

**Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado, factor de ajuste C**

**Comparison between the subgrade resilient module determined in the laboratory and retrocalculated adjustment factor C**

**Comparativo entre o módulo resiliente do subleito determinado no laboratório e o retrocalculado-fator de ajuste C**

Para citar este artículo / To reference this article  
/ Para citar este artigo: Guzmán Suárez, E. A. e Higuera Sandoval, C. H. (2016). Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado, factor de ajuste C. *Ingenio Magno*, 7(1), 62-83.

**Edwin Antonio Guzmán-Suárez**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,  
Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación y  
Desarrollo en Infraestructura Vial (Grinfravial)  
[edwguzman@gmail.com](mailto:edwguzman@gmail.com)

**Carlos Hernando Higuera-Sandoval**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,  
Facultad de Ingeniería, Grupo de  
Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial  
(Grinfravial)  
[carlos.higuera@uptc.edu.co](mailto:carlos.higuera@uptc.edu.co)

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2016

Fecha de Aprobación: 19 de Mayo de 2016

## Resumen

Este artículo busca conocer la relación existente entre el módulo resiliente de la subrasante retrocalculado ( $M_{rr}$ ), a partir de la información del deflectómetro de impacto (FWD), y el obtenido en pruebas de laboratorio ( $M_r$ ); relación que está dada por el denominado factor de ajuste "C". Inicialmente, en este trabajo se ha realizado la evaluación estructural de un tramo de pavimento flexible mediante FWD. Los resultados de caracterizar la resistencia de la subrasante mediante el parámetro **módulo resiliente**, al aplicar técnicas de retrocálculo, han sido comparados con el valor del módulo resiliente determinado en las pruebas de laboratorio, y a partir de esta relación se han establecido factores de ajuste para hacer equiparables los valores de módulo obtenidos. El análisis efectuado consistió en retrocalcular el módulo resiliente de la subrasante mediante la implementación de diferentes métodos, para posteriormente contrastar estos resultados con el módulo resiliente de laboratorio, determinado bajo las condiciones imperantes en la estructura de pavimento en servicio. Como resultado, a partir de la relación encontrada, se establecen factores para hacer consistentes los valores de  $M_{rr}$  y  $M_r$ . A partir del análisis realizado se concluye que no existe un único factor por aplicar al módulo resiliente de la subrasante retrocalculado; el factor de ajuste es función del método con que se caracteriza la resistencia de la subrasante y de la ecuación constitutiva del módulo resiliente del material de subrasante ensayado en laboratorio.

**Palabras clave:** deflectómetro de impacto, factor de ajuste, módulo resiliente, retrocálculo.

## Abstract

The main objective of this article is to understand the relationship between the Subgrade Resilient Retrocalculated Module ( $M_{rr}$ ), given from the information provided by the Impact Deflectometer (FWD), and that obtained from the lab results ( $M_r$ ), which is given by the designated adjustment factor "C". Initially, a structural evaluation of a length of flexible pavement was analyzed through FWD. The results characterized the resistance of the subgrade through the Resilient Module parameter. Using retro calculation techniques, the values of the Resilient Module determined in the laboratory tests were compared. This yielded an adjustment factor in order to make the module values obtained comparable. The analysis consisted of retrocalculating the Resilient Module in the subgrade through the implementation of different methods. Then, these results were compared to the results obtained from the Resilient Module in the laboratory determined under the conditions prevailing in the pavement structure in service. As a result of the correlation found, the variables  $M_{rr}$  y  $M_r$  were established. The analysis yielded the conclusion that there exists more than one factor to be applied on the Resilient Module of the retrocalculated subgrade. Also, the adjustment factor depends on the method which categorizes the resistance of the subgrade and the Resilient Module equation of the subgrade material tested in the laboratory.

**Keywords:** impact deflectometer, adjustment factor, resilient module, retrocalculation.

## Resumo

O objetivo principal neste artigo é conhecer a relação existente entre o módulo resiliente do subleito retrocalculado ( $M_{rr}$ ), a partir da informação do Deflectómetro de impacto (FWD), obtido em ensaios de laboratório ( $M_r$ ), dada pelo denominado fator de ajuste "C". Inicialmente, neste trabalho foi realizada a avaliação estrutural de um trecho de asfalto flexível mediante FWD. Os resultados da caracterização da resistência do subleito mediante o parâmetro

módulo resiliente, aplicando técnicas de retrocálculo, foram comparados com o valor do módulo resiliente determinado nos ensaios de laboratório, e a partir da relação estabeleceram-se fatores de ajuste para fazer equiparáveis os valores do módulo obtidos. A análise realizada, consistiu em retrocalcular o módulo resiliente do subleito mediante a implementação dos diferentes métodos, para contrastar estes resultados com o módulo resiliente do laboratório, determinados sob as condições predominantes na estrutura do pavimento em serviço. Como resultado, a partir da relação encontrada estabeleceram-se fatores para fazer os valores consistentes  $M_{rr}$  e  $M_r$ . Da análise realizada, concluiu-se que não existe um único fator para aplicar ao módulo resiliente do subleito retrocalculado. O fator de ajuste é uma função do método utilizado para caracterizar a resistência do subleito e da equação do módulo resiliente do material do subleito testado no laboratório.

**Palavras Chave:** deflectómetro de impacto, fator de ajuste, módulo resiliente, retrocálculo.

## 1. Introducción

De acuerdo con los antecedentes contenidos en la *Guide for design of pavement structures* (The American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 1993), los resultados de módulo resiliente determinados mediante retrocálculo son superiores a aquellos obtenidos en laboratorio; por ello, se recomienda el uso de un factor de ajuste con el fin de hacerlos consistentes con el valor usado en el desarrollo del método AASHTO.

Actualmente, se han realizado proyectos de investigación por parte de instituciones internacionales (AASHTO, Universidad de Mississippi, Universidad Técnica Federico Santa María de Chile, Universidad del Rosario - Argentina) (Higuera, 2010), con el fin de determinar la relación existente entre la capacidad de soporte de los suelos de subrasante obtenida por retrocálculo y mediante ensayos de laboratorio; sin embargo, en el ámbito local se han realizado pocos estudios tendientes a determinar la relación existente.

Dada la relevancia de la determinación del módulo resiliente en el diseño y la evaluación de pavimentos, el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura

Vial (Grinfravial), de la Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, busca con el presente proyecto proponer factores de correlación para ajustar el módulo resiliente determinado mediante retrocálculo y hacerlo consistente con el obtenido en pruebas de laboratorio.

No se pretende establecer factores de ajuste de uso general; lo que se busca es que sirvan de referencia, ya que en cada proyecto estos se deberían determinar en forma particular, con el fin de realizar diseños con mayor grado de confiabilidad; esto, por lo menos, hasta contar con una amplia base de datos de este factor en función del tipo de suelo y las condiciones de la estructura de pavimento.

Para obtener factores de correlación entre el módulo resiliente determinado por retrocálculo y el de laboratorio, se seleccionó un tramo de prueba, en el cual se tomaron lecturas de deflexiones con el deflectómetro de impacto (FWD); además, se extrajeron muestras inalteradas para realizar ensayos de capacidad de soporte (CBR) y de módulo resiliente, junto con la caracterización general de los suelos de subrasante.

Posteriormente, se compararon los valores de este módulo obtenidos en laboratorio con los obtenidos por retrocálculo al emplear distintas metodologías de evaluación consignadas en la literatura. A partir del análisis de la información, se proponen los factores de ajuste necesarios para hacer consistentes los valores de módulo.

El proyecto tiene gran significado si se tiene en cuenta que tradicionalmente en Colombia, en el diseño y la rehabilitación de estructuras de pavimento, se recurre a la utilización de factores de ajuste determinados en estudios llevados a cabo en otros países. Además, con el fin de incrementar la confiabilidad en el diseño, es conveniente aumentar la cantidad de suelos evaluados en nuestro medio y conocer así su factor de ajuste.

## 2. Resistencia de la subrasante

Los parámetros usados para caracterizar los suelos de subrasante en el diseño de pavimentos han incluido el módulo de reacción ( $k$ ), el módulo resiliente ( $M_r$ ), la capacidad de soporte (CBR) y el valor de soporte ( $R$ ). El módulo resiliente se ha convertido en un parámetro ampliamente aceptado para definir la resistencia de los suelos de subrasante; puede ser determinado por pruebas de laboratorio, métodos de retrocálculo, estimación mediante correlaciones con otros parámetros de resistencia, o bien, obtenido de los datos originales del diseño y construcción.

### A. Módulo resiliente

Este módulo es una medida de la capacidad de soporte de los suelos según su comportamiento no lineal; en definitiva,  $M_r$  considera la deformación recuperable de los suelos ante la aplicación de un esfuerzo. Su formulación general, de acuerdo con Urbáez *et al.* (2004), es [1]:

Donde:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_a} \quad [1]$$

$M_r$  = módulo resiliente.

$\sigma_d$  = esfuerzo desviador axial.

$\varepsilon_a$  = deformación axial recuperable.

El ensayo se puede ejecutar para cualquier tipo de material, desde un suelo cohesivo hasta un suelo estabilizado o granular; sin embargo, las condiciones de ensayo (por ejemplo, el estado de esfuerzos) inciden en la respuesta del  $M_r$  para distintos tipos de materiales. Con base en esta consideración, se han definido distintas formulaciones para estimar el  $M_r$  en suelo friccionales (granulares), los cuales pueden ser de bases, subbases o subrasantes, y para suelo cohesivos (finos) generalmente de subrasante.

### 1. Determinación del módulo resiliente en laboratorio

Este proceso se realiza con una cámara triaxial que posibilita modelar el confinamiento lateral que brinda el suelo circundante en el campo, y con un dispositivo neumático para aplicar el esfuerzo desviador que simula las acciones del tránsito.

El ensayo consiste, básicamente, en someter a una probeta de material a un estado de esfuerzos, compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico, de manera tal que se reproduzcan las condiciones en las que se encuentra un suelo en una carretera cuando es solicitado por la carga impartida por un vehículo circulando a cierta velocidad (Rivera *et al.*, 2012).

Ahora bien, ante los habituales materiales no ligados viales con comportamiento no lineal, el  $M_r$  varía para distintos esfuerzos desviadores; por ello, este concepto le da origen a lo que se denominan *ecuaciones*

constitutivas, que pueden representarse con diversos modelos de ajuste. Entonces, ensayando un material compactado a una densidad prefijada y con una humedad establecida, para distintas combinaciones de confinamiento y esfuerzo desviador, se puede obtener una ecuación constitutiva propia de ese material en esas condiciones, mediante el ajuste por regresión de los parámetros de calibración a un modelo dado.

## 2. Determinación del módulo resiliente en campo

El deflectómetro de impacto (FWD) es un equipo ampliamente utilizado en el mundo para la evaluación del estado estructural de pavimentos flexibles, semirrígidos y rígidos. La principal aportación del FWD frente a los equipos clásicos de deflectometría es el análisis de la capacidad de soporte mediante el cálculo inverso de los

módulos de rigidez de las capas de un pavimento, a partir de los cuencos de deflexión registrados (Higuera, 2010).

El funcionamiento del FWD se basa en la generación de una onda de carga sobre el pavimento por medio del impacto provocado por la caída libre de una masa. Este impacto es transmitido al pavimento mediante un sistema de amortiguamiento elástico montado sobre una placa de carga; además, simula la carga del semieje estándar del vehículo de diseño.

Una serie de sensores miden las deflexiones verticales del pavimento bajo el centro de la placa de carga y en diversas posiciones radiales a distintas distancias de este centro ( $d_r$ ). La deflexión  $d_r$  registrada a la distancia  $r$  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 sobre la subrasante.

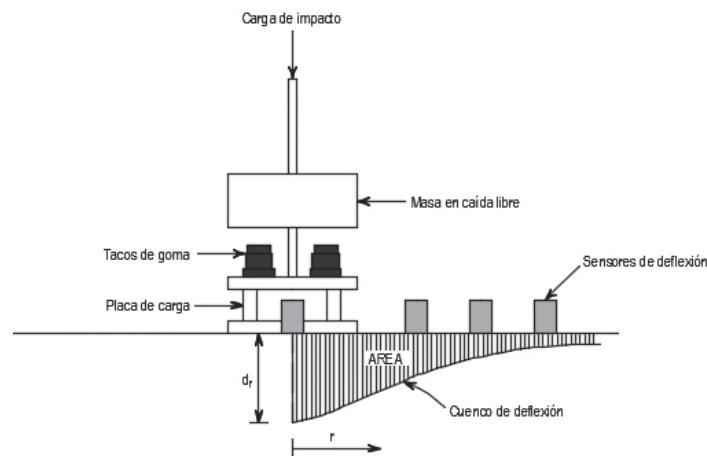


Figura 1. Funcionamiento del deflectómetro de impacto

Fuente: Higuera (2010, p. 76).

### B. Factor de ajuste C

Si el módulo se determina mediante el uso de técnicas de retrocálculo, el módulo de la subrasante debe ser multiplicado por un factor de ajuste, de acuerdo con [2]:

$$M_r = C \cdot M_{rr} \quad [2]$$

Donde:

C = factor de ajuste.

$M_r$  = módulo resiliente de la subrasante.

$M_{rr}$  = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado.

Este factor ajusta el módulo retrocalculado a un valor equivalente medido en laboratorio. La razón para este ajuste es que el procedimiento de diseño está basado en el valor de módulo medido en laboratorio, en tanto el uso del módulo de retrocálculo resultará en un espesor de pavimento insuficiente para diseños basados en el criterio de serviciabilidad (Urbáez *et al.*, 2004).

El módulo elástico de las capas retrocalculado a partir del cuenco de deflexiones y el módulo resiliente medido en laboratorio no son iguales, debido a múltiples razones.

Una de las más importantes es que las presiones de confinamiento uniforme y los esfuerzos verticales repetidos usados en el laboratorio no simulan realmente el confinamiento actual y la variación en el estado de esfuerzos, que ocurren en una capa de pavimento bajo la carga de prueba del FWD o la carga de la rueda.

### 3. Metodología

Enseguida se presenta la metodología implementada para la consecución de los objetivos del proyecto.

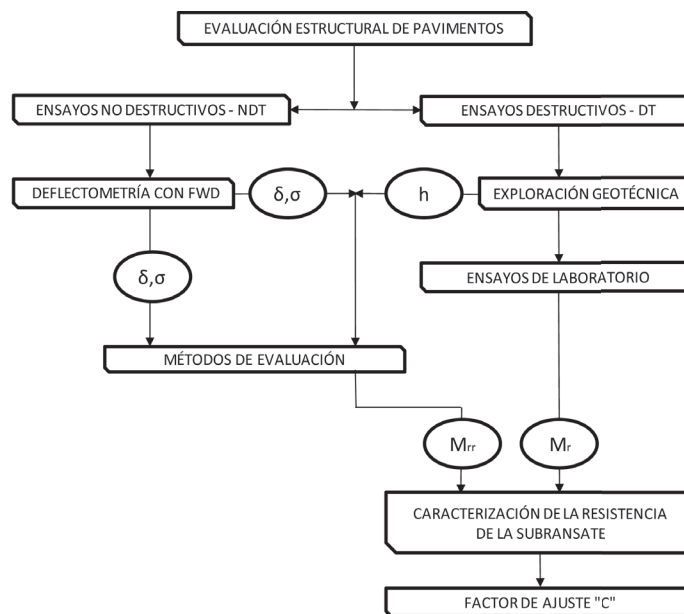


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación

Fuente: autores.

Donde:

$\delta$  = deflexiones

$\sigma$  = esfuerzos

h = espesores

$SN_{eff}$  = número estructural efectivo

$M_{rr}$  = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado

$M_r$  = módulo resiliente de la subrasante.

#### A. Trabajo de campo

La vía objeto de estudio se encuentra localizada en el casco urbano del municipio de Soracá, en Boyacá.



## B. Exploración geotécnica

En la exploración geotécnica se encontró una estructura de pavimento conformada por una capa de concreto asfáltico de aproximadamente 4,0 cm, a la cual subyace una capa granular en material tipo recebo (GC, GP-GC), con un espesor variable de aproximadamente 66 cm. Estas capas están fundadas sobre suelos de subrasante natural, correspondientes a arcillas de baja plasticidad (CL).

Durante la ejecución de los apiques se tomaron densidades con cono y arena, en la capa granular y el suelo de fundación, y se determinó el contenido de humedad natural de estas capas. Además, se recobraron muestras inalteradas y alteradas para posteriores ensayos en laboratorio.

## 3. Deflectometría de impacto

El equipo empleado para la medición fue el deflectómetro de impacto FWD KUAB 250, el cual ha sido configurado para aplicar una carga de 40 kN. Esta carga es generada por la caída de dos masas sobre un plato circular de 0,30 m de diámetro. Este impacto simula el paso de la rueda de un vehículo pesado y es registrado por un sensor ubicado en el centro del plato durante el instante en que el disco cae sobre el pavimento.

Las deflexiones producidas son medidas por un grupo de siete (7) sismómetros espaciados entre sí cada 0,30 m, lo cual permite obtener la curva completa del cuenco de deflexiones.

## C. Trabajo de laboratorio

Sobre las muestras inalteradas del suelo de subrasante se realizaron de ensayos de CBR y módulo resiliente. Con las muestras alteradas se efectuó la caracterización general de los materiales presentes en la estructura de pavimento.

## D. Métodos de caracterización de la resistencia de la subrasante

Se han desarrollado métodos para estimar el módulo resiliente de la subrasante a partir de la información del cuenco de deflexiones obtenido con FWD. Estos incluyen métodos de retrocálculo y técnicas simples de cálculo directo. En este artículo se utilizan los métodos que se describen a continuación.

### 1) Método AASHTO, 1993

La ecuación empleada para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante, cuando la relación de Poisson es asumida como 0,5, se presenta en [3] (AASHTO, 1993).

$$M_{rr} = \frac{0.24 \cdot P}{D_r \cdot r} \quad [3]$$

Donde:

$M_{rr}$  = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (Lb/pulg<sup>2</sup>).

P = carga aplicada (Lb).

$D_r$  = deflexión medida a una distancia  $r$  del centro del plato de carga (pulg).

$r$  = distancia desde el centro del plato de carga (pulg).

En la evaluación se emplea la deflexión correspondiente al sismómetro más cercano a la distancia  $r$ . Para su determinación se tiene en cuenta la relación [4], que está en función de la expresión [5]:

$$r \geq 0.7 \cdot a_e \quad [4]$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left( H_P^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)} \quad [5]$$

Donde:

$a_e$  = radio del bulbo de esfuerzos en la interfase pavimento-subrasante (pulg).

$a$  = radio del plato de carga del deflectómetro (pulg).  
 $H_p$  = espesor total de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (pulg).  
 $E_p$  = módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (Lb/pulg<sup>2</sup>).  
 $M_{rr}$  = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (Lb/pulg<sup>2</sup>).

El módulo equivalente refleja la capacidad estructural del pavimento existente, es decir, la rigidez equivalente otorgada por la capa asfáltica que lo conforma y los materiales que se encuentran debajo de esta. El módulo equivalente se determina empleando [6].

$$D_0 = 1.5 \cdot p \cdot a \cdot \left\{ \frac{1}{M_{rr} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{H_p}{a}\right)^3 \frac{E_p}{M_{rr}}}} + \left[ \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_p}{a}\right)^2}}}{E_p} \right] \right\} \quad [6]$$

Donde:

$D_0$  = deflexión central (pulg).  
 $p$  = presión del plato de carga (Lb/pulg<sup>2</sup>).  
 $a$  = radio del plato de carga (pulg).  
 $M_{rr}$  = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (Lb/pulg<sup>2</sup>).  
 $H_p$  = espesor total de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (pulg).  
 $E_p$  = módulo efectivo de todas las capas del pavimento (Lb/pulg<sup>2</sup>).

$$SIS = D_{1.5H_p} - D_{1.5H_p+450} \quad [7]$$

Donde:

SIS = índice estructural de la subrasante ( $\mu$ m).  
 $H_p$  = espesor total del pavimento (mm).  
 $D_{1.5H_p}$  = deflexión superficial medida a 1,5 veces  $H_p$ , bajo el impulso de carga estándar de 40 kN del FWD.  
 $D_{1.5H_p+450}$  = deflexión superficial medida a 1,5 veces  $H_p$  + 450 mm, bajo el impulso de carga estándar de 40 kN del FWD ( $\mu$ m).

## 2) Método de Gustav T. Rohde

La deflexión máxima medida bajo la carga del FWD es una combinación de la deflexión en la subrasante y la compresión elástica de la estructura de pavimento. De acuerdo con las investigaciones de Irwin (1983), el 95% de las deflexiones medidas en la superficie del pavimento inician bajo una línea con una desviación de 34 grados desde la horizontal (Rohde, 1994).

Con esta simplificación se puede definir un índice que representa la resistencia de la subrasante. Para este propósito, un índice estructural para la subrasante (SIS) ha sido definido [7]:

En función del índice SIS y el espesor total de las capas del pavimento, el módulo resiliente de la subrasante se define en [8]:

$$M_{rr} = 10^{k_4} \cdot SIS^{k_5} \cdot H_p^{k_6} \quad [8]$$

Donde:

$M_{rr}$  = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (MPa).  
SIS = índice estructural de la subrasante ( $\mu$ m).  
 $H_p$  = espesor total del pavimento (mm).  
 $k_4, k_5, k_6$  = coeficientes.



Tabla 1. Coeficientes para la relación Mrr-SIS

Espesor total del pavimento	k4	k5	k6
Hp ≤ 380 mm	9,138	-1,236	-1,903
380 < Hp ≤ 525 mm	8,756	-1,213	-1,780
Hp > 525 mm	10,655	-1,254	-2,453

Fuente: Rohde (1994, p. 64).

#### 4. Resultados

Esta parte contiene los resultados de los trabajos realizados en campo y en el laboratorio, así como los resultados de aplicar los métodos de evaluación estructural. Además, se presenta el análisis de la relación entre el módulo retrocalculado y el de laboratorio.

#### A. Caracterización de materiales

Las pruebas de laboratorio hicieron posible clasificar los materiales constituyentes de las capas de pavimento. También permitieron caracterizar la resistencia de la subrasante por medio de los parámetros CBR y módulo resiliente. Las tablas 2 y 3 presentan los resultados.

Tabla 2. Granulometría de los materiales de las capas de base y subrasante

Tamiz Nº	Diámetro (mm)	Porcentaje pasa																		
		Apique 1		Apique 2		Apique 3		Apique 4		Apique 5		Apique 6		Apique 7		Apique 8		Apique 9		
		GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	
3"	75,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-
2 1/2"	63,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85,4	-	87,4	-	93,9	-
2	50,0	100,0	-	-	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-	85,4	-	84,0	-	85,6	-	
1 1/2"	37,5	77,2	-	100,0	-	79,1	-	77,7	-	90,3	-	91,5	-	80,9	-	78,8	-	77,1	-	
1"	25,00	51,5	-	87,3	-	67,0	-	44,9	-	81,8	-	83,2	-	75,5	-	66,4	-	71,3	100,0	
3/4"	20,00	44,7	-	78,2	-	62,8	-	42,0	-	74,3	-	81,4	-	70,7	-	58,9	100,0	65,4	99,6	
1/2"	12,50	39,9	-	68,7	-	59,1	-	35,3	-	65,6	100,0	76,7	-	61,0	-	50,2	96,1	57,1	99,6	
3/8"	9,50	36,4	-	60,8	-	54,0	-	31,6	-	61,9	99,5	74,2	100,0	54,7	100,09	45,9	96,1	52,2	99,4	
4	4,75	30,4	100	49,0	100,0	45,2	100,0	25,1	100,0	49,7	98,0	65,7	99,4	39,8	97,5	37,6	95,1	46,4	99,1	
10	2,00	25,2	99,0	40,2	95,5	36,8	96,0	18,0	98,8	41,6	96,8	55,9	97,4	24,9	95,7	30,0	92,9	38,5	98,7	

Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado, factor de ajuste C

Tamiz Nº	Diámetro (mm)	Porcentaje pasa																	
		Apique 1		Apique 2		Apique 3		Apique 4		Apique 5		Apique 6		Apique 7		Apique 8		Apique 9	
		GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR	GR	SR
40	0,425	20,2	98,0	33,5	91,9	30,1	93,0	12,0	95,6	32,3	94,2	38,0	95,6	16,2	93,4	23,7	91,2	31,3	98,3
100	0,150	14,9	93,6	26,4	89,4	26,0	90,7	9,1	95,2	29,5	93,0	28,3	93,2	13,8	91,7	18,9	90,0	26,1	98,1
200	0,074	9,7	92,9	20,0	87,8	21,5	89,1	7,1	94,8	24,5	91,0	25,1	92,1	12,3	90,3	17,6	88,6	22,8	97,9
Clasificación SUCS		GP-GC	CL	GC	CL	GC	CL	GP-GC	CL	GC	CL	GC	CL	GC	CL	GC	CL	GC	CL

Fuente: autores.

Tabla 3. Caracterización de los materiales de las capas de base y subrasante

Apique	Capa	Clasificación SUCS	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Densidad en sitio (kg/m3)	Humedad natural (%)	CBR (%)	
								Inalterado	Inmersión
1	GR	GP-GC	27,53	16,60	10,93	1598,48	9,27		
	SR	CL	30,52	16,11	14,41	1421,89	23,19	3,30	1,70
2	GR	GC	27,58	16,54	11,04	1631,25	9,09		
	SR	CL	30,15	15,74	14,41	1429,94	22,97	2,90	1,80
3	GR	GC	24,75	17,04	7,71	1590,27	7,87		
	SR	CL	39,00	18,00	21,00	1413,03	24,96	5,00	2,90
4	GR	GP-GC	28,40	17,06	11,34	1620,23	10,83		
	SR	CL	43,27	22,14	21,13	1454,16	23,84	3,50	1,80
5	GR	GC	28,19	19,48	8,71	1627,83	10,61		
	SR	CL	35,47	17,31	18,16	1443,28	25,02	3,90	3,00
6	GR	GC	33,24	22,77	10,47	1625,92	9,50		
	SR	CL	33,00	14,00	19,00	1427,38	22,64	3,60	2,50
7	GR	GC	25,03	16,62	8,41	1613,63	10,09		
	SR	CL	41,37	20,52	20,85	1450,68	25,83	5,50	2,00

Apique	Capa	Clasificación SUCS	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Densidad en sitio (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad natural (%)	CBR (%)	
								Inalterado	Inmersión
8	GR	GC	32,68	22,98	9,70	1628,43	11,02		
	SR	CL	46,00	18,00	28,00	1403,80	29,89	7,30	3,60
9	GR	GC	31,61	18,53	13,08	1614,30	10,92		
	SR	CL	40,60	22,68	17,92	1434,58	28,24	7,20	3,60

Fuente: autores.

En general, el material que sirve de base para la capa de rodadura en concreto asfáltico está conformado por un relleno granular, clasificado en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como GC, es decir, una grava arcillosa. Las condiciones de humedad natural para esta capa varían entre 7,8 y 11%, con índices de plasticidad entre 7,7 y 13%. La capa presenta una densidad de compactación media de 1616 kg/m<sup>3</sup>.

El suelo de subrasante es una arcilla de baja plasticidad (CL), con valores de índice plástico que varían entre 14,4 y 28%. La humedad natural del suelo de fundación se encuentra entre 22,6 y 29,9%. La densidad media de

compactación de la capa es 1454 kg/m<sup>3</sup>. La resistencia de la subrasante, en términos del CBR, varía entre 2,9 y 7,3% en condiciones de humedad natural, y entre 1,7 y 3,6% en estado saturado, con valores promedio de 4,7 y 2,5%, respectivamente.

## B. Ensayos de módulo resiliente

La tabla 4 presenta los resultados del ensayo de módulo resiliente efectuado sobre las muestras obtenidas del suelo de subrasante, bajo las distintas combinaciones de aplicación de esfuerzo desviador nominal y de presión de cámara.

Tabla 4. Resultados del ensayo de módulo resiliente

Esfuerzo de desviación nominal $\sigma_d$	Apique 3 (K0+050)	Apique 6 (K0+087.5)	Apique 8 (K0+125)
	$M_r$ $\sigma_d/\xi_r$	$M_r$ $\sigma_d/\xi_r$	$M_r$ $\sigma_d/\xi_r$
kPa	MPa	MPa	MPa
27,60	20,4	45,1	59,0
13,80	11,4	38,4	49,2
27,60	18,6	43,7	62,4
41,40	20,8	45,9	68,3

Esfuerzo de desviación nominal $\sigma_d$	Apique 3 (K0+050)	Apique 6 (K0+087.5)	Apique 8 (K0+125)
	$M_r$ $\sigma_d/\xi_r$	$M_r$ $\sigma_d/\xi_r$	$M_r$ $\sigma_d/\xi_r$
55,50	23,1	45,6	70,9
68,90	27,4	50,7	80,6
13,80	9,6	15,9	32,7
27,60	15,3	35,5	58,4
41,40	18,6	43,2	76,1
55,20	24,1	48,8	78,1
68,90	20,6	41,4	66,5
13,80	5,8	5,5	20,6
27,60	14,3	30,8	55,0
41,40	16,0	30,9	60,4
55,20	20,0	37,0	70,9
68,90	20,1	37,1	64,5

Fuente: autores a partir de reportes de ensayos de laboratorio.

**C. Módulo resiliente retrocalculado ( $M_r$ )** (1993) y Rohde (1994). Los resultados se presentan en la tabla 5. Este módulo se evaluó por los métodos de AASHTO

Tabla 5.  $M_r$  por los métodos de AASHTO (1993) y Rohde (1994)

Abs. (m)	Deflexiones corregidas ( $\mu\text{m}$ )							Módulo resiliente	
	$D_0$	$D_{30}$	$D_{60}$	$D_{90}$	$D_{120}$	$D_{150}$	$D_{180}$	AASHTO (MPa)	ROHDE (MPa)
0	887	252	152	98	73	57	44	108	71
13	1151	391	190	98	64	49	40	108	61
25	956	346	194	107	72	55	43	99	56
38	902	302	160	89	61	48	38	119	76

Abs. (m)	Deflexiones corregidas ( $\mu\text{m}$ )							Módulo resiliente	
	D <sub>0</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>180</sub>	AASHTO (MPa)	ROHDE (MPa)
50	1057	387	207	108	68	50	40	98	51
63	1024	454	240	113	73	56	46	94	52
75	814	362	205	115	75	58	45	92	51
88	1153	398	208	111	69	53	43	96	51
100	763	386	203	102	65	50	39	104	58
113	777	344	156	83	55	45	35	128	88
125	768	285	127	66	45	34	28	161	105
138	751	318	137	61	43	33	27	174	116

Fuente: autores.

#### D. Módulo resiliente en servicio

También conocido como *módulo resiliente in situ o en condiciones en servicio*. Depende de factores inherentes al material, como sus propiedades físicas y mecánicas, y al estado tensional al que se encuentra sometido.

En el caso de la subrasante natural, el módulo resiliente es función del espesor de la estructura de pavimento, del peso unitario de los materiales, del estado de

confinamiento al que está sometida la subrasante bajo condiciones sin carga de los camiones, de la distribución de esfuerzos inducidos con el paso de las cargas y del tiempo de aplicación de estas.

Mediante un proceso de retrocálculo, con el uso de herramientas computacionales, se estiman los módulos de las capas constituyentes de la estructura de pavimento.

Tabla 6. Propiedades estructura de pavimento

Capa	Espesor	Relación Poisson	Módulos, Ei	Peso unitario
	m	$\mu_i$	MPa	Kg/m <sup>3</sup>
Concreto asfáltico	0,04	0,35	1050 *	2190
			1220 **	
Material granular	0,66	0,40	110 *	1616
			171 **	

Capa	Espesor m	Relación Poisson $\mu$	Módulos, Ei MPa	Peso unitario Kg/m <sup>3</sup>
Subrasante	2,80	0,45	96 *	1432
			128 **	
Capa rígida	-	0,35	140 *	-
			151 **	

\* Módulos apiques 3 y 6.

\*\* Módulos apique 8.

Fuente: autores.

Con la estructura inicial estimada se comienza el proceso de cálculo del módulo resiliente en servicio de la subrasante. A manera de ejemplo, a continuación se presenta el procedimiento con los datos del apique 8.

## 1. Determinación del coeficiente de presión de tierras en reposo para la subrasante natural

Este se calcula en función de la relación de Poisson (que es igual a 0,45), mediante la expresión [9]:

$$K_{OSR} = \frac{\mu}{1-\mu} \quad [9]$$

Donde:

$K_{OSR}$  = coeficiente de presión de tierras en reposo de la subrasante.

$\mu$  = relación de Poisson.

Reemplazando los datos en la expresión anterior, se tiene:

$$K_{OSR} = 0,818$$

## 2. Cálculo del esfuerzo horizontal en reposo para la estructura de pavimento asumida

Corresponde al generado por la presión de tierras, en función del coeficiente de presión de tierras y del peso

unitario y los espesores de las capas del pavimento.

### a) Peso unitario promedio ponderado de la estructura de pavimento

Se calcula con [10], en función de los espesores de las capas de pavimento y los pesos unitarios de estas:

$$\gamma_p = \frac{\gamma_{CA} \cdot h_{CA} + \gamma_{GR} \cdot h_{GR}}{h_{CA} + h_{GR}} \quad [10]$$

Donde:

$\gamma_p$  = peso unitario promedio ponderado de la estructura de pavimento (kg/m<sup>3</sup>).

$\gamma_{CA}$  = peso unitario de la capa de concreto asfáltico (kg/m<sup>3</sup>).

$\gamma_{GR}$  = peso unitario de la capa granular (kg/m<sup>3</sup>).

$h_{CA}$  = espesor de concreto asfáltico (m).

$h_{GR}$  = espesor capa granular (m).

Sustituyendo los datos conocidos, se tiene:

$$\gamma_p = 1649 \text{ Kg/m}^3$$

### b) Esfuerzo horizontal debido al pavimento

Este esfuerzo horizontal, debido a la presión horizontal de tierras, se calcula justo al inicio de la subrasante natural con el uso de [11], en los primeros 10 cm, que son los que sufrirán el mayor esfuerzo de confinamiento.



$$P_0 = K_{0SR} \cdot [\gamma_p \cdot H_p + \gamma_{SR} \cdot H_{SR}] \quad [11]$$

Donde:

$P_0$  = presión horizontal de tierras ( $\text{kg/m}^2$ ).

$K_{0SR}$  = coeficiente de presión de tierras en reposo de la subrasante.

$\gamma_p$  = peso unitario promedio ponderado de la estructura de pavimento ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\gamma_{SR}$  = peso unitario capa de subrasante ( $\text{kg/m}^3$ ).

$H_p$  = espesor estructura de pavimento (m).

$H_{SR}$  = espesor bajo la capa de subrasante al cual se evalúa (m).

Al reemplazar los datos, se tiene:

$$P_0 = 1062 \text{ Kg/m}^2 = 10.42 \text{ kPa}$$

### 3. Esfuerzo horizontal en servicio para la estructura de pavimento asumida debido a la sobrecarga

Se calcula por medio de la teoría elástica para la carga del eje simple de 8,2 Ton, a una profundidad de 10 cm bajo la subrasante; de esta manera se tiene en cuenta el efecto del paso de la rueda sobre el estado de confinamiento de la subrasante natural. Para determinar este valor se adoptó la siguiente correlación inicial entre el módulo resiliente y el CBR (7,3% en el apique 8):

$$M_r = 17.6(CBR)^{0.64} \quad [12]$$

Donde:

$M_r$  = módulo resiliente de la subrasante (MPa).

CBR = relación de soporte de California de la subrasante (%).

Sustituyendo los datos, se tiene:

$$M_r = 62.81 \text{ MPa}$$

Con la ayuda del programa Bisar 3.0 se obtiene:

$$\sigma_h = \sigma_x = \sigma'_3 \quad [13]$$

Donde:

$\sigma_h$  = esfuerzo horizontal en servicio debido a la sobrecarga de la rueda (kPa).

Reemplazando se tiene:

$$\sigma_h = \sigma_x = \sigma'_3 = 0.37 \text{ kPa}$$

### 4. Esfuerzo horizontal total de la subrasante natural

Este corresponde al estado de confinamiento total de la subrasante natural, producto del peso de la estructura de pavimento y al paso de la rueda del vehículo que la solicita:

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + P_0 \quad [14]$$

Donde:

$\sigma_3$  = esfuerzo horizontal total debido a la sobrecarga y al pavimento (kPa).

$\sigma'_3$  = esfuerzo horizontal en servicio debido a la sobrecarga de la rueda (kPa).

$P_0$  = presión horizontal de tierras (kPa).

Sustituyendo en la expresión anterior, se tiene:

$$\sigma_3 = 10.79 \text{ kPa}$$

### 5. Esfuerzo desviador en servicio para la estructura de pavimento asumida, debido a la sobrecarga

Se calcula por medio de la teoría elástica para la carga del eje simple de 8,2 Ton, a una profundidad de 10 cm bajo la subrasante. Del análisis con Bisar 3.0 se obtiene el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= 18.91 \text{ kPa} \\ \sigma'_d &= \sigma_z - \sigma_x \end{aligned} \quad [15]$$

Donde:

$\sigma'_d$  = esfuerzo desviador en servicio debido a la sobrecarga de la rueda (kPa).

$\sigma'_z$  = esfuerzo vertical en servicio debido a la sobrecarga de la rueda (kPa).

$\sigma'_x$  = esfuerzo horizontal en servicio debido a la sobrecarga de la rueda (kPa).

Reemplazando en la expresión, se tiene:

$$\sigma'_d = 18.54 \text{ kPa}$$

## 6. Esfuerzo desviador total de la subrasante natural

Corresponde al producido por la estructura de pavimento y la sobrecarga generada por el paso de la rueda del vehículo; se determina mediante [16]:

$$\sigma_d = \sigma'_d + P_0 \left( \frac{1}{K_{0SR}} - 1 \right) \quad [16]$$

Donde:

$\sigma_d$  = esfuerzo desviador total debido a la sobrecarga y al pavimento (kPa).

$\sigma'_d$  = esfuerzo desviador en servicio debido a la sobrecarga de la rueda (kPa).

$P_0$  = presión horizontal de tierras (kPa).

$K_{0SR}$  = coeficiente de presión de tierras en reposo de la subrasante.

Reemplazando los datos conocidos, se tiene:

$$\sigma_3 = 10.79 \text{ kPa}$$

## 7. Determinación del módulo resiliente en servicio

El esfuerzo desviador total se reemplaza en la ecuación constitutiva del material; de ello se obtiene un módulo resiliente de 64,80 MPa. El valor de módulo obtenido se compara con el asumido inicialmente en el proceso. En esta primera iteración se entró con 62,81 MPa y se obtuvo un resultado de 64,80 MPa. Aunque los valores de módulo son muy cercanos, se puede realizar otra iteración para un mayor ajuste.

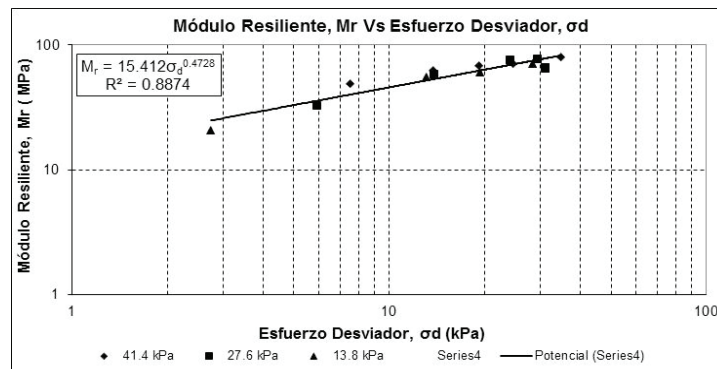


Figura 3. Curva del módulo resiliente apique 8

Fuente: autores a partir de reportes de ensayos de laboratorio.

Las iteraciones se realizan repitiendo el procedimiento descrito: variando el  $M_r$  de entrada hasta que coincida

con el calculado; y al variar el  $M_r$  de entrada también se recalcula el módulo del material granular.

### E. Determinación del factor de ajuste C

Como se ha notado, el valor del  $M_r$  de laboratorio se traduce en una relación funcional, y no en un valor único, el cual está asociado al estado de esfuerzos que la carga aplicada genera en la subrasante, denominado *módulo resiliente en servicio*.

El factor de ajuste C se determinará para el módulo resiliente en servicio, el cual varía con la profundidad, debido a que depende del estado de esfuerzos que la carga aplicada en la superficie genera. Esto indica

que no existe un único factor que relaciona al módulo resiliente de retrocálculo con el medido en las pruebas de laboratorio.

Además, según el procedimiento descrito en la guía de AASHTO (1993), el módulo resiliente del suelo de subrasante debe ser estimado para un esfuerzo desviador de 6,0 Lb/pulg<sup>2</sup> (41,4 kPa), por lo cual también se determinará C para el módulo resiliente en servicio obtenido bajo estas condiciones. La tabla 7 presenta los resultados obtenidos con los datos del apique 8.

Tabla 7. Factor de ajuste C, apique 8 (K0+125).

Módulo resiliente en condiciones de servicio a diferentes profundidades				$M_r$	$M_r$
				AASHTO (MPa)	ROHDE (MPa)
				160,90	104,65
hi (m)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$M_r$ (MPa)	Factor C AASHTO	Factor C Rohde
0,10	10,78	20,85	64,80	0,40	0,62
0,20	11,89	17,09	58,98	0,37	0,56
0,30	13,02	14,57	54,70	0,34	0,52
0,40	14,14	12,83	51,50	0,32	0,49
0,50	15,26	11,62	49,15	0,31	0,47
0,60	16,38	10,75	47,38	0,29	0,45
0,70	17,50	10,13	46,05	0,29	0,44
0,80	18,62	9,68	45,08	0,28	0,43
0,90	19,75	9,35	44,36	0,28	0,42
1,00	20,88	9,12	43,83	0,27	0,42
Conforme a AASHTO 0,50 m y $\sigma_d = 6 \text{ Lb/pulg}^2$ 41,40		$\sigma_d$ (kPa)	$M_r$ (MPa)	Factor C AASHTO	Factor C Rohde
		60,40	0,38	0,58	

Fuente: autores.

En este apique, el módulo resiliente retrocalculado por AASHTO es 160,90 MPa, en tanto con el método de Rohde es 104,65 MPa. El módulo determinado en condiciones *in situ* en servicio, a partir de la ecuación constitutiva del material, está en el rango entre 64,80 y 43,83 MPa, evaluado desde la superficie de la subrasante hasta un metro bajo esta, respectivamente.

El módulo resiliente para un esfuerzo desviador de 41,4 kPa, utilizado en el procedimiento descrito por AASHTO (1993), es 60,40 MPa. Este valor se encuentra entre los determinados en servicio a las profundidades de 0,10 y 0,20 m, los cuales registran valores de 64,80 y 58,98 MPa.

El factor de ajuste C se encuentra entre 0,40 y 0,27, tomando como referente el método AASHTO, y entre 0,62 y 0,42 si el método de referencia es el de Rohde.

En este estudio en particular se observa que existe una relación directa entre el esfuerzo desviador, el módulo resiliente en servicio y el factor de ajuste C,

y una relación inversa entre estos tres y la profundidad. Además, el módulo resiliente determinado bajo los lineamientos de AASHTO es similar al obtenido en condiciones de servicio a nivel de la subrasante. Los resultados obtenidos en el apique 8 y los apiques 3 y 6 así lo evidencian.

## F. Factores de ajuste propuestos

Para los suelos muestreados, la tabla 8 muestra la variación del factor de ajuste, al relacionar el módulo resiliente retrocalculado mediante el método AASHTO (1993) y el método de Rohde (1994) con el módulo resiliente de laboratorio evaluado a diferentes profundidades en servicio. Como se mencionó, se observa que en este estudio en particular el factor de ajuste disminuye con la profundidad de evaluación. Asimismo, con base en lo ya mencionado, sobre la similitud entre el módulo determinado de acuerdo con los lineamientos de AASHTO y el módulo en servicio en las proximidades de la superficie de la subrasante, se concluye que el factor de ajuste es similar al nivel superficial de esta capa.

Tabla 8. Factor de ajuste C en función de la profundidad de evaluación

En condiciones de servicio a diferentes profundidades						
AASHTO						
h <sub>i</sub> (m)	Factor C en apique			Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
	3	6	8			
0,1	0,15	0,34	0,4	0,30	0,11	36
0,2	0,14	0,3	0,37	0,27	0,09	35
0,3	0,14	0,28	0,34	0,25	0,09	34
0,4	0,13	0,26	0,32	0,24	0,08	33
0,5	0,13	0,25	0,31	0,23	0,07	32

En condiciones de servicio a diferentes profundidades						
AASHTO						
$h_i$ (m)	Factor C en apique			Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
	3	6	8			
0,6	0,13	0,24	0,29	0,22	0,07	32
0,7	0,13	0,23	0,29	0,21	0,07	31
0,8	0,12	0,23	0,28	0,21	0,06	31
0,9	0,12	0,22	0,28	0,21	0,06	30
1,0	0,12	0,22	0,27	0,21	0,06	30
<i>Promedio método</i>				<i>0,23</i>	<i>0,08</i>	<i>32</i>

En condiciones de servicio a diferentes profundidades						
Rohde						
$h_i$ (m)	Factor C en apique			Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
	3	6	8			
0,1	0,29	0,65	0,62	0,52	0,16	31
0,2	0,27	0,57	0,56	0,47	0,14	29
0,3	0,26	0,52	0,52	0,44	0,12	28
0,4	0,25	0,49	0,49	0,41	0,11	27
0,5	0,25	0,46	0,47	0,39	0,10	26
0,6	0,24	0,45	0,45	0,38	0,10	25
0,7	0,24	0,44	0,44	0,37	0,09	25
0,8	0,24	0,43	0,43	0,37	0,09	24
0,9	0,24	0,42	0,42	0,36	0,09	24
1,0	0,24	0,42	0,42	0,36	0,09	24
<i>Promedio método</i>				<i>0,41</i>	<i>0,11</i>	<i>26</i>

Conforme a AASHTO a 0,50 m y $\sigma_d = 6 \text{ Lb/pulg}^2$						
$h_i$ (m)	Factor C en apique			Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
	3	6	8			
0,5	0,16	0,32	0,38	0,29	0,09	32

Fuente: autores.

Como se puede observar, los resultados del factor de ajuste presentan un coeficiente de variación promedio de 32 y 26%, al tomar como referente el método AASHTO y de Rohde, respectivamente. Esta variación está influenciada por los resultados del apique 3, ya que presentan la mayor desviación con respecto a la media de los datos.

Al considerar que se pudo haber realizado un muestreo incorrecto o se pudo incurrir en algún tipo de error durante el ensayo de  $M_r$  en laboratorio, se descarta el resultado obtenido en la muestra del apique 3. A su vez, con el promedio de los resultados obtenidos en los otros suelos muestreados se proponen factores de ajuste para corregir el módulo de retrocálculo hallado mediante los métodos AASHTO y de Rohde, y hacerlos equiparables con el de los ensayos de laboratorio.

En la relación entre módulos, se ha tenido en cuenta el módulo resiliente en servicio determinado en la parte superficial de la capa de subrasante, por encontrarse que este y el obtenido mediante el procedimiento descrito por AASHTO presentan la mayor correspondencia. Así, los valores obtenidos para el factor C son 0,37 y 0,63, para el  $M_r$  de AASHTO y Rohde, respectivamente.

### G. Comparación de resultados

De acuerdo con lo consignado en la literatura consultada, para el tipo de suelo de subrasante encontrado, el comportamiento del módulo resiliente en función del esfuerzo desviador es atípico. Según las referencias consultadas en suelos cohesivos, “a medida que se incrementa el esfuerzo desviador, el módulo resiliente decrece” (Instituto Mexicano de Transporte [IMT], 1998). Sin embargo, esta situación no se presenta así en el presente estudio; por el contrario, la tendencia es que el módulo de resiliencia aumenta ante incrementos en el esfuerzo desviador.

El comportamiento atípico en el módulo resiliente puede ser explicado con base en lo citado en la siguiente referencia: “Con una humedad del ensayo menor al contenido de agua óptimo - OMC, el módulo resiliente muestra un incremento a medida que el esfuerzo desviador aumenta, humedades mayores al OMC hacen que el módulo resiliente disminuya” (Monzón, 2012).

No obstante, debe indicarse que el contenido de humedad óptimo no fue determinado en el presente estudio, ya que no se llevó a cabo un ensayo de compactación sobre las muestras de suelo recobradas que sirviera de referencia para determinar en qué rama de la curva de compactación estaban las muestras ensayadas.

El factor 0,37, para aplicar al módulo resiliente de la subrasante retrocalculado mediante el método AASHTO, se encuentra entre los valores propuestos en los estudios efectuados por AASHTO (Federal Highway Administration [FHWA], 1997), la Universidad del Estado de Michigan (Baladi, Dawson y Sessions, 2009) y la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile (Higuera, 2010), los cuales son 0.35, 0.41 y 0.45, respectivamente. Estos estudios se realizaron en suelos de subrasante con características similares a las encontradas en el presente proyecto.

## 5. Conclusiones

En este estudio, el módulo resiliente de la subrasante determinado, conforme a los lineamientos recomendados por el método AASHTO (1993), produce resultados semejantes a los obtenidos al evaluar el  $M_r$  en condiciones de servicio a nivel de la superficie del pavimento.

En este estudio en particular, de acuerdo con lo consignado en la literatura internacional y con base en los resultados de la ecuación constitutiva del módulo resiliente del material ensayado, se concluye que el



comportamiento del módulo en función del esfuerzo desviador es atípico, pues es de esperarse que para este tipo de material fino granular, ante un aumento en el esfuerzo desviador, el módulo resiliente disminuya, lo cual no se presenta de esa manera. Esta situación puede ser producto del contenido de humedad en las muestras ensayadas, las cuales es posible se encontraran por debajo del contenido óptimo. Se anota que en el estudio no se realizó una prueba de compactación que permitiera determinar el contenido óptimo de humedad del suelo de subrasante.

El módulo resiliente tiene mayor dependencia del esfuerzo desviador que del esfuerzo de confinamiento. A su vez, en el esfuerzo desviador se nota una mayor dependencia del esfuerzo vertical, debido a la sobrecarga ocasionada por las cargas del tránsito, que de la presión de tierras generada por la estructura de pavimento. Por esta razón, el esfuerzo desviador disminuye con la profundidad, de la misma manera que el esfuerzo vertical lo hace desde el valor de presión de contacto de diseño, hasta disiparse bajo la subrasante. Así, en suelos finos de subrasante con comportamiento típico, el módulo resiliente debe aumentar con la profundidad a la que se evalúe, y la relación entre el módulo de retrocálculo y de laboratorio debe ir aumentando; es decir, que en un punto bajo la subrasante estos dos módulos coinciden.

Al tomar como referente los resultados de los diversos estudios tendientes a establecer la relación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado mediante retrocálculo y en ensayos de laboratorio, se anota que para suelos de subrasante con características similares a las del presente estudio, el valor del factor de ajuste igual a 0,37, obtenido para correlacionar el  $M_r$  determinado mediante el método AASHTO y el  $M_r$  en servicio a nivel de la superficie de la subrasante, se encuentra entre los valores propuestos en los estudios efectuados por la AASHTO, la Universidad del Estado

de Michigan y la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile (0.35, 0.41 y 0.45, respectivamente).

El factor de ajuste C es función del método con que se caracteriza la resistencia de la subrasante y de la ecuación constitutiva del material. Tanto el método de evaluación como la ecuación constitutiva producen resultados variables de acuerdo con las condiciones tenidas en cuenta para su estimación (sensor seleccionado, relación de Poisson asumida, profundidad de evaluación de los esfuerzos, entre otras). Por esta razón, no existe un factor único que relacione los módulos de la subrasante, sino que se debe aplicar de acuerdo con las características de trabajo de la estructura de pavimentos y el método de diseño de pavimentos por implementar.

En este estudio en particular se encontró que el factor que representa la relación entre el módulo resiliente de laboratorio con el obtenido por retrocálculo con el método AASHTO (1993) es 0,37. Al caracterizar la resistencia de la subrasante mediante el método de Rohde (1994), el factor de ajuste por utilizar es 0,63.

## Referencias

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington: Autor.

Baladi, G., Dawson, T. y Sessions, C., (2009). *Pavement subgrade MR design values for Michigan's seasonal changes, Final Report No RC-1531*. Michigan: Universidad del Estado de Michigan.

Federal Highway Administration (FHWA). (1997). *Design pamphlet for the determination of design subgrade in support of the 1993 AASHTO guide for the design of pavement structures. No FHWA-RD-97-083*. Washington: Autor.

Higuera, C. (2010). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 29(28), 73-92.

Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (1998). *Evaluación estructural no destructiva de pavimentos*. Sanfandila: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Monzón, J. (2012). *Influencia del comportamiento viscoso de arcillas sobre el módulo resiliente y la deformación permanente de subrasantes* (trabajo de grado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Rivera, J. *et al.* (2012). Avances en el desarrollo de la metodología para la valoración modular por retrocálculo de capas no ligadas mediante la utilización del light weight deflectometer. *XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*. Córdoba: Asociación Argentina de la Carretera..

Rohde, G. T. (1994). *Determining pavement structural number from FWD testing*. Washington: Transportation Research Record.

Urbáez, E. *et al.* (2004). Estimación del valor "C" incluido en el método AASHTO-93 para el retro-cálculo modular de la sub-rasante. Caso práctico. *III Congreso Venezolano del Asfalto*. Barquisimeto: COVEAS.