

# Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto

## Subgrade resistance's characterization, using the impact deflectometer's information

Fecha de recepción: 27 de julio de 2009

Fecha de aprobación: 16 de noviembre de 2009

Carlos Hernando Higuera Sandoval\*

### Resumen

El artículo recopila las diferentes metodologías para caracterizar la resistencia de la subrasante y la capacidad estructural efectiva de una estructura de pavimento con la información del deflectómetro de impacto. Este documento es producto del proyecto de investigación titulado Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto, registrado en la Dirección de Investigaciones de la Uptc con el código SGI-759, 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:** Módulo resiliente, Cuencos de deflexión, Diseño de pavimentos, Deflectómetro de impacto.

### Abstract

It compiles the different methodologies used to characterize the subgrade's resistance and the effective structural capacity, utilizing the impact deflectometer's information, to be applied in the pavements structures' design and rehabilitation. This article is based upon an investigation project's result, named "Deflexion bowls' characterization in structures of flexible pavements", registered at the University Investigation Division, with the code SGI-759, that the author carried out at the School of Transport and Roads, a branch of the Engineering School of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, in the Research and Development Group in Vial Infrastructure –Grinfravial–.

**Key words:** Subgrade module, Deflexion, Deflexion Bowls, Pavement Design, Impact Deflectometer.

\* 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

## I. INTRODUCCIÓN

Con la información de deflexiones obtenida por medio del deflectómetro de impacto se puede determinar, con fines de seguimiento, la capacidad estructural de un modelo estructural de pavimento en cualquier momento de su vida de servicio, y conocer su desempeño, así como establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación. Esto es posible mediante procesos de retrocálculo, con los cuales, si se emplea la metodología propuesta por AASHTO 1993, se obtienen parámetros conocidos como el Módulo Resiliente de la Subrasante (Mr), el Módulo Equivalente del Pavimento (Ep) y el Número Estructural Efectivo (SN).

La capacidad estructural de un pavimento en servicio se puede determinar mediante pruebas “no destructivas”, que se basan en la interpretación del cuenco de deflexiones generado por el impacto de una carga estándar, y con la técnica denominada del retrocálculo se pueden determinar los módulos de elasticidad de las diferentes capas que componen el modelo estructural de un pavimento en servicio.

Para determinar la resistencia de la subrasante y la capacidad estructural de una estructura de pavimento, con la información del deflectómetro de impacto, se presentan las siguientes metodologías: Método AASHTO 1993, Modelo de Hogg, Método de Lukanen, Método de Yonapave, Método de Hogg modificado, Método de las ecuaciones de regresión del Departamento de Transporte del Estado de Washington, Ecuaciones de Darter y Método de Rohde.

El módulo resiliente de retrocálculo de una subrasante, obtenido por medio del cuenco de deflexión, resulta mayor que el módulo resiliente de laboratorio, por lo tanto, se requiere definir el factor de ajuste (C). En el numeral V se presenta una revisión bibliográfica de las metodologías que se han desarrollado en Latinoamérica y Estados Unidos en la determinación del factor de ajuste, que depende de cada suelo típico de una zona, de una región o de un país.

## II. CONCEPTOS BÁSICOS

Algunos conceptos básicos para definir la caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto son los siguientes:

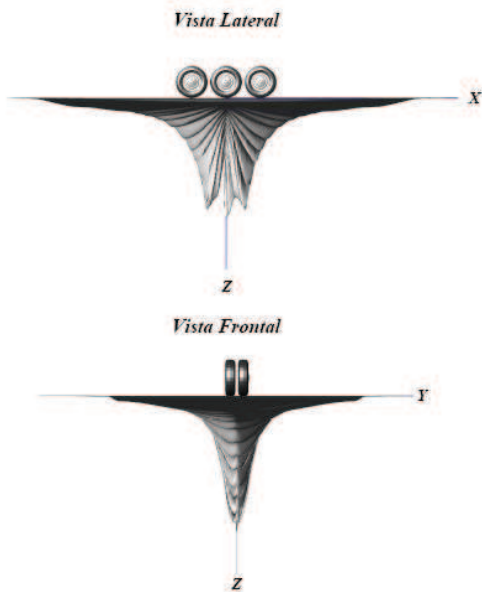
### A. Concepto de deflexión

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 [1]. Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, 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 (ver figura 1).

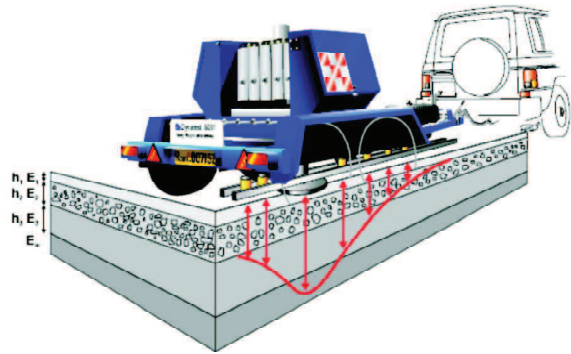
La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que si la deflexión es alta en un modelo estructural, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente, y lo contrario, si la deflexión es baja, quiere decir que el modelo estructural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

### B. Fundamentos del deflectómetro de impacto

El deflectómetro de impacto genera un cuenco de deflexión, y la caracterización del cuenco determina una serie de parámetros que permiten calcular la capacidad de la subrasante de una estructura de pavimento. Los ensayos de impacto son muy utilizados para determinar la resistencia de la subrasante con el equipo denominado deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer –FWD–); dado que son *no destructivos*, constituyen una tecnología muy valiosa y rápida, que cuando se aplica adecuadamente provee una vasta información a muy razonables costos y tiempo (ver figura 2).



Fuente: C.H. Higuera [2]



Fuente: Presentación Simproma Argentina S. A.

Figura 1. Esquema de un cuenco de deflexión



Fuente: C.H. Higuera [2]



Fuente: Presentación Simproma Argentina S. A.

Figura 2. Deflectómetro de impacto. Fuente: Internet\Falling Weight Deflectometer

Este método involucra una evaluación directa de la resistencia de la subrasante y el pavimento existente. En pavimentos flexibles se utiliza para determinar el módulo resiliente de la subrasante, mientras que para pavimentos rígidos se utiliza para determinar la transferencia de carga en juntas y fisuras, estimar el módulo de reacción efectivo de la subrasante y el módulo de elasticidad del concreto.

El deflectómetro de impacto se fundamenta en la generación de una onda de carga en el pavimento o sobre la capa por estudiar. La onda es ocasionada por el impacto de la caída de una masa, y es transmitida al pavimento por medio de un sistema de amortiguadores elásticos apoyados sobre una placa de carga (ver figura 3).

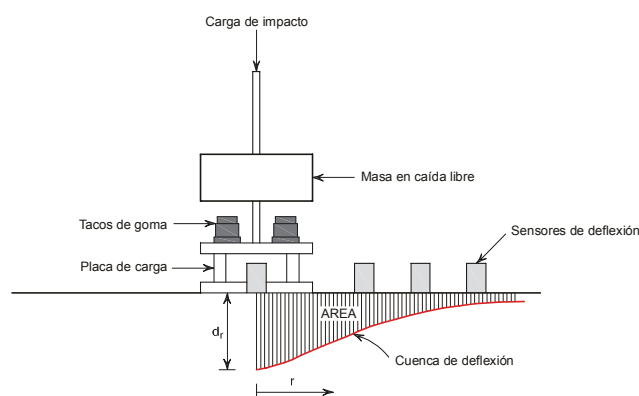


Figura 3. Esquema de funcionamiento del deflectómetro de impacto.

Fuente: Internet\Falling Weight Deflectometer

Tanto la masa como su altura de caída y el sistema de amortiguadores elásticos pueden ser variados, para generar el impacto deseado en el pavimento o en la subrasante por evaluar.

Los sensores, generalmente, se localizan a una distancia “ $r$ ” de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cm, medida entre el eje de carga del sistema y el sitio de ubicación de cada sensor.

La deflexión “ $d_r$ ” registrada por un sensor ubicado a una distancia “ $r$ ” del eje de carga es debida a la deformación de la porción del pavimento que se encuentra dentro de la zona de tensión generada por el impacto sobre el pavimento o la subrasante.

Conocida la carga, la relación de Poisson de la subrasante, el diámetro del plato de carga y la deflexión, se puede calcular el valor del módulo resiliente de la subrasante en pavimentos flexibles y el módulo de reacción de la subrasante en pavimentos rígidos, así como el de las distintas capas de una estructura del pavimento, mediante el procedimiento conocido como retrocálculo o cálculo inverso.

### III. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE CON LA INFORMACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

A continuación se presentan las metodologías y los parámetros que se obtienen a partir de la evaluación

deflectométrica con FWD, los cuales son la base para establecer la condición estructural de un pavimento.

#### A. Método AASHTO 1993

##### 1) Módulo resiliente de la subrasante [2]

El método simplificado para estimar el módulo resiliente de la subrasante a partir de deflexiones medidas en la superficie de pavimentos por capas fue propuesto por Ullidtz (1977; 1987), y está basado en los siguientes supuestos, para una estructura elástica multicapas:

- Como la distancia desde la carga se incrementa, la compresión de las capas arriba de la subrasante llega a ser menos significativa de ser medida en la superficie del pavimento.
- Como la distancia desde la carga se incrementa, la aproximación de una carga distribuida por un punto de carga mejora.

La primera observación significa que a una distancia radial suficiente desde la carga aplicada, la deflexión medida en la superficie del pavimento es influenciada mayormente por la deflexión en la parte superior de la subrasante. De esta manera, la deflexión medida depende enteramente de las propiedades elásticas de la subrasante, sin tomar en cuenta el número, espesor y propiedades elásticas de las capas superiores.

La segunda observación es consecuencia de una comparación de deflexiones que resultan de una carga circular distribuida precedida, usando el programa BISAR 3.0 de la Shell, de capas elásticas a varias distancias radiales en la estructura multicapas, a deflexiones predichas a las mismas distancias usando la ecuación de Boussinesq para un sistema de una sola capa.

Con estas observaciones se determinó que el módulo resiliente de la subrasante puede ser obtenido por retrocálculo con las deflexiones medidas en el deflectómetro de impacto, para el sensor ubicado a 180 cm del eje de carga, utilizando la siguiente expresión:

$$M_{rr} = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi d_r r} \quad (1)$$

Donde:

- $M_{rr}$ :** Módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante (MPa o lb/pulg<sup>2</sup>)
- $P$ :** Carga aplicada en el impacto (kN o libras)
- $\mu$ :** Relación de Poisson de la subrasante
- $d_r$ :** Deflexión registrada a la distancia  $r$  medida desde el centro de carga (centímetros o pulgadas)
- $r$ :** Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado (centímetros o pulgadas)

Asumiendo una relación de Poisson de 0.5, el módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante se determina como:

$$M_{rr} = \frac{0.24 P}{d_r r} \quad (2)$$

Para propósitos prácticos, la deflexión usada en estas ecuaciones debería ser la más cercana posible a la del plato de carga. De todas maneras, la distancia debe también ser suficientemente lejana desde el plato de carga para satisfacer las consideraciones asumidas.

El siguiente análisis fue desarrollado para determinar la mínima distancia radial “ $r$ ” a la cual las deflexiones pueden ser medidas sin introducir un error en el módulo resiliente determinado por retrocálculo.

$$a_e = \sqrt{a^2 + D^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}}} \quad (3)$$

Donde:

- $a_e$ :** Radio del bulbo de tensión en la interfase pavimento-subrasante (pulgadas)
- $a$ :** Radio del plato de carga (pulgadas)
- $D$ :** Espesor total del pavimento por encima de la subrasante (pulgadas)
- $E_p$ :** Módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (lb/pulg<sup>2</sup>), definido como:

$$E_p = 1.5 q a \left[ \frac{1}{M_{rr} \sqrt{1 + \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}}}} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}}}} \right] \right] \quad (4)$$

Donde:

- $\Delta_o$ :** Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (pulgadas)
- $q$ :** Presión de la placa de carga (lb/pulg<sup>2</sup>)

De acuerdo con lo propuesto por AASHTO en la *Guía de diseño para estructuras de pavimento* (1993), la deflexión empleada para retrocalcular el módulo de la subrasante debe ser medida lo suficientemente lejos, de tal modo que provea un buen estimativo del módulo resiliente de la subrasante, independientemente de los efectos de cualquiera de las capas por encima de esta; pero también debe estar lo suficientemente cerca, de tal modo que no sea muy pequeña e impida una medición precisa. La mínima distancia debe determinarse siguiendo la siguiente relación:

$$r = 0.7 a_e \quad (5)$$

Determinar el módulo resiliente de diseño con retrocálculo, a partir de ensayos no destructivos, requiere del factor de ajuste **C**, para hacerlo consistente con el valor que representa la subrasante. Un valor de 0.33 es recomendado para el factor de ajuste **C**; con este, entonces, se ajustan los valores del módulo resiliente obtenidos por retrocálculo a los valores del módulo resiliente real de la subrasante.

La ecuación resultante para determinar el módulo resiliente o de diseño de la subrasante es:

$$M_r = C \frac{0.24 P}{d_r r} \quad \text{o} \quad M_r = C \cdot M_{rr} \quad (6)$$

Donde:

**P:** Carga aplicada (libras)

**Mr:** Módulo resiliente de la subrasante (lb/pulg<sup>2</sup>)

**Mrr:** Módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante (lb/pulg<sup>2</sup>)

**C:** Factor de ajuste (0.33) [3]

### Número estructural efectivo del pavimento, SNef [3]

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 (7).

$$SNef = 0.0045D \sqrt[3]{Ep} \quad (7)$$

Donde:

**SNef:** Número estructural efectivo de la estructura de referencia

**D:** Espesor total del pavimento (pulgadas)

**Ep:** Módulo efectivo del pavimento (lb/pulg<sup>2</sup>)

### 2) Módulo de reacción de la subrasante (K) a partir de medidas de deflexión

El módulo de reacción estático efectivo debajo de la losa de pavimento rígido se requiere, entre otros, para el diseño de pavimentos rígidos y de capas de refuerzo para pavimentos rígidos que estén fracturados. Los métodos disponibles para determinar el K incluyen lo siguiente:

- Retrocálculo del módulo de reacción dinámico efectivo del cuenco de deflexión y la división por 2 para obtener el módulo de reacción estático efectivo.
- Desempeño del ensayo del plato de carga luego de la remoción de la losa.
- Estimación desde datos de suelos, tipo de base y espesor, utilizando nomogramas.

El módulo K obtenido por retrocálculo es recomendado para ser usado en el diseño de pavimentos y refuerzos rígidos por la guía de diseño de estructuras de pavimento de la AASHTO.

El procedimiento recomendado para el retrocálculo del módulo K efectivo de ensayos no destructivos está basado en el concepto de AREA, que fue originalmente propuesto por Hoffman y Thompson (1981). La propuesta consistió en calcular el AREA con la siguiente expresión, que caracteriza el cuenco de deflexión:

- **Cálculo del parámetro Area en pulgadas:**

$$AREA = \frac{6(D_0 - 2D_1 - 2D_2 - D_3)}{D_0} \quad (8a)$$

- **Cálculo del parámetro Area en milímetros:**

$$AREA = \frac{150(D_0 - 2D_1 - 2D_2 - D_3)}{D_0} \quad (8b)$$

Donde:

**D<sub>0</sub>:** Deflexión máxima bajo el centro de carga (mm)

**D<sub>1</sub>:** Deflexión a 300 mm

**D<sub>2</sub>:** Deflexión a 600 mm

**D<sub>3</sub>:** Deflexión a 900 mm



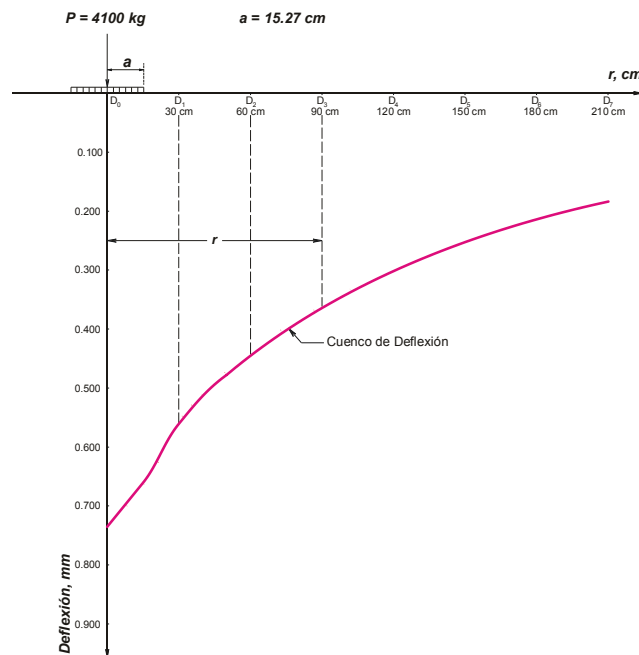


Figura 4. Esquema de un cuenco de deflexión obtenido con el deflectómetro de impacto

Ioannides (1990) y Barenberg y Petros (1991) [3] aplicaron el concepto de AREA al retrocálculo del módulo elástico de losas de pavimento rígido y de los valores de módulo K. La solución presentada está basada en el hecho de que, para un radio de carga dado y una posición determinada de los sensores, existe una única relación entre AREA y el radio rigidez relativa en el sistema del pavimento.

El radio de rigidez relativa se calcula en función del módulo K con la siguiente expresión:

$$I = \sqrt[4]{\frac{EcD^3}{12(1-\mu_c^2)K}} \quad (9)$$

Donde:

**I:** Radio de rigidez relativa (pulgadas)

**Ec:** Módulo de elasticidad del concreto (lb/pulg<sup>2</sup>)

**D:** Espesor de la losa de concreto (pulgadas)

$\mu_c$ : Relación de Poisson del concreto

**K:** Módulo de reacción efectivo de la subrasante (lb/pulg<sup>3</sup>)

Para un plato de carga de 150 mm (5.9 pulg) de radio,

la relación entre AREA y el radio de rigidez relativa se determina mediante la siguiente expresión, obtenida por Hall, 1991 (citado por Huang [3]).

$$\rho \left[ \frac{\ln \frac{36 \text{ AREA}}{1812.279133}}{2.559340} \right]^{4.3870009} \quad (10)$$

Donde:

$\rho$ : Radio de rigidez relativa (pulgadas)

**AREA:** Parámetro AREA (pulgadas)

Con AREA calculado con las deflexiones medidas del deflectómetro de impacto y el radio de rigidez relativa, el módulo K efectivo puede obtenerse de la ecuación de deflexiones de Westergard (1939) [3]:

$$K_r = \frac{P}{8D_0\rho^2} \left[ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{a}{2\rho} - 0.5772156649 - 1.25 \right] \frac{a}{\rho} \right]^2 \quad (11)$$

Donde:

**Kr:** Módulo de reacción de la subrasante por retrocálculo (lb/pulg<sup>3</sup>)

- $D_0$ :** Deflexión máxima en el centro de la placa de carga (pulgadas)
- $P$ :** Carga aplicada en el impacto (libras)
- $a$ :** Radio del plato de carga (pulgadas)
- $\rho$ :** Radio de rigidez relativa (pulgadas)

El módulo  $K_r$  obtenido por retrocálculo de ensayos de deflexión no destructivos es el módulo  $K$  dinámico. Estudios realizados en el AASHTO Road Test demostraron que los valores del módulo  $K$  obtenidos por retrocálculo excedían en 1.77 en promedio los módulos dinámicos, mientras que en 1985 Foxworthy analizó los datos recolectados de diferentes pruebas y determinó que los valores de los módulos dinámicos excedieron los estáticos por un factor de 2.3 en promedio. Entonces, reduciendo estos valores por 2 se encontraron módulos  $K$  racionales.

De esta manera, y como se recomienda en la Guía AASHTO, los valores del módulo  $K$  obtenidos por retrocálculo deben ser divididos por 2 para obtener los módulos de diseño.

$$K_{\text{estático}} = \frac{K_r}{2} \quad (12)$$

Donde:

- $K_{\text{estático}}$ :** Módulo de reacción estático o de diseño de la subrasante (lb/pulg<sup>3</sup>)
- $K_r$ :** Módulo de reacción de la subrasante por retrocálculo (lb/pulg<sup>3</sup>)

El módulo de elasticidad del concreto se determina así:

$$E = \frac{PCC}{D^3} \quad (13)$$

Donde:

- $E$ :** Módulo de elasticidad del concreto (lb/pulg<sup>2</sup>)
- $D$ :** Espesor de la losa de concreto (pulgadas)
- $PCC$ :** Factor del concreto de cemento Portland (lb-pulg)

#### B. Modelo de Hogg [4]

En 1944, A. H. A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que lleva su nombre. El modelo de Hogg está basado en un sistema hipotético de dos capas: una delgada, con cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, y otra elástica, homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa, que le sirve de sustento. La figura 5 describe la geometría del modelo de Hogg.

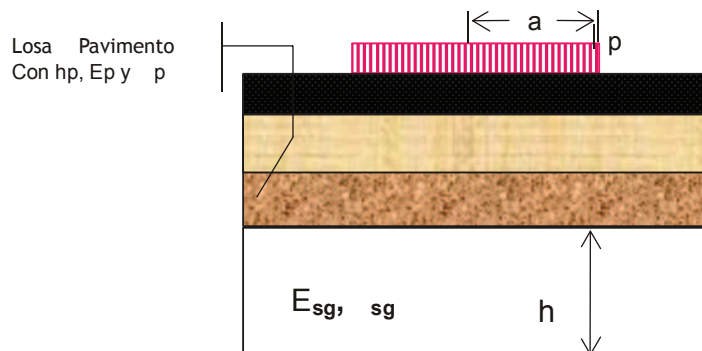


Figura 5. Geometría del modelo de Hogg

Fuente: elaboración propia a partir del artículo de Hoffman "Descripción del modelo de Hogg".



**Parámetros del modelo de Hogg.** A continuación se describen los parámetros básicos del modelo de Hogg.

- **Rigidez a la flexión de la losa**

$$D = \frac{E_p \cdot h_p^3}{12 \cdot (1 - \mu_p)} \quad (14)$$

Donde:

- D: Rigidez a la flexión de la losa (pavimento), en kg/cm
- $E_p$ : Módulo de elasticidad de la losa (pavimento), en kg/cm<sup>2</sup>
- $h_p$ : Espesor de la losa (pavimento), en cm
- $\mu_p$ : Coeficiente de Poisson de la losa (pavimento)

- **Longitud característica**

$$l_0 = \sqrt[3]{\frac{D \cdot (1 + \mu_{sg}) \cdot (3 - 4 \cdot \mu_{sg})}{E_{sg} \cdot 2 \cdot (1 - \mu_{sg})}} \quad (15)$$

Donde:

- $l_0$ : Longitud característica, en cm
- D: Rigidez a la flexión de la losa (pavimento), en kg-cm
- $\mu_{sg}$ : Coeficiente de Poisson de la subrasante
- $E_{sg}$ : Módulo equivalente de la subrasante, en kg/cm<sup>2</sup>

**Deflexiones en el modelo de Hogg.** El procedimiento con el modelo de Hogg usa la deflexión en el centro de la carga puntual y una de las deflexiones adicionales fuera del punto inicial de aplicación de la carga. Hogg demostró que la distancia radial donde la deflexión es aproximadamente la mitad de la deflexión bajo el punto inicial de carga era eficaz para eliminar la tendencia de valoración o error estadístico de los parámetros básicos del modelo. Sus cálculos consideran variaciones en el espesor del pavimento y la relación entre la rigidez del pavimento y la rigidez de la subrasante, ya que la distancia en donde la deflexión es la mitad de la desviación máxima está controlada por estos parámetros.

Tal como se describe, en 1944 Hogg presentó el

análisis de una losa de espesor delgado apoyada sobre una fundación elástica de espesor finito o infinito; posteriormente, en 1977, G. Wiseman presentó las soluciones numéricas y la adaptación del modelo para cargas distribuidas, demostrando así la utilidad del modelo para la evaluación estructural de pavimentos, y M. Hoffman amplió la solución para el cálculo de cuencos de deflexiones con cargas de cualquier forma y a diferentes distancias del eje de carga. Con base en estas premisas, a continuación se describen las metodologías de Lukanen, Yonapave y FHWA, basadas en el modelo de Hogg:

*C. Método de Lukanen [4]*

La evaluación estructural mediante el método de Lukanen utiliza variaciones del modelo de Hogg, desarrolladas por Wiseman. Para la evaluación del módulo de la subrasante, los valores de módulo son convertidos a valores de resistencia Hveen (Valor R), mediante relaciones obtenidas en investigaciones llevadas a cabo por el Departamento de Transportes de Washington, y con la aplicación de expresiones determinadas en estudios efectuados en Chile se determina el Número Estructural del Pavimento.

**Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central.** El modelo de Hogg, adaptado por Wiseman, utiliza la distancia radial al punto del cuenco de deflexiones, donde la deflexión es el 50% de la deflexión en el centro del plato de carga; esta distancia, denominada  $r_{50}$ , hace referencia a la rigidez del pavimento sobre la subrasante y a la profundidad de la capa rígida, de la misma manera que el parámetro AREA (YONAPAVE) lo hace. Pavimentos con elevados valores del parámetro AREA tendrán elevados valores del parámetro  $r_{50}$ ; de igual forma, pavimentos con bajos valores del parámetro AREA tendrán bajos valores del parámetro  $r_{50}$ . Las expresiones que se emplean para el cálculo son las siguientes:

$$r_{50} = r \frac{A^c - B}{\left[ A \cdot \left\{ \frac{d_0}{d_r} - 1 \right\}^c - B \right]} \quad (16)$$

Donde:

- $r_{50}$ : Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central, en cm

- r: Distancia a la cual se mide la deflexión  $d_r$ , en cm  
 $d_0$ : Deflexión central, en  $\mu\text{m}$   
 $d_r$ : Deflexión medida a la distancia r, en  $\mu\text{m}$   
A, B, C: Coeficientes de correlación (ver tabla 1)

**Longitud característica.** Se determina mediante la siguiente expresión:

$$l_0 = \frac{Y \cdot r_{50} + \sqrt{(Y \cdot r_{50})^2 - 4 \cdot a \cdot X \cdot r_{50}}}{2} \quad (17)$$

Donde:

- $l_0$ : Longitud característica, en cm  
a: Radio del plato de carga, en cm  
 $r_{50}$ : Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central, en cm  
X, Y: Coeficientes de correlación (ver tabla 1)

**Módulo de la subrasante.** El primer paso para determinar el módulo de la subrasante consiste en calcular la relación teórica entre la rigidez por carga puntual y la rigidez por carga distribuida sobre un AREA, para un cociente dado del valor  $a/l_0$ . La rigidez del pavimento se define como la relación entre la carga y la deflexión.

$$S = \frac{P}{d_0} \quad (18)$$

Donde:

- S: Rigidez del pavimento, en  $\text{kg}/\mu\text{m}$   
P: Carga aplicada, en kg  
 $d_0$ : Deflexión central, en  $\mu\text{m}$

La relación teórica entre las rigideces se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - M \cdot \left( \frac{a}{l_0} - 0.20 \right) \quad (19)$$

Donde:

- $S_0$ : Rigidez teórica por carga puntual, en  $\text{kg}/\mu\text{m}$   
S: Rigidez del pavimento, en  $\text{kg}/\mu\text{m}$   
 $l_0$ : Longitud característica, en cm  
a: Radio del plato de carga, en cm  
M: Coeficiente para relación de rigideces (ver tabla 1)

Una vez determinados los parámetros anteriores, el módulo de la subrasante se determina así:

$$M_{rr} = \left[ \frac{K \cdot I \cdot P}{l_0 \cdot d_0} \right] \cdot \frac{S_0}{S} \quad (20)$$

Donde:

- $M_{rr}$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$   
P: Carga aplicada, en kg  
 $d_0$ : Deflexión central, en cm  
 $l_0$ : Longitud característica, en cm  
 $S_0/S$ : Relación de rigideces  
K: Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson (ver tabla 1)  
I: Factor de influencia (ver tabla 1)

Wiseman describió la implementación del modelo de Hogg describiendo tres casos: uno para una fundación infinita elástica, y los otros dos para un estrato finito elástico con un espesor efectivo que se asume aproximadamente igual a diez veces la longitud característica. Los dos casos de espesor finito corresponden a coeficientes de Poisson fijados en 0.4 y 0.5, respectivamente; los coeficientes para la determinación de los parámetros en el modelo de Hogg, para estos dos casos, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Coeficientes para el modelo de Hogg

Profundidad del estrato rígido ( $h_0/l_0$ ) = 10										
Caso	$\mu$	$D_r/D_0$	A	B	C	X	Y	M	I	K
I	0.5	> 0.7	2.46	0	0.5920	0.183	0.620	0.52	0.1614	1.500
		< 0.7	371.10	2	0.2190	0.183	0.620	0.52	0.1614	1.500
II	0.4	> 0.426	2.629	0	0.5480	0.192	0.602	0.48	0.1689	1.633
		< 0.426	2283.4	3	0.2004	0.192	0.602	0.48	0.1689	1.633

Fuente: E. A. Guzmán Suárez. Evaluación estructural de pavimentos flexibles a partir de información tomada con deflectómetro de impacto. Congreso de Pavimentos. Medellín. 2009.

**Número Estructural Efectivo.** Con el fin de hacer comparable la valoración de la capacidad estructural del pavimento, se utiliza una expresión que permita estimar el Número Estructural Efectivo a partir de parámetros del retrocálculo. La expresión de cálculo es la siguiente:

$$SN = \frac{2747.5}{d_0^{0.40647786} \cdot K^{0.19848453}} \quad (21)$$

Donde:

SN: Número estructural efectivo

$d_0$ : Deflexión en el centro, en mm/1000

K: Módulo de reacción de la subrasante, en MPa/m

El valor del módulo de reacción de la subrasante, según el modelo de pavimento rígido (Modelo Hogg), se determina con la siguiente ecuación:

$$K = 1.17 + 63\sqrt{R} \quad (22)$$

Donde:

K: Módulo de reacción de la subrasante, en MPa/m

R: Valor de resistencia de Hveen R de la subrasante

Para determinar el valor de resistencia Hveen (valor R de la subrasante), el método se apoya en la siguiente expresión, desarrollada en la investigación 183, llevada a cabo por el Departamento de Transporte de Washington.

$$R = [0.41 + 0.873 \cdot Mr] \quad (23)$$

Donde:

R: Valor de resistencia de Hveen R de la subrasante

Mr: Módulo resiliente de la subrasante, en KSI

#### D. Método de YONAPAVE [4]

El método YONAPAVE utiliza la base de las relaciones del modelo Hogg, junto con el programa Modulus, para generar curvas con las cuales se pueden inferir los valores de módulo, basados en las características de un cuenco de deflexión individual.

#### 1) AREA del cuenco de deflexiones

Se ha determinado que la mayor coincidencia entre los módulos determinados con YONAPAVE y el programa Modulus se obtiene cuando la profundidad de la capa rígida, es decir, el valor de  $(h/l_0)$ , es determinada en función del AREA del cuenco de deflexiones. El parámetro AREA fue desarrollado por Hoffman como parte de su tesis de maestría en el Instituto Tecnológico de Israel, e incorporado en el Método AASHTO en 1981, mientras trabajaba en su doctorado en la Universidad de Illinois con el profesor M. Thompson; se determina mediante la siguiente expresión:

$$AREA = 6 \cdot \left[ \frac{D_0 + 2D_{300} + 2D_{600} + 2D_{900}}{D_0} \right] \quad (24)$$

Donde:

AREA: Area del cuenco de deflexiones, en pulgadas

$D_0, D_{300}, D_{600}$  y  $D_{900}$ : Deflexiones en milímetros del FWD para una distancia r de 0, 30, 60, 90 cm

#### 2) Longitud característica

YONAPAVE sugiere que la relación entre la profundidad real a la base o capa rígida (h) y la longitud característica ( $l_0$ ) está relacionada con el AREA del cuenco de deflexiones mediante la siguiente expresión.

$$l_0 = A \cdot e^{B \cdot AREA} \quad (25)$$

Donde:

$l_0$ : Longitud característica del cuenco de deflexión, en cm

A, B: Coeficientes de ajuste de curvas (ver tabla 2)

h: Profundidad real a la base o a la capa rígida, en cm

Tabla 2. Coeficientes de ajuste de curvas para determinar la longitud característica

Rango de valores del AREA, Pulgadas	$h/l_0$	A	B
Mayor o igual a 23	5	3.275	0.1039
Mayor o igual a 21 y menor que 23	10	3.691	0.0948
Mayor o igual a 19 y menor de 21	20	2.800	0.1044
Menor de 19	40	2.371	0.1096

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. INVIAS, Bogotá. 2008, p. 231.

### 3) Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante

Con base en la longitud característica, el módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante (Mrr) puede determinarse en función de la presión del plato de carga, la deflexión central y un conjunto adicional de coeficientes de ajuste de curvas que se encuentran en la tabla 3, usando una expresión de la forma:

$$M_{rr} = m \cdot \frac{P}{d_0} \cdot l_0^n \quad (26)$$

Donde:

Mrr: Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante, en MPa

P: Presión del plato de carga del FWD, en kPa

$d_0$ : Deflexión máxima bajo el plato de carga, en 0,001 mm

$l_0$ : Longitud característica del cuenco de deflexión, en cm

m, n: Coeficientes de ajustes de curvas (ver tabla 3)

Tabla 3. Coeficientes de ajuste de curvas para determinar el módulo equivalente de la subrasante

Rango de valores del AREA, pulgadas	$h/l_0$	m	n
Mayor o igual a 23	5	926.9	-0.8595
Mayor o igual a 21 y menor que 23	10	1152.1	-0.8782
Mayor o igual a 19 y menor de 21	20	1277.6	-0.8867
Menor de 19	40	1344.2	-0.8945

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. INVIAS, Bogotá. 2008, p. 231.

### 4) Número Estructural Efectivo

Una vez que los valores de la longitud característica y el módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante son conocidos, es posible calcular el Número Estructural Efectivo mediante la siguiente expresión:

$$SN_{\text{Efectivo}} = 2 \left[ 0.0182 \cdot l_0 \sqrt[3]{M_{rr}} \right] - 0.5 \quad (27)$$

Donde:

$SN_{\text{Efectivo}}$ : Número estructural efectivo

$l_0$ : Longitud característica, en cm

Mrr: Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante, en MPa

### E. Método de la Federal Highway Administration - FHWA-RD-05-152 o Método de HOGG modificado [5]

En este método se emplea la deflexión máxima y una adicional, de las medidas con el FWD, a una distancia tal que el valor de deflexión correspondiente sea aproximadamente igual a la mitad del máximo. La ecuación para determinar el módulo de la subrasante es:

$$M_{rr} = I * \frac{(1 + \frac{s_0}{s}) * (3 - 4 * \frac{s_0}{s})}{2 * (1 - \frac{s_0}{s})} * \left[ \frac{s_0}{s} \right] * \left[ \frac{P}{D_0 * l} \right] \quad (28)$$

Donde:

*Mrr*: Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante  
*I*: Factor de influencia  
 $\mu_0$ : Relación de Poisson de la subrasante  
*S*: Rigidez del pavimento ( $p/D_0$ )  
 $S_0$ : Rigidez de la carga puntual teórica  
*p*: Carga aplicada  
 $D_0$ : Deflexión central (deflexión máxima)  
*l*: Longitud característica del cuenco de deflexión

$$l = y_0 * \frac{r_{s_0}}{2} + [(y_0 * r_{s_0})^2 - 4 * m * a * r_{s_0}]^{0.5} \quad (29)$$

$$\text{si } \frac{a}{l} < 0.2, \text{ entonces } l = (y_0 - 0.2 * m) * r_{s_0} \quad (30)$$

$S_0/S$  = Relación entre la rigidez de la carga puntual teórica y la rigidez del pavimento

$$\left[ \frac{S_0}{S} \right] = 1 - \bar{m} * \left[ \frac{a}{l} - 0.2 \right] \quad (31)$$

$$\text{si } \frac{a}{l} < 0.2, \text{ entonces } \left[ \frac{S_0}{S} \right] = 1.0 \quad (32)$$

Determinación de la distancia en la cual la deflexión es la mitad de la máxima,  $r_{50}$ :

$$r_{50} = r * \frac{(1/\alpha)^{1/\beta} - B}{\left[ \frac{1}{\alpha} * \left( \frac{D_0}{D_r} - 1 \right) \right]^{1/\beta} - B} \quad (33)$$

Donde:

$y_0$ : Coeficiente de longitud característica (ver tabla 4)  
*m*: Coeficiente de longitud característica (ver tabla 4)  
 $r_{50}$ : Distancia a la cual la deflexión es igual a la mitad de la máxima ( $D_r/D_0 = 0.5$ )  
*r*: Distancia al centro del plato de carga  
 $D_r$ : Deflexión tomada a una distancia *r*  
 $D_0$ : Deflexión central (deflexión máxima)  
 $\alpha, \beta, B$ : Coeficiente de ajuste de la curva (ver tabla 4)

Esta implementación del modelo de Hogg considera 3 casos. El Caso III corresponde a una fundación elástica infinita, mientras los Casos I y II son para capas elásticas finitas, con un espesor efectivo que se asume aproximadamente igual 10 veces la longitud característica del cuenco de deflexión ( $10 * l_0$ ). Los dos casos de espesor finito son para subrasante con relación de Poisson de 0.40 y 0.50, respectivamente. Las diferentes constantes usadas para los tres casos del modelo se muestran en la tabla 4. El Caso II ha sido empleado de manera amplia para calcular módulos de subrasante con propósitos de evaluación de pavimentos mediante cálculo directo.

Tabla 4. Coeficientes del modelo de Hogg

		CASO I	CASO II	CASO III
Distancia o soporte rígido	H/l	10	10	Infinito
Relación de Poisson	$\mu_0$	0.50	0.40	Cualquiera
Factor de influencia	<i>l</i>	0.1614	0.1689	0.1925
Rango $D_r / D_0$		>0.70	>0.43	Cualquiera
$r_{50} = f(D_r / D_0)$	$\alpha$	0.4065	0.3804	0.3210
	$\beta$	1.6890	1.8246	1.7117
Rango $D_r / D_0$	B	0	0	0
$r_{50} = f(D_r / D_0)$		<0.70	<0.43	
	$\alpha$	2.6947E-3	4.3795E-4	
$I = f(r_{50}, a)$	$\beta$	4.5663	4.9903	
	B	2	3	
$(S / S_0) = f(a/l)$	$y_0$	0.642	0.603	0.527
	$\bar{m}$	0.125	0.108	0.098
	$\frac{\bar{m}}{m}$	0.219	0.208	0.185

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. INVIAS, Bogotá. 2008, p. 234.

### F. Método de HOGG simplificado

El procedimiento del método de Hogg simplificado es el siguiente:

- De la curva de deflexión medida se selecciona el valor de la deflexión máxima  $D_o$  y una deflexión adicional  $D_r$  correspondiente a la distancia radial  $r$ .
- Se calcula la relación  $D_o/D_r$  y de la tabla 4 se escogen los parámetros de cálculo.
- Se calcula el valor del factor de longitud de curva  $r_{50}$ .
- Se calcula el producto  $D_o \times r_{50}$ , unidades ( $10^{-1} \text{ cm} \times \text{cm}$ )
- Se calcula el módulo resiliente de retrocálculo mediante la siguiente ecuación:

$$Mrr \left( \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right) = 1091314.96(D_o * r_{50})^{-0.939} \quad (34)$$

$$Mrr = C \times Mrr$$

$Mrr$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante en  $\text{kg/cm}^2$

$Mr$ : Módulo resiliente de la subrasante en  $\text{kg/cm}^2$

### G. Determinación del módulo resiliente de la subrasante mediante ecuaciones de regresión del Departamento de Transporte de Washington [6]

Ecuaciones del Departamento de Transporte de Washington en sistemas de tres capas

$$Mrr = -37.1 + 34.3 * \left[ \frac{P}{D_{900}} \right] \quad (35)$$

$$Mrr = -7.8 + 22.6 * \left[ \frac{P}{D_{1200}} \right] \quad (36)$$

$$Mrr = -24.2 + 52.9 * \left[ \frac{2 * P}{D_{900} + D_{1200}} \right] \quad (37)$$

Las ecuaciones 35, 36 y 37 tienen un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.99$ .

Donde:

$Mrr$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P$ : Carga aplicada sobre una placa de 300 mm de diámetro (kg)

$D_{900}$ : Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga (0.001 mm)

$D_{1200}$ : Deflexión a 1200 mm del centro de aplicación de la carga (0.001 mm)

Las ecuaciones del Departamento de Transporte del Estado de Washington en sistemas de tres capas, en el sistema de unidades inglés son las siguientes:

$$Mrr = -530 + 0.087 * \left[ \frac{P}{D_{900}} \right] \quad (35a)$$

$$Mrr = -111 + 0.0557 * \left[ \frac{P}{D_{1200}} \right] \quad (36b)$$

$$Mrr = -346 + 0.0676 * \left[ \frac{2 * P}{D_{900} + D_{1200}} \right] \quad (37c)$$

Las ecuaciones 35a, 36b y 37c tienen un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.99$ .

Donde:

$Mrr$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante ( $\text{lb/pulg}^2$ )

$P$ : Carga aplicada sobre una placa de 300 mm de diámetro (libras)

$D_{900}$ : Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga (pulgadas)

$D_{1200}$ : Deflexión a 1200 mm del centro de aplicación de la carga (pulgadas)

### H. Determinación del módulo resiliente de la subrasante utilizando las ecuaciones de Darter

Las ecuaciones de Darter son las siguientes:

$$Mrr = 0.0114 * \left[ \frac{P}{D_{600}} \right] \quad (38)$$

$$Mrr = 0.007434 * \left[ \frac{P}{D_{900}} \right] \quad (39)$$

$$Mrr = 0.00557 * \left[ \frac{P}{D_{1200}} \right] \quad (40)$$

Donde:

$Mrr$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante ( $\text{lb/pulg}^2$ )



- P: Carga aplicada sobre una placa de 300 mm de diámetro (libras)
- $D_{600}$ : Deflexión a 600 mm del centro de aplicación de la carga (pulgadas)
- $D_{900}$ : Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga (pulgadas)
- $D_{1200}$ : Deflexión a 1200 mm del centro de aplicación de la carga (pulgadas)

#### I. Determinación del módulo resiliente por el método Rohde [7]

##### 1) Módulo resiliente de la subrasante

El investigador Gustav Rhode determina el módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$M_{rr} = 10^{\frac{\log\left(\frac{D_{180}}{97480}\right)}{-1.055}} \quad (41)$$

Donde:

$M_{rr}$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante, en  $\text{kg/cm}^2$

$D_{180}$ : Deflexión a 1800 mm del centro de aplicación de la carga, en mm

##### 2) Número estructural efectivo

Una segunda aproximación para el cálculo del número estructural efectivo es la propuesta por Rohde.

$$SN_{eff} = k_1 * SIP^{k_2} * (H_T)^{k_3} \quad (42)$$

Donde:

$H_T$ : Espesor total del pavimento, en mm

$SIP$ : Índice estructural de pavimento =  $D_0 - D_{1.5*HT}$ , en 0.001 mm

$D_{1.5*HT}$ : Deflexión a una distancia igual a 1.5 veces el espesor total del pavimento, en 0.001 mm

$K_1, K_2, K_3$ : Coeficientes que dependen del tipo de capa superficial del pavimento (ver tabla 5).

Tabla 5. Coeficientes de la fórmula de Rohde

Tipo de superficie	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Tratamiento superficial	0.1165	- 0.3248	0.8241
Concreto asfáltico	0.4728	- 0.4810	0.7581

Fuente: INVIAS, Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. INVIAS. Bogotá, 2008, p. 242.

#### IV. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS PARA CALCULAR EL MÓDULO RESILIENTE DE UNA SUBRASANTE

Para analizar las diferentes metodologías se determinan los parámetros para la modelación de una estructura de pavimento flexible, con base en la siguiente información:

##### A. Información para la modelación estructural del pavimento flexible

- Carga del deflectómetro,  $P = 4,100 \text{ kg} = 40 \text{ KN} = 9,000 \text{ lb}$
- Radio de carga,  $a = 15 \text{ cm} = 5.9 \text{ pulgadas}$
- Presión de contacto,  $q = 5.76 \text{ kg/cm}^2 = 80 \text{ lb/pulg}^2$
- Relación de Poisson de la subrasante,  $\mu = 0.5$
- Información deflectométrica:

Tabla 6. Resultados del ensayo del FWD para el pavimento flexible analizado

N.º Ensayo	Carga kN (lb)	Ubicación del sensor "r", cm (pulgadas)						
		$D_0$	$D_{30(12)}$	$D_{60(24)}$	$D_{90(36)}$	$D_{120(48)}$	$D_{150(60)}$	$D_{180(72)}$
Deflexiones "d <sub>r</sub> ", mm (pulgadas)								
1	40 (9,000)	0.769 (0.0303)	0.338 (0.0133)	0.176 (0.00693)	0.118 (0.00465)	0.087 (0.00343)	0.068 (0.00268)	0.055 (0.00217)

### B. Estructura de pavimento

La estructura del pavimento existente tiene un espesor total de 60 cm (24 pulgadas) y está compuesta de las siguientes capas:

En la tabla 7 se presentan los resultados del módulo resiliente de la subrasante obtenidos por varios métodos de cálculo. Del análisis de la tabla 7 se deduce lo siguiente:

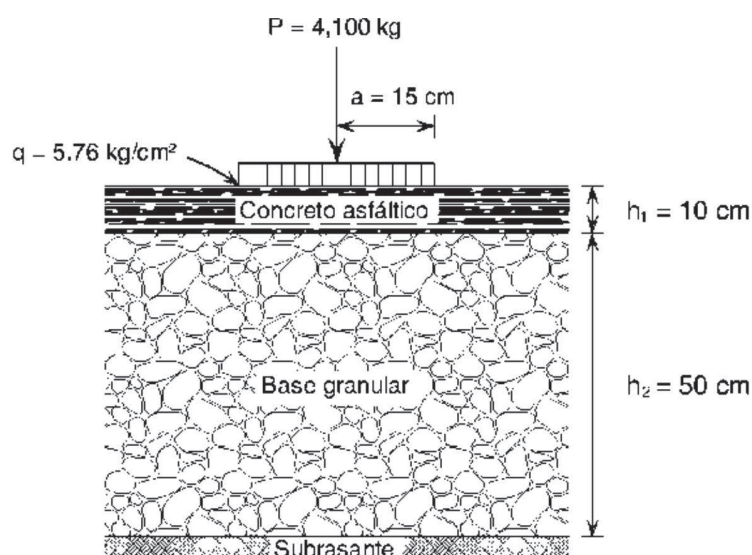


Figura 6. Estructura de pavimento existente

Tabla 7. Análisis comparativo de las metodologías para calcular el módulo resiliente de la subrasante

N°.	Método	Módulo resiliente de retrocálculo - Mrr		Módulo resiliente de la subrasante - Mr		Número estructural efectivo - SNe fec
		kg/cm <sup>2</sup>	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	
1	AASHTO-93	963	94	321	32	3.20
2	LUKANEN	613	60	204	20	
3	YONAPAVE	1076	105	359	35	1.60
4	FHWA-RD-05-152 Método Hogg modificado	745	73	248	24	
5	Método de Hogg simplificado	859	84	286	28	
6	Ecuaciones de regresión del Departamento de Transporte de Washington	1155	113	385	38	
		1057	104	352	35	
		2092	205	697	68	
7	Ecuaciones de DARTER	1037	102	345	34	
		1008	99	336	33	
		1025	100	342	34	
8	Método de ROHDE	837	82	279	27	2.68

- Los diferentes métodos calculan el módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante (Mrr) con la información del cuenco de deflexión obtenido con el equipo denominado deflectómetro de impacto –FWD–.
- Para determinar el módulo resiliente de la

subrasante se utiliza el factor de ajuste con el valor de  $C = 0.33$ , según la recomendación dada por la AASHTO.

- El método de Lukanen determina el valor más bajo del módulo resiliente de la subrasante, comparado con los demás métodos de cálculo.
- La ecuación de regresión del Departamento de Transporte de Washington, utilizando la información de los sensores ubicados a 900 mm y 1200 mm con respecto al eje de carga del sistema, produce el mayor valor del módulo resiliente de la subrasante; por lo tanto, no se aconseja su utilización en todos los casos.
- El valor promedio del módulo resiliente ( $M_r$ ) de la subrasante evaluada, excluyendo los dos métodos enunciados anteriormente, es de 325 kg/cm<sup>2</sup>, o su equivalente a un valor de CBR de 3.25% o su equivalente a un valor del módulo de reacción de la subrasante de 2.9 kg/cm<sup>3</sup>.

Los métodos de la AASHTO-93, Yonapave y Rohde permiten calcular el valor del número estructural efectivo (SN<sub>efec</sub>) de una estructura de pavimento existente, variable que es de gran importancia para el diseño y evaluación de refuerzos o rehabilitación de estructuras de pavimento.

#### V. FACTOR DE AJUSTE ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE DE RETROCÁLCULO DE LA SUBRASANTE Y EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE

La determinación del factor de ajuste  $C$ , para poder correlacionar el valor del módulo resiliente obtenido por retrocálculo con la información del deflectómetro de impacto ( $M_{rr}$ ) y el módulo resiliente de laboratorio ( $M_r$ ), es un tema de investigación en varios países.

El factor de correlación permite realizar la evaluación de la resistencia de una subrasante y el diseño de estructuras de pavimento, ya sean nuevas o en servicio. Algunos de los estudios que definen el factor de ajuste  $C$  se describen a continuación:

##### A. Guía de la AASHTO-93 [8]

De acuerdo con los antecedentes contenidos en la Guía AASHTO 1993, los valores obtenidos mediante el uso del deflectómetro de impacto ( $M_{rr}$ ) resultan en general más altos que los obtenidos en laboratorio ( $M_r$ ), por lo que se recomienda el uso de un factor de ajuste ( $C$ ), con el fin de hacer consistente estos valores con el valor de laboratorio. La AASHTO recomienda utilizar un valor de  $C = 0.33$ .

$$M_r = C \cdot M_{rr} = 0.33M_{rr} \quad (43)$$

Donde:

$M_{rr}$ : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante

$M_r$ : Módulo resiliente de la subrasante

$C$ : Factor de ajuste = 0.33

##### B. Factor de correlación recomendado en el estudio "Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures" [9]

El factor de ajuste ( $C$ ) recomendado en el documento "Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures" depende de la superficie sobre la que se realicen los ensayos, tal como se indica en la tabla 8.

Tabla 8. Factores de ajuste al módulo resiliente retrocalculado,  $M_{rr}$

Tipo de pavimento	Factor de ajuste "C" promedio	Coefficiente de variación, %
Suelos de subrasante bajo una subrasante estabilizada.	0.75	13
Suelos de subrasante bajo un pavimento sin una capa de base y/o subbase granular no ligada, y sin subrasante estabilizada.	0.52	37
Suelo de subrasante bajo un pavimento con una capa de base y/o subbase granular no ligada, pero sin subrasante estabilizada.	0.35	49

C. Estudio realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile [9]

El estudio experimental consistió en comparar el módulo resiliente de subrasante obtenido mediante el deflectómetro de impacto y el obtenido en laboratorio. Para que los resultados fueran comparables, los ensayos se realizaron sobre el suelo en condiciones físicas similares bajo estados de esfuerzos equivalentes.

**Análisis de la información.** Con base en los resultados obtenidos, se propone un factor de ajuste  $C=0.45$  para los suelos y estructura de pavimento asfáltico, considerados en este estudio. En este sentido, para estimar el módulo resiliente de laboratorio a partir del módulo retrocalculado de deflexiones medidas con el FWD, se propone la siguiente relación:

$$Mr = 0.45xMrr \quad (44)$$

Donde:

*Mrr*: Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante

*Mr*: Módulo resiliente de la subrasante  
0.45: Factor de ajuste

Este factor de ajuste incorpora el concepto de seguridad en el diseño al elegir la sección crítica de la capa de subrasante para su evaluación.

El factor de ajuste propuesto corresponde a  $C=0.45$ , cercano al recomendado por AASHTO  $C=0.35$ . Cabe mencionar que se ha seguido en forma rigurosa el procedimiento recomendado por AASHTO para obtener el factor de ajuste, no obstante, en lo que se refiere a la profundidad de evaluación se ha optado por un criterio propio.

D. Estudio del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Mississippi [10]

El estudio denominado “Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Resilient Moduli”, realizado por la Universidad de Mississippi, de Estados Unidos, en el año 2003, propone los siguientes valores del factor de ajuste *C*, para correlacionar el módulo resiliente de retrocálculo y el módulo resiliente de una subrasante.

Tabla 9. Factor de ajuste - C

Tipo y localización de la capa	Factor de ajuste - C
Base granular/subbase bajo capas estabilizadas con cemento- PCC	1.32
Base granular/subbase bajo capas asfálticas	0.62
Base granular/subbase entre capas estabilizadas con asfalto	1.43
Subrasantes bajo subrasantes mejoradas	1.32
Subrasantes bajo capas asfálticas o de concreto	0.52
Subrasantes bajo capas granulares de base/subbase	0.35

E. Estudio de la Universidad del Rosario – Argentina– [11]

El estudio denominado “Estimación del valor *C* incluido en el método AASHTO-93 para el retrocálculo modular de la subrasante”, realizado por la Universidad del Rosario, Argentina, propone la siguiente expresión:

$$Mr = 0.68 x Mrr \quad (45)$$

Donde:

*Mrr*: Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante

*Mr*: Módulo resiliente de la subrasante

0.68: Factor de ajuste

## VI. CONCLUSIONES

- Existen varias metodologías que permiten calcular el módulo resiliente ( $M_r$ ) de una subrasante a partir de la información del cuenco de deflexiones obtenido por medio del deflectómetro de impacto –FWD–.
- Dentro de las metodologías más conocidas se pueden citar las siguientes: AASHTO-93, Lukanen, Yonapave, Hogg modificado, Hogg simplificado, ecuaciones de regresión del Departamento de Transporte de Washington, y Ecuaciones de Darter y Rohde. Estas metodologías determinan el módulo resiliente de retrocálculo de una subrasante ( $M_{rr}$ ), el cual resulta ser mayor que el módulo resiliente de laboratorio.
- La relación entre el módulo resiliente de retrocálculo ( $M_{rr}$ ) y el módulo resiliente de laboratorio ( $M_r$ ) define el factor  $C$ , que se denomina factor de ajuste.
- Actualmente, las universidades y las firmas consultores de Latinoamérica están adelantando proyectos de investigación con el fin de calcular el factor  $C$ , o factor de ajuste, para los suelos típicos de sus territorios, y así poder determinar el valor más real del módulo resiliente de una subrasante, utilizando la información del cuenco de deflexión obtenida por medio del deflectómetro de impacto.
- La experiencia de Estados Unidos y de algunos países de Latinoamérica indica que el factor de ajuste -  $C$  varía entre 0.33 y 0.68 para subrasantes de suelos finos, tipo limus y arcillas, predominantemente.
- Se espera que en el próximo quinquenio el número de deflectómetros de impacto en cada país se incremente notoriamente, y que la utilización de ensayos no destructivos predomine, especialmente para la evaluación de subrasantes de estructuras de pavimento nuevas o en servicio; por lo tanto, es importante contar con el factor de

ajuste para cada uno de los suelos típicos de una zona, una región o un país.

- Con la información del cuenco de deflexión obtenido con el deflectómetro de impacto se puede calcular la capacidad estructural de un pavimento en servicio, mediante el parámetro denominado número estructural efectivo –  $S_{Nefec}$ –. Este parámetro es básico para determinar el refuerzo o la rehabilitación de una estructura de pavimento, tal como lo definen las metodologías de la AASHTO-93, Yonapave y Rohde.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y a la Dirección de Investigaciones (DIN-Uptc) por el apoyo dado para realizar la investigación base de este artículo; así mismo, a los integrantes del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – Grinfravial–, por su apoyo y asesoría en la elaboración del 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. Popayán. Universidad del Cauca. 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] E. A. Guzmán Suárez. “Evaluación estructural de pavimentos flexibles a partir de información tomada con deflectómetro de impacto”. *Congreso de Pavimentos*. Medellín. 2009.
- [5] Federal Highway Administration. Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation

- Results. FHWA-HRT-05-153. Estados Unidos. 2006.
- [6] Instituto Nacional de Vías –INVIAS–. *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos*. Bogotá. 2008. 570 p.
- [7] C. Bockelman. “Experiencias del Falling Weight Deflectometer empleado para el control de construcción de las diferentes capas de un pavimento”. *XII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos*. Popayán. 2002.
- [8] AASHTO. *Guide for Design of Pavements Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC, 1993.
- [9] M. P. Acevedo y otros. *Relación entre el módulo resiliente determinado mediante el deflectómetro de impacto y el de laboratorio*. Universidad Técnica Federico Santa María – Chile–.
- [10] K. P. George. *Falling Weight Deflectometer for Estimating Sugbrade Resilient Moduli*. Universidad de Mississippi, Estados Unidos. 2003.
- [11] E. Urbáez y otros. *Estimación del valor de C incluido en el método AASHTO-93 para el retrocálculo modular de la subrasante*. Universidad del Rosario, Argentina.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation Results*. FHWA-HRT-05-153. Estados Unidos. 2006.
- GAETE, R.; FUENTE, C.; VALVERDE, S. *Uso del deflectómetro de impacto para la evaluación estructural de recapados asfálticos sobre pavimentos de hormigón*. Gauss S.A., Chile.
- HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. Vols. I y II. ISBN 978-958-660-149-8 y 978-958-660-152-8. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2010.
- HOFFMAN, M. S. *A Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections*, TRB 2003 Annual Meeting CD ROM.
- HOFFMAN, M. S.; DEL ÁGUILA, P. M. *Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexión (ensayos no destructivos)*. Octubre 1985.
- HUANG Y. H. *Pavement Analysis and Design*. Segunda edición. Editorial Pearson. 2002.

## Bibliografía

- DEL ÁGUILA, P. M. “Determinación del módulo resiliente del suelo de fundación mediante método mecanístico–empírico (Método Hogg Simplificado)”, Ponencia presentada al *XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto*, La Habana, Cuba, 2007.
- FHWA. *Design Pamphlet for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures*. 1997.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS –INVIAS–. *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. INVIAS. Bogotá. 2008.
- LUKANEN, E. O. *Pavement Rehabilitation Selection, Final Report*. Minnesota, Department of Transportation, Report No. MN/RC 2008-06, January 2008.
- URBÁEZ, Ernesto y Corros Maylin. *Revisión de algunas metodologías de retrocálculo para la estimación del módulo resiliente de la subrasante de un pavimento flexible*. Venezuela. 2008.