.613	0.471	0.377	592	0.250	0.142	0.094	2770	3.62
6	0.835	0.601	0.465	0.374	600	0.234	0.136	0.091	2890	3.74
7	0.808	0.591	0.459	0.371	609	0.217	0.132	0.088	3020	3.85
8	0.782	0.581	0.453	0.368	617	0.201	0.128	0.085	3150	3.97
9	0.758	0.571	0.448	0.365	626	0.187	0.123	0.083	3270	4.08
10	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.20
11	0.714	0.551	0.438	0.359	641	0.163	0.113	0.079	3530	4.32
12	0.694	0.542	0.433	0.356	648	0.152	0.109	0.077	3660	4.44
13	0.675	0.532	0.428	0.354	655	0.143	0.104	0.074	3790	4.56
14	0.657	0.523	0.423	0.351	662	0.134	0.100	0.072	3910	4.67
15	0.640	0.513	0.418	0.348	668	0.127	0.095	0.070	4040	4.79



*F. Caracterización de cuencos de deflexión variando el espesor de la capa de base granular*

Del análisis de la tabla 10 y de la figura 9, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

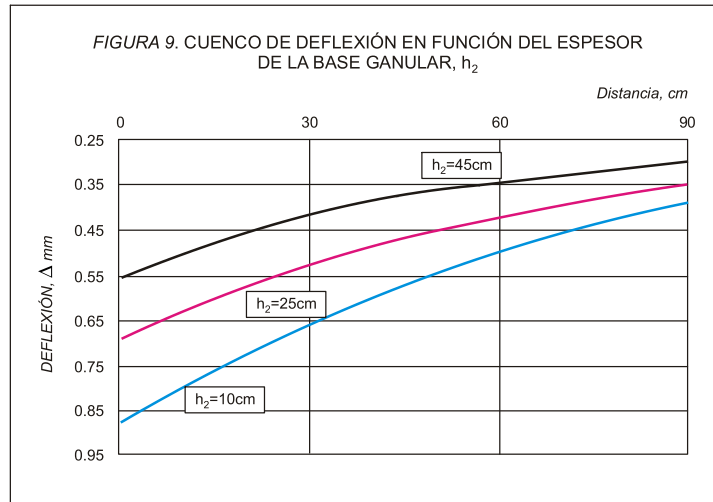
- A medida que se incrementa el valor del espesor de la capa de base granular se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 68.23%.
- La relación entre el espesor de la capa de base

granular y el parámetro AREA es directamente proporcional.

- La relación entre el espesor de la capa de base granular y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional; su tendencia es decreciente.
- La relación entre el espesor de la capa de base granular y el Módulo Equivalente del Pavimento - $E_p$ - y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el espesor de la capa de base granular y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es alta.

*Tabla 10. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del espesor de la base granular*

Espesor de la base granular, cm	Deflexión a 0 mm, $D_0$ mm	Deflexión a 300 mm, $D_1$ mm	Deflexión a 600 mm, $D_2$ mm	Deflexión a 900 mm, $D_3$ mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= $(D_0 - D_1)$ mm	Índice de daño de la base, IDB= $(D_1 - D_2)$ mm	Índice de la curvatura de la base, ICB= $(D_2 - D_3)$ mm	Módulo equivalente, $E_p$ kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
10	0.875	0.660	0.494	0.387	612	0.215	0.166	0.107	2910	3.37
15	0.791	0.607	0.468	0.375	629	0.184	0.139	0.093	3220	3.81
20	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.20
25	0.685	0.522	0.419	0.348	638	0.163	0.103	0.071	3610	4.62
30	0.644	0.488	0.397	0.335	640	0.156	0.091	0.062	3780	5.02
35	0.609	0.458	0.376	0.321	640	0.151	0.082	0.055	3940	5.44
40	0.580	0.433	0.358	0.309	640	0.147	0.075	0.049	4080	5.84
45	0.554	0.410	0.341	0.297	637	0.144	0.069	0.044	4210	6.25



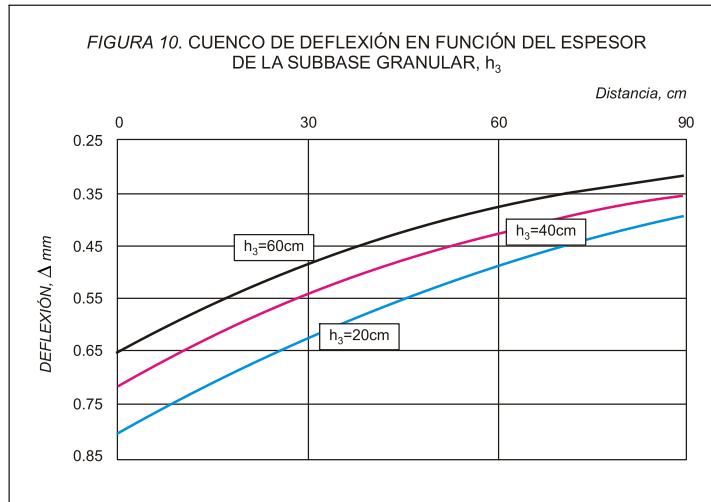
*G. Caracterización de cuencos de deflexión variando el espesor de la capa de subbase granular*

Del análisis de la tabla 11 y de la figura 10, para las estructuras de pavimento flexible estudiadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- A medida que se incrementa el valor del espesor de la capa de subbase granular se disminuye la deflexión total del modelo estructural y la deflexión a nivel de la subrasante; luego la tendencia es decreciente. La relación entre la deflexión de la subrasante y la deflexión en la superficie del pavimento es en promedio del 69.05%.
- La relación entre el espesor de la capa de subbase granular y el parámetro AREA es inversamente
- proporcional.
- La relación entre el espesor de la capa de subbase granular y el Índice de Curvatura Superficial -ICS-, el Índice de Daño de la Base -IDB- y el Índice de la Curvatura de la Base -ICB- es inversamente proporcional; su tendencia es decreciente.
- La relación entre el espesor de la capa de subbase granular y el Módulo Equivalente del Pavimento -Ep- es inversamente proporcional.
- La relación entre el espesor de la capa de subbase granular y el Número Estructural -SN- es directamente proporcional.
- La relación entre el espesor de la capa de subbase granular y el cuenco de deflexión es inversamente proporcional, pero su sensibilidad es media.

*Tabla 11. Caracterización de los cuencos de deflexión en función del espesor de la subbase granular*

Espesor de la subbase granular, cm	Deflexión a 0 mm, Do mm	Deflexión a 300 mm, D1 mm	Deflexión a 600 mm, D2 mm	Deflexión a 900 mm, D3 mm	AREA, mm	Índice de curvatura superficial, ICS= (Do-D1) mm	Índice de daño de la base, IDB=(D1-D2) mm	Índice de la curvatura de la base, ICB=(D2-D3) mm	Módulo equivalente, Ep kg/cm <sup>2</sup>	Número estructural, SN
20	0.810	0.628	0.491	0.392	637	0.182	0.137	0.099	3660	3.31
25	0.782	0.604	0.474	0.382	636	0.178	0.13	0.092	3550	3.61
30	0.757	0.581	0.458	0.372	635	0.176	0.123	0.086	3470	3.90
35	0.735	0.561	0.443	0.362	634	0.174	0.118	0.081	3400	4.20
40	0.715	0.543	0.428	0.352	631	0.172	0.115	0.076	3360	4.51
45	0.697	0.526	0.415	0.343	629	0.171	0.111	0.072	3330	4.81
50	0.681	0.511	0.403	0.334	626	0.170	0.108	0.069	3300	5.12
55	0.666	0.497	0.391	0.325	623	0.169	0.106	0.066	3290	5.43
60	0.652	0.484	0.381	0.317	621	0.168	0.103	0.064	3280	5.75



**H. Análisis del grado de sensibilidad de los parámetros de caracterización de los cuencos de deflexión**

cada parámetro de caracterización de los cuencos de deflexión.

Para determinar el grado de sensibilidad se consultaron diversos estudios realizados por Higuera [2] y se adoptó la siguiente escala de calificación, de acuerdo con la variabilidad o la proporción de variación de

El grado de sensibilidad de los parámetros para caracterizar los cuencos de deflexión de un pavimento flexible, para los modelos estructurales analizados, se indica en las tablas 13 y 14.

Tabla 12. Escala para definir el grado de sensibilidad

Grado de sensibilidad	Variación, %
Baja	< 15
Media	15 - 30
Alta	> 30

Tabla 13. Análisis del grado de sensibilidad de los parámetros de caracterización de los cuencos de deflexión ante una variación del módulo de las capas de una estructura de pavimento

Parámetro	Grado de sensibilidad			
	Módulo de la capa asfáltica, $E_1$	Módulos de la base granular, $E_2$	Módulo de la subbase granular, $E_3$	Módulo resiliente de la subrasante, $E_4$
Deflexión en la superficie, $T$	Baja	Media	Alta	Alta
Deflexión en la subrasante, $S$	Baja	Baja	Media	Alta
AREA	Baja	Media	Baja	Alta
Índice de curvatura superficial, ICS	Alta	Alta	Media	Baja
Índice de daño de la base, IDB	Baja	Alta	Alta	Alta
Índice de la curvatura de la base, ICB	Baja	Media	Alta	Alta
Módulo equivalente, $E_p$	Media	Alta	Alta	Alta
Número estructural, SN	Baja	Media	Media	Baja
Cuenco de deflexión	Baja	Media	Alta	Alta

Tabla 14. Análisis del grado de sensibilidad de los parámetros de caracterización de los cuencos de deflexión ante una variación del espesor de las capas de una estructura de pavimento

Parámetro	Grado de sensibilidad		
	Espesor de la capa asfáltica, $h_1$	Espesor de la base granular, $h_2$	Espesor de la subbase granular, $h_3$
Deflexión en la superficie, T	Media	Alta	Media
Deflexión en la subrasante, S	Media	Alta	Alta
AREA	Baja	Baja	Baja
Índice de curvatura superficial, ICS	Alta	Alta	Baja
Índice de daño de la base, IDB	Alta	Alta	Media
Índice de la curvatura de la base, ICB	Media	Alta	Alta
Módulo equivalente, $E_p$	Alta	Alta	Baja
Número estructural, SN	Alta	Alta	Alta
Cuenco de deflexión	Media	Alta	Media

Tabla 15. Clasificación del grado de sensibilidad de las variables de caracterización de los cuencos de deflexión ante un cambio de los módulos de las capas

Orden de sensibilidad	Parámetro de caracterización			
	Módulo de la capa asfáltica, $E_1$	Módulos de la base granular, $E_2$	Módulo de la subbase granular, $E_3$	Módulo resiliente de la subrasante, $E_4$
1	Índice de Curvatura Superficial	Módulo Equivalente	Módulo Equivalente	Deflexión de la subrasante
2	Módulo equivalente	Índice de Curvatura Superficial	Índice de la Curvatura de la Base	Deflexión total
3	Deflexión total	Índice de Daño de la Base	Índice de Daño de la Base	Índice de la Curvatura de la Base
4	Índice de la Curvatura de la Base	Deflexión total	Deflexión total	Número estructural
5	Índice de Daño de la Base	Índice de la Curvatura de la Base	Número estructural	AREA
6	Deflexión de la subrasante	Número estructural	Deflexión de la subrasante	Índice de Daño de la Base
7	Número estructural	AREA	Índice de Curvatura Superficial	Número estructural
8	AREA	Deflexión de la subrasante	AREA	Índice de Curvatura Superficial

Tabla 16. Clasificación del grado de sensibilidad de las variables de caracterización de los cuencos de deflexión ante un cambio de los espesores de las capas

Orden de sensibilidad	Parámetro de caracterización		
	Espesor de la capa asfáltica, $h_1$	Espesor de la base granular, $h_2$	Espesor de la subbase granular, $h_3$
1	Índice de Curvatura Superficial	Número estructural	Número estructural
2	Módulo equivalente	Índice de la Curvatura de la Base	Deflexión de la subrasante
3	Número estructural	Índice de Daño de la Base	Índice de la Curvatura de la Base
4	Índice de Daño de la Base	Módulo equivalente	Índice de Daño de la Base
5	Deflexión Total	Deflexión de la subrasante	Deflexión Total
6	Índice de la Curvatura de la Base	Deflexión Total	Módulo equivalente
7	Deflexión de la subrasante	Índice de Curvatura Superficial	Índice de Curvatura Superficial
8	AREA	AREA	AREA



## Agradecimientos

El autor agradece a la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería y a la División de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por el apoyo dado para la realización de la presente investigación, registrada con el número SGI-706; así mismo, a los integrantes del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial -Grinfravial-, por su apoyo y asesoría en la elaboración del presente artículo.

## Referencias

- [1] M. Salgado Torres y otros. *Posibles factores que inciden en el valor de las mediciones de deflexión de un pavimento*. Simposio de Ingeniería de Pavimentos. Universidad del Cauca. Popayán. 2002.
- [2] C. H. Higuera Sandoval. *Mecánica de pavimentos - Principios básicos*. Escuela de Transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. ISBN 978-958-660-122-1. 2008. 361 p.
- [3] Y. H. Huang. *Pavement Analysis and Design*. Segunda edición. 2004. 775 p.
- [4] Instituto Nacional de Vías -INVIAS-. *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos*. Bogotá, 2008. 570 p.
- [5] C. H. Higuera Sandoval. *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras*. Volúmenes I y II. Escuela de Transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2008. 400 p.
- [6] C. H. Higuera Sandoval. *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimento*. Guías de clase. Escuela de Transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2008. 435 p.

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2008  
Fecha de aprobación: 24 de octubre de 2008