

## Factores para el Ajuste de los Módulos de Retrocálculo de Pavimentos Flexibles

### Adjustment Factors for Backcalculated Modulus of Flexible Pavement

Edwin Antonio Guzmán Suárez

Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial- GRINFRAVIAL,  
Facultad de Ingeniería/Escuela de Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC,  
Tunja, Colombia.  
edwin.guzman@uptc.edu.co

Recibido / Received: 30-03-2016 – Aceptado / Accepted: 15-11-2016

#### Resumen

El Deflectómetro de Impacto (FWD) es ampliamente utilizado en la evaluación no destructiva in situ de los módulos de las capas de pavimentos flexibles. Para estimar el módulo de las capas asfálticas, es necesario ajustar las deflexiones o el módulo retrocalculado a la temperatura de referencia. Así mismo, los módulos retrocalculados de las demás capas que conforman la estructura, se deben ajustar con el fin de hacerlos equiparables con los obtenidos en pruebas de laboratorio. Este artículo tiene como objetivo hacer una revisión acerca de los factores existentes para ajustar los módulos obtenidos por retrocálculo, al utilizar la información del cuenco de deflexiones obtenido con FWD, y hacerlos consistentes para su aplicación en pavimentos. Se concluye que existen bastantes investigaciones tendientes a determinar estos factores de corrección, por lo cual es de suma importancia el criterio ingenieril al momento de seleccionar el factor adecuado a aplicar, haciendo posible estimar con buen grado de confiabilidad las condiciones en servicio de las capas de pavimento.

**Palabras clave:** Deflectómetro de impacto, Factor de ajuste, Módulo resiliente, Retrocálculo.

#### Abstract

The Falling Weight Deflectometer (FWD) is widely used in nondestructive assessment of in situ modulus of flexible pavement layers. To estimate the modulus of asphalt layers it is necessary to adjust the deflections or backcalculated moduli to a reference temperature. Likewise, backcalculated modulus of other layers that conform the structure must be adjusted in order to make them comparable to those obtained in laboratory tests. This article aims to make a review on existing factors to adjust the backcalculated modulus, obtained by using information from deflections basin with FWD, and make them consistent for use in pavements. It is concluded that there are many investigations to determine these correction factors, so it is important the engineering criteria when selecting the correct factor to apply, doing possible to estimate with a good degree of confidence the service condition of pavement layers.

**Keywords:** Adjustment factor, Backcalculation, Falling Weight Deflectometer, Resilient modulu.

## I. INTRODUCCIÓN

Dos técnicas son llevadas a cabo en la evaluación de la capacidad estructural in situ de pavimentos flexibles, estas son, la predicción de los módulos de las capas del pavimento y la predicción directa de su capacidad estructural. En la primera técnica se retrocalculan los módulos in situ de todas las capas usando el cuenco de deflexiones obtenido con FWD; en la segunda aproximación, se determina la capacidad estructural global del pavimento a partir del módulo de la subrasante y la deflexión máxima medida al centro de carga del plato del FWD [1], aunque actualmente se han desarrollado técnicas que utilizan información adicional del cuenco de deflexiones.

En ambas técnicas, las deflexiones medidas, o el módulo de las capas retrocalculado, deben ser ajustadas a un tipo particular de sistema de carga y a condiciones ambientales normalizadas para su uso en el estudio de pavimentos. Los factores relacionados con el sistema de carga son la frecuencia y nivel de la carga aplicada con FWD. El factor ambiental más importante que afecta la superficie de pavimentos flexibles, es la temperatura de la capa asfáltica, influyendo en su módulo. En materiales no ligados, sus propiedades de resistencia se ven afectadas, principalmente, por variaciones en el nivel de carga y el contenido de humedad.

El Ajuste de los módulos obtenidos por retrocálculo es imperativo para la implementación de los métodos de diseño de rehabilitación presentados en la Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica (MEPDG), así como en el tradicional método AASHTO 1993. Considerando que los modelos de desempeño en la MEPDG fueron calibrados usando datos de los módulos resilientes de los ensayos de laboratorio, es necesario convertir los módulos resilientes obtenidos con FWD a valores equivalentes de laboratorio.

El artículo tiene significado si se tiene en cuenta que, tradicionalmente en Colombia, en el diseño y rehabilitación de estructuras de pavimento, se recurre a la utilización de factores de ajuste determinados en estudios llevados a cabo en otros países, por lo tanto, es importante hacer una recopilación de estos factores, junto con los obtenidos en investigaciones locales, para ajustar los módulos obtenidos por retrocálculo, dando a conocer sus formulaciones, modo de empleo y resultados de su aplicación, de manera tal que el ingeniero de pavimentos cuente con una fuente de consulta para su selección.

## II. FACTOR DE AJUSTE DEL MÓDULO ASFÁLTICO POR EFECTO DE TEMPERATURA

Los resultados de deflexión del pavimento son dependientes de variaciones ambientales que afectan las capas subyacentes de base y subrasante, los resultados para pavimentos asfálticos son también dependientes de la temperatura de la capa asfáltica. Con el fin de obtener resultados significativos en la capacidad estructural de la capa asfáltica, los módulos retrocalculados deben ser ajustados para tener en cuenta efectos de temperatura y ambientales.

A través de los años, muchos investigadores han desarrollado métodos para medir la temperatura de la mezcla asfáltica y ajustar los resultados de deflexiones por efecto de temperatura, varias de estas metodologías se presentan en el anexo C de la Guía de Rehabilitación de Pavimentos del INVÍAS [2]. También, los módulos retrocalculados deben ser ajustados al módulo esperado a determinada temperatura de referencia o característica de la sección de pavimento que está siendo analizada. A continuación, en las Tablas 1 y 2, se presentan los métodos recopilados durante la revisión bibliográfica realizada, en el artículo estos métodos han sido agrupados en dos categorías, aquellos que prefijan la temperatura de referencia y aquellos en que esta puede ser escogida.

TABLA 1. FACTOR DE AJUSTE CON TEMPERATURA DE REFERENCIA PREFIJADA

Ref	Autor	Expresión	Observaciones	No
[3]	Ullidtz y Peattie (1982)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 1 - 1.384 \log\left(\frac{T_{ca}}{15}\right)$	Tref = 15°C = 59°F Tca, °C	(1)
[4]	Baltzer y Jansen (1994)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.018(20 - T_{ca})}$	Tref = 20°C = 68°F Tca medida a 1/3 espesor capa, °C	(2)
[4]	Kim (1995)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.0275(20 - T_{ca})}$	Tref = 20°C = 68°F Tca medida a 1/3 espesor capa, °C	(3)
[1]	Chile	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.02284(20 - T_{ca})}$	Tref = 20°C = 68°F Tca, °C	(4)
[9]	Noureldin (2005)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1}{1.0000008^{313442 - T_{ca}^3}}$	Tref = 20°C = 68°F Tca medida a 1/2 espesor capa, °F	(5)
[10]	Loizos et al (2015)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.06(T_{ca} - 20)}$	Tref = 20°C = 68°F Tca, °C	(6)
[9]	Agencia de Autopistas Inglesa (2008)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{0.0003(20 - T_{ca})^2 - 0.022(20 - T_{ca})}$	Tref = 20°C = 68°F Tca medida a 10cm espesor capa, °C Tca entre 15 y 25°C	(7)
[5]	Johnson y Baus (1992)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.0002175(70^{1.886} - T_{ca}^{1.886})}$	Tref = 21.1°C = 70°F Tca, °F	(8)
[9]	Ali y López (1996)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.03608145 T_{ca} - 0.75771}$	Tref = 21.1°C = 70°F Tca, °C	(9)
[3]	Chang (2002)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.02822(25 - T_{ca})}$	Tref = 25°C = 77°F Tca medida a 1/2 espesor capa, °C	(10)
[5]	Alexander Kwasi (2003)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.031(T_{ca} - 25)}$	Tref = 25°C = 77°F Tca, °C	(11)
[3]	EVERCALC MICHIPAVE	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.000147362(77^2 - T_{ca}^2)}$	Tref = 25°C = 77°F Tca, °F	(12)
[6]	TxDOT	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{T_{ca}^{2.81}}{185000}$	Tref = 25°C = 77°F Tca, °F	(13)
[7]	Reddy (2003)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1 - 0.238 \log(35)}{1 - 0.238 \log(T_{ca})}$	Tref = 35°C = 95°F Tca, °F	(14)

Fuente: El autor, 2016.

TABLA 2. FACTOR DE AJUSTE CON TEMPERATURA DE REFERENCIA SELECCIONABLE

Ref	Autor	Expresión	Observaciones	No
[5]	Ullidtz (1987)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1}{3.177 - 1.673 \log T_{ca}}$	Tca > 1 °C	(15)
[8]	Lukanen (2000)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{m(T_{ref}-T_{ca})}$	m = -0.0195 para la huella m = -0.021 parte central del carril Tca a 1/2 espesor capa, °C y Tref, °C	(16)
[4]	Jung (1990)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.072(T_{ref}-T_{ca})}$	Tca y Tref, °C	(17)
[3]	Baltzer y Jansen (1994)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1}{1 - 2.2 \log \left( \frac{T_{ca}}{T_{ref}} \right)}$	Tref, °C Tca medida a 1/3 espesor capa, °C	(18)
[3]	Antunes (1993)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1.635 - 0.0317 T_{ref}}{1.635 - 0.0317 T_{ca}}$	Tca y Tref, °C	(19)
[3]	Chen (2000)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{(1.8 T_{ca} + 32)^{2.4462}}{(1.8 T_{ref} + 32)^{2.4462}}$	Tref, °C Tca medida a 1/2 espesor capa, °C	(20)
[9]	Braun Intertec	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.01(T_{ref}-T_{ca})}$	Tca y Tref, °F	(21)
[9]	ELMOD	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.04663(T_{ref}-T_{ca})}$	Tca y Tref, °C	(22)

Fuente: El autor, 2016

Donde:  $E_{ref}$  = Módulo del concreto asfáltico a la temperatura de referencia;  $E_{ca}$  = Módulo del concreto asfáltico retrocalculado;  $T_{ref}$  = Temperatura de referencia;  $T_{ca}$  = Temperatura de la capa de concreto asfáltico.

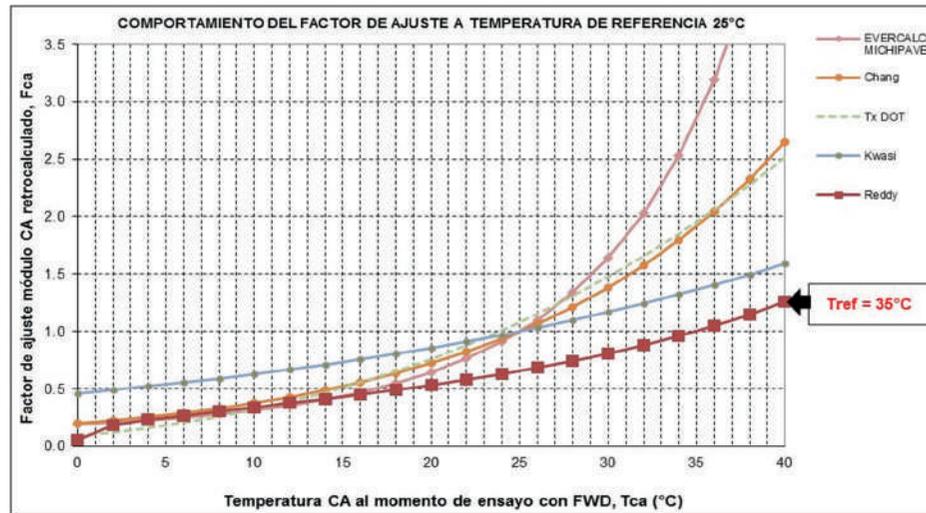
Las siguientes figuras presentan el comportamiento del factor para ajustar el módulo de retrocálculo de la carpeta asfáltica; la Figura 1 muestra las expresiones que emplean como temperatura de referencia valores diferentes a 20 °C. Para ajustar el módulo de la capa asfáltica medido a temperatura superior a 25 °C, el método utilizado por EVERCALC aplica el mayor factor para ajustar el módulo a la temperatura de referencia de 25 °C, los métodos de Chang y TxDOT aplican un factor de similar magnitud, el cual es menor al aplicado por EVERCALC. A su vez, las formulaciones propuestas por Kwasi y Reddy, este último a temperatura de referencia de

35 °C, aplican el menor factor de ajuste al módulo retrocalculado del concreto asfáltico.

En las expresiones de la Tabla 2 se ha seleccionado como temperatura de referencia 20 °C, su comportamiento se presenta en la Figura 2, junto con las expresiones que tienen prefijado este valor de temperatura. En la gráfica se observa que, para llevar el módulo retrocalculado a temperatura de referencia de 20 °C, los métodos de Johnson, Jung, Kim y la Agencia de Autopistas Inglesa, aplican la mayor corrección; los métodos de Baltzer y Chile aplican factores intermedios, entre tanto que las expresio-

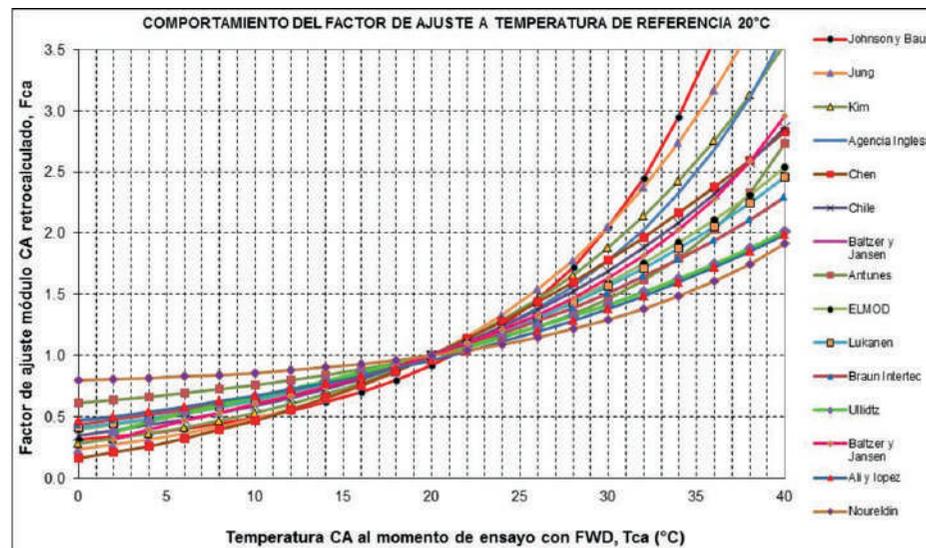
nes propuestas por Ullidtz y Ali y López son más conservadoras. Para módulos retrocalculados con temperaturas medidas inferiores a 20 °C, el factor

para su ajuste varía entre 0.2 y 1.0 para temperaturas medidas durante el ensayo entre 0 y 20 °C, respectivamente.



Fuente: El autor, 2016.

Figura 1. Comportamiento del factor de ajuste a temperatura de referencia 25 °C

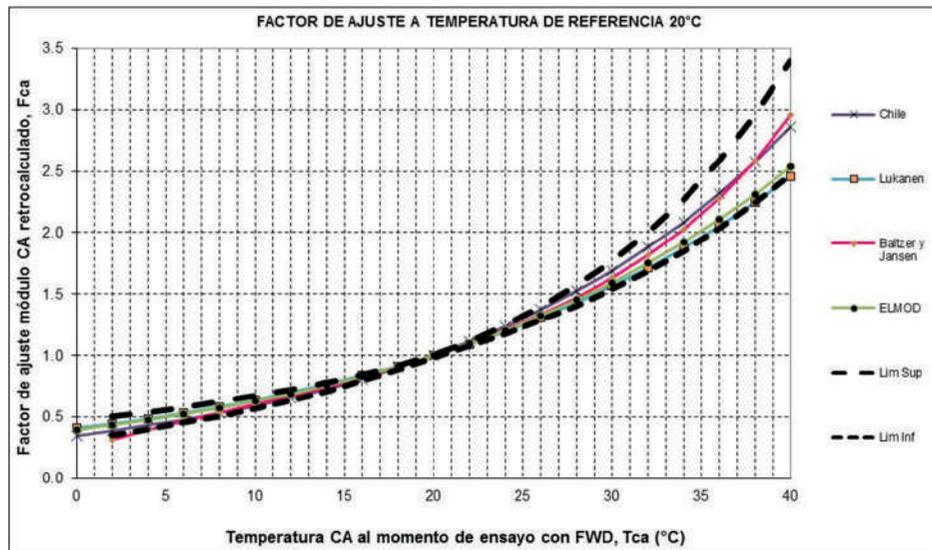


Fuente: El autor, 2016

Figura 2. Comportamiento del factor de ajuste a temperatura de referencia 20 °C

La Figura 3 muestra las expresiones que proponen un factor de ajuste en un intervalo de confianza del 95 %, respecto a la media de los resultados obtenidos

con la aplicación de todas las metodologías consultadas. Estos son los métodos que se recomienda utilizar para el ajuste de los módulos retrocalculados.



Fuente: El autor, 2016.

Figura 3. Métodos en un intervalo de confianza de 95 % en el factor de ajuste a temperatura de referencia 20 °C

### III. FACTOR DE AJUSTE DEL MÓDULO DE CAPAS NO LIGADAS

Si el módulo es determinado mediante el uso de técnicas de retrocálculo, este debe ser multiplicado por un factor de ajuste “C”, 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, y el uso del módulo de retrocálculo resultará en un espesor de pavimento insuficiente para diseños basados en el criterio de serviciabilidad.

El Módulo Resiliente de la subrasante retrocalculado ( $M_r$ ) y el Módulo Resiliente medido en laboratorio ( $M_r$ ) no son iguales por varias razones. La principal razón es que las presiones de confinamiento uniforme y los esfuerzos verticales repetidos usados durante el ensayo en laboratorio, no simulan realmente el confinamiento y estado de esfuerzos a que se ve sometida la subrasante al ser solicitada por la carga del FWD o las ruedas de los vehículos.

Dentro de los principales antecedentes, se encuentran los resultados incluidos en el Método AASHTO 1993, los cuales fueron obtenidos mediante ensayos a los suelos de subrasante del Experimento Vial

AASHTO, el cual se llevó a cabo en los Estados Unidos de América en la década de 1950, y corresponde a un experimento a escala real. Con la finalidad de que las distintas estructuras a evaluar posean una subrasante uniforme, se colocaron los últimos 90 cm de un suelo seleccionado, cuya clasificación HRB era de un suelo tipo A-6, con Capacidad Soporte California (CBR) saturado de laboratorio entre 2 y 4 % [11].

Para este tipo de suelos, se calculó un  $M_r$  de laboratorio igual a 3000 lb/pulg<sup>2</sup>, aplicando un esfuerzo desviador de 6.0 lb/pulg<sup>2</sup>. Sin embargo, usando el procedimiento de retrocálculo del Método AASHTO 1993, el esfuerzo desviador a la distancia “r” para la subrasante es menor que 6.0 lb/pulg<sup>2</sup>, por lo que el Módulo Resiliente determinado por retrocálculo es mayor en comparación con el esperado de 3000 lb/pulg<sup>2</sup>.

La determinación de un factor de ajuste, para hacer consistentes los valores de Módulo Resiliente obtenidos por retrocálculo con la información del deflectómetro de impacto y en laboratorio, es un tema de investigación en varios países, a continuación se anotan los resultados de algunas de las investigaciones tendientes a definir el factor de ajuste contenido en el método AASHTO 1993.

*A. AASHTO 1993*

Dentro de las principales investigaciones tendientes a evaluar el comportamiento de los pavimentos durante su vida útil, destaca el Experimento Vial AASHTO, realizado en los Estados Unidos de América en la década de los 50. Dicho experimento produjo sus primeros resultados en 1960, publicando varias guías interinas – a partir de ese año – hasta 1993 cuando publica la guía definitiva de diseño.

A partir de ensayos realizados en dos estados, se retrocalculó el módulo de la subrasante, y mediante la comparación con los resultados de muestras ensayadas en laboratorio se obtuvieron los resultados de la Tabla 3 para el factor de ajuste en suelos de subrasante fino granular. En este estudio no se investigó la relación existente entre el módulo de retrocálculo y el de laboratorio en suelos granulares.

TABLA 3. FACTOR DE AJUSTE PARA SUELOS DE SUBRASANTE FINO-GRANULARES

Sistema de clasificación		Mr Laboratorio	Mrr Retrocálculo	Factor de ajuste – C
SUCS	AASHTO	MPa	MPa	
ML, CL	A-2, A-4, A-6	48	172	0.28
CL	A-2, A-6	33	156	0.21
CL, SC	A-4	21	189	0.11
SM, ML	A-4, A-2-5	41	93	0.44
CH	A-7-6	41	135	0.31
SM	A-2-4	28	97	0.29
CL, SC	A-4	31	98	0.31

Fuente: Referencia [12]

En definitiva, el método AASHTO 1993 recomienda un valor C de 0.33 para ajustar el valor del Módulo Resiliente por retrocálculo [12], con lo cual la ecuación de Módulo Resiliente de la subrasante queda expresada como se indica a continuación:

$$M_r = C \cdot M_{rr} \quad (23)$$

Donde:  $M_r$  = Módulo Resiliente de la subrasante; C = Factor de ajuste;  $M_{rr}$  = Módulo Resiliente de la subrasante retrocalculado.

*B. Factores De Ajuste Recomendados en el Estudio:* “Design Pamphlet for the Determination of

Layered Elastic Moduli for Flexible Pavement Design in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures”.

Las Tablas 4 y 5 presentan los factores de ajuste para materiales de base y subbase granulares no ligados, así como para terraplenes. Las correcciones o ajustes al módulo elástico equivalente calculado para materiales de base y subbase granulares no ligados, a partir del cuenco de deflexiones medido con FWD, son dependientes de la sección del pavimento [13].

TABLA 4. FACTOR DE AJUSTE PARA CAPAS DE BASE O SUBBASE GRANULAR

Tipo de pavimento	Factor de ajuste "C" promedio	Coficiente de variación, %
Base / subbase granular bajo losas de concreto	1.32	74
Base / subbase granular bajo una capa asfáltica de rodadura o de base	0.62	44
Base / subbase granular entre dos capas estabilizadas con cemento o con productos bituminosos	1.43	80

Fuente: Referencia [13]

Para determinar los valores de C presentados, se empleó la teoría elástica para calcular el estado de esfuerzos a un cuarto de la profundidad (desde la superficie de la capa) del espesor de la capa granular de base o subbase. Las correcciones o ajustes al mó-

dulo elástico equivalente calculado para materiales de terraplén, a partir del cuenco de deflexiones medido con FWD, son dependientes del material sobre el terraplén.

TABLA 5. FACTOR DE AJUSTE PARA CAPAS DE TERRAPLÉN

Tipo de pavimento	Factor de ajuste "C" promedio	Coefficiente de variación, %
Materiales de terraplén bajo una subbase estabilizada.	1.32	80
Materiales de terraplén bajo un pavimento sin una capa de base y/o subbase granular no ligada, y sin subrasante estabilizada.	0.52	37
Materiales de terraplén bajo un pavimento con una capa de base y/o subbase granular no ligada, pero sin subrasante estabilizada.	0.35	49

Fuente: Referencia [13]

C. *Factor de Correlación Recomendado en el Estudio:* “Design Pamphlet for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures”

[14]. El factor de ajuste recomendado en este documento es dependiente del material sobre la subrasante, tal como se indica en la Tabla 6.

TABLA 6. FACTOR DE AJUSTE PARA SUELOS DE SUBRASANTE

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

Fuente: Referencia [14]

Los valores de C presentados fueron determinados usando el espaciamiento entre sensores normalizado en el programa Long Term Pavement Performance (LTPP) llevado a cabo por la Strategic Highway Research Program SHRP (0, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.9, y 1.5 m). Cualquier variación de este espaciamiento normalizado puede tener efecto en los valores de C. Sin embargo, se ha encontrado que esas diferencias son relativamente pequeñas (menores al 15 %) para otros espaciamientos entre sensores comúnmente

usados; sensores igualmente espaciados a 30 cm [14].

E. *Guía para la Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos INVÍAS* [15]. La guía para la rehabilitación de pavimentos asfálticos del INVÍAS presenta la Tabla 7 con los factores promedio para la estimación de los módulos resilientes de laboratorio, a partir de los módulos obtenidos por retrocálculo. Esta Tabla es un resumen de las presentadas anteriormente.

TABLA 7. FACTOR DE AJUSTE PARA CAPAS DE BASE / SUBBASE GRANULAR, TERRAPLENES Y SUELOS DE SUBRASANTE

Tipo de capa	Localización	Factor de ajuste – C
Bases y subbases granulares	Entre dos capas estabilizadas con cemento o con productos bituminosos	1.43
	Debajo de losas de concreto	1.32
	Debajo de capas asfálticas de rodadura o de base	0.62
Terraplenes y materiales de subrasante	Bajo una base estabilizada o un suelo estabilizado	0.75
	Bajo un pavimento asfáltico o rígido sin capas granulares de base o subbase	0.52
	Bajo un pavimento asfáltico o rígido con capas granulares de base o subbase	0.35

Fuente: Referencia [15]

F. Factores de Ajuste Utilizados por Distintos Departamentos de Transporte en Estados Unidos [16]. Basados en los resultados de AASHTO, los departamentos de transporte de diferentes estados han realizado investigaciones independientes

tendientes a desarrollar su propia calibración del factor de ajuste, con el fin de mejorar la eficiencia en el diseño de rehabilitación de pavimentos y reflejar las prácticas locales. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

TABLA 8. FACTOR DE AJUSTE EMPLEADO POR DIFERENTES AGENCIAS DE TRANSPORTE EN ESTADOS UNIDOS

Agencia	Factor de ajuste – C	Observación
AASHTO	0.33	
Departamento de Transporte de Colorado	0.52	
Departamento de Transporte de Idaho	0.35	
Departamento de Transporte de Missouri	0.35	
Departamento de Transporte de Montana	0.50	
Departamento de Transporte de Utah	0.55	Para suelos fino-granulares
	0.67	Para suelos granulares
Departamento de Transporte de Wyoming	0.645	

Fuente: Referencia [16]

G. Estudio Realizado en la Universidad Técnica Federico Santa María - Chile. El estudio experimental consistió en comparar el Módulo Resiliente de subrasante obtenido mediante el deflectómetro de impacto y el obtenido en laboratorio. Los suelos evaluados en este estudio fueron clasificados como A-2-4 y A-2-6, en el sistema AASHTO; para que los resultados fueran comparables, los ensayos se realizaron sobre el suelo en condiciones físicas similares bajo estados de esfuerzos equivalentes [17].

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. 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. En este estudio 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.

H. *Estudio de la Universidad del Estado De Michigan*. Para cada tipo de suelo, la Tabla 9 provee una lista con la relación entre el valor del Mó-

dulo Resiliente retrocalculado promedio, usando los datos de las medidas de deflexiones, y el promedio obtenido en el laboratorio [18].

TABLA 9. FACTOR DE AJUSTE PARA SUELOS DE SUBRASANTE DE ACUERDO CON EL TIPO DE SUELO

Sistema de clasificación		Resultados de laboratorio		Resultados del retrocálculo		Factor de ajuste - C
SUCS	AASHTO	Número de ensayos	Mr promedio MPa	Número de ensayos	Mrr promedio MPa	
SP1	A-1-a	16	199	1499	190	0.96
	A-3					
SP2	A-1-b	10	176	563	172	0.98
	A-3					
SP-SM	A-1-b	8	145	364	140	0.96
	A-2-4					
	A-3					
SC-SM	A-2-4	7	160	1924	139	0.87
	A-4					
SC	A-2-6	16	129	1517	147	1.14
	A-6					
	A-7-6					
SM	A-2-4	17	117	370	170	1.45
	A-4					
CL	A-4	9	256	774	104	0.41
	A-6					
	A-7-6					
ML	A-4	4	169	23	110	0.65
Promedio						0.93

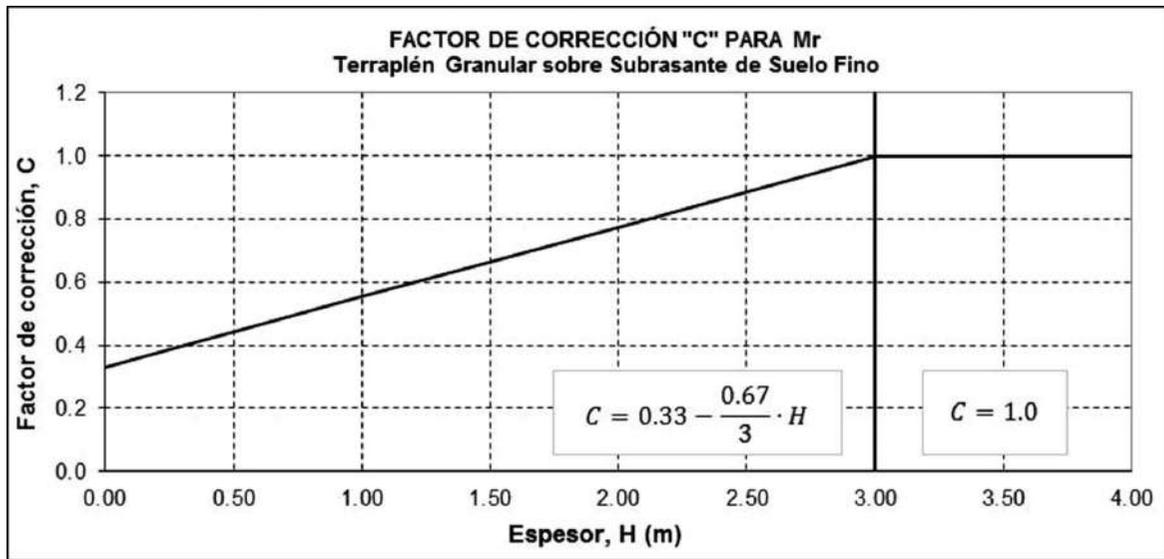
Fuente: Referencia [18]

I. *Estudio de la Universidad del Rosario - Argentina* [19]. 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 un factor igual a 0.68. Los suelos evaluados corresponden a suelos de subrasante clasificados en el sistema de clasificación de la AASHTO como A-6 y A-7-6.

J. *Estudio en Chile*. El factor C propuesto por la guía AASHTO es 0.33 para suelos finos, sin embargo no se propone un valor para suelos granulares. En estudios realizados por la universidad de Arizona, se ha encontrado que el factor C para diversos tipos de suelos puede variar entre 0.54 y hasta 1.80

(Houston *et al.*, 1992). Con base en la revisión bibliográfica, para suelos finos se puede considerar un factor de 0.33; y para suelos granulares, de 1.00. En el caso de pavimentos compuestos, el valor de C a utilizar es un valor entre el rango de 0.33 a 1.00, el cual se determina a partir de la corrección del módulo como se describe a continuación [20].

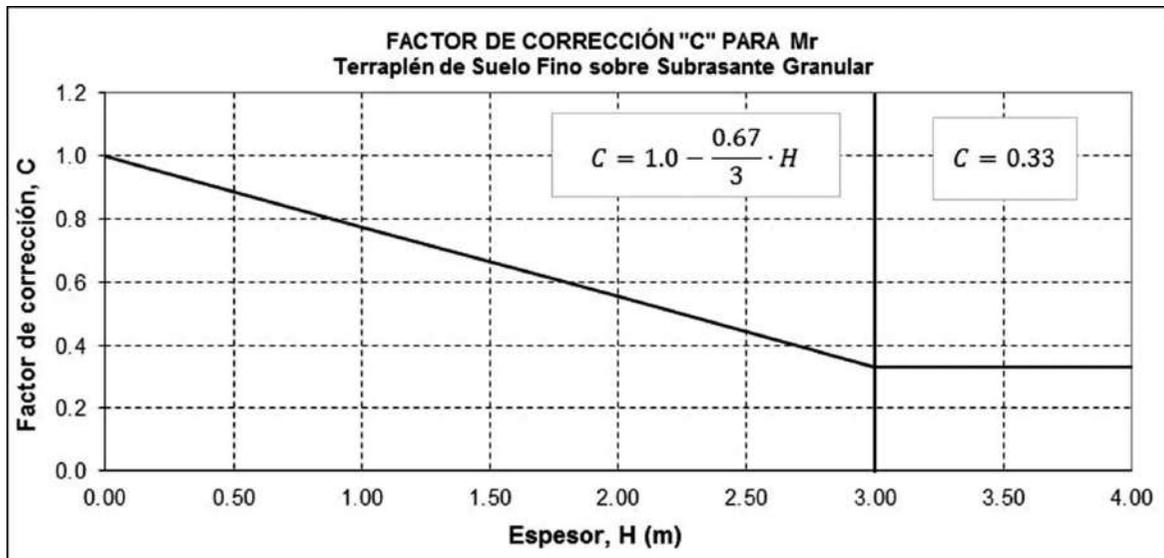
- Terraplén de suelos finos sobre subrasante de suelos finos: C = 0.33
- Terraplén de suelos granulares sobre subrasante de suelos granulares: C = 1.00
- Terraplén de suelos granulares sobre subrasante de suelos finos:



Fuente: Referencia [20]

Fig. 3. Factor de ajuste terraplén granular sobre subrasante de suelo fino

- Terraplén de suelos finos sobre subrasante de suelos granulares:



Fuente: Referencia [20]

Fig. 4. Factor de ajuste terraplén de suelo fino sobre subrasante granular

*K. Estudio Instituto de Transporte de Texas [21].* Se documentan los estudios hechos para evaluar los factores de corrección aplicables a los materiales para pavimentos en Florida. El proyecto recomienda los factores de ajuste para determinar el módulo equivalente de laboratorio dado el correspondiente módulo retrocalculado en materiales de base, subrasante estabilizada y terraplén. El factor de ajuste fue evaluado a diferentes profundidades en cada una de las capas, sin embargo, aunque pruebas estadísticas de significancia mostraron diferencias entre los factores determinados a diferentes profundidades, la magnitud de estas diferencias dentro de un intervalo de confianza del 95 % no fue lo suficientemente significativa, por lo que se optó por combinar los datos del factor de ajuste determinados en las diferentes profundidades de cada capa, con el fin de generar los siguientes modelos de regresión del factor de corrección en función del módulo retrocalculado de cada capa.

- Capa de base

$$C = 10.503 \cdot M_{rr}^{-0.855} \quad (24)$$

- Capa de subrasante estabilizada

$$C = 8.041 \cdot M_{rr}^{-0.848} \quad (25)$$

- Capa de terraplén

$$C = 7.837 \cdot M_{rr}^{-0.833} \quad (26)$$

Donde: C = Factor de ajuste;  $M_{rr}$  = Módulo Resiliente retrocalculado.

*L. Estudio Departamento de Transporte de Mississippi.* La referencia [22] cita que en un estudio efectuado por K.P George, auspiciado por el Departamento de Transporte de Mississippi, se recomendó el uso de los siguientes factores según el tipo de suelo existente de subrasante: 0.65 para suelos finos y 0.51 para suelos granulares.

A nivel local, se han realizado pocos estudios tendientes a determinar la relación existente entre el Módulo Resiliente de retrocálculo y el determinado basados en pruebas de laboratorio, a continuación tres de estos estudios.

*M. Estudio “Comparación del módulo resiliente de la subrasante obtenido a partir de deflexiones de impacto y mediante ensayos de laboratorio en un proyecto vial del departamento de Cundinamarca”.* En este estudio efectuado en el primer semestre de 2010 se evaluó un tramo de 10 Km mediante deflectometría. El Módulo Resiliente retrocalculado se comparó con el ensayo de Módulo Resiliente de laboratorio para dos abscisas. Del estudio, se concluye que para una de las abscisas en que se comparó el resultado la variabilidad fue escasa, mientras que en la otra abscisa evaluada se presentó una variación del 64 % entre el módulo retrocalculado y de laboratorio [23].

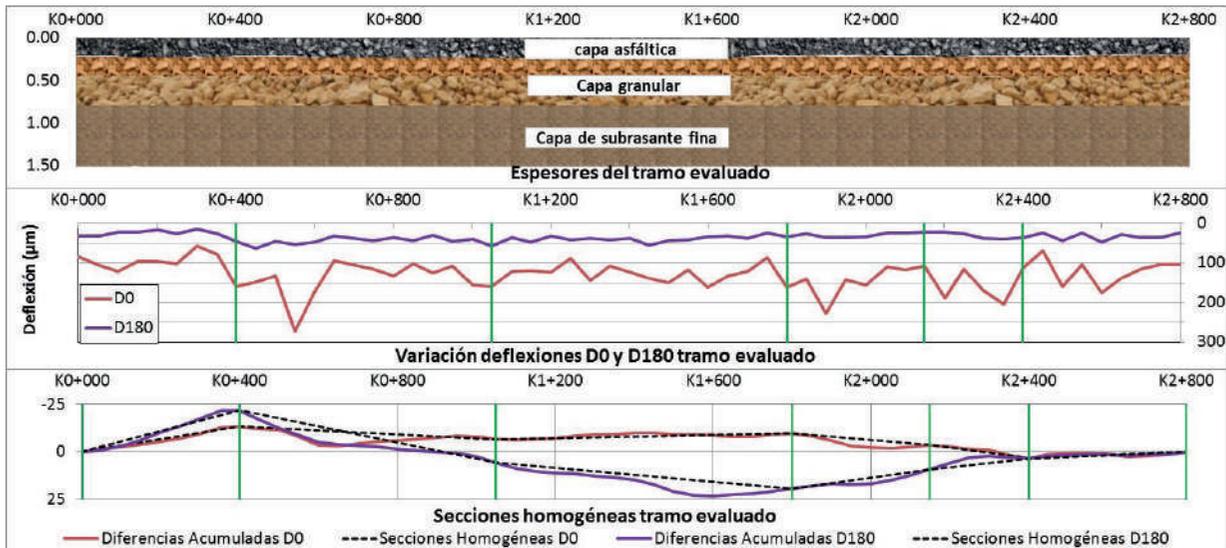
*N. Estudio “Relación entre el Módulo Resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio”.* El estudio se desarrolló en un proyecto de maestría en el año 2010. En él se realizó la evaluación estructural del pavimento en 8 puntos de ensayo mediante deflectometría, y se comparó los módulos para cada una de las capas con los obtenidos en los ensayos de laboratorio; el estudio encontró que para el material de subrasante, que correspondió a un material granular remanente, el factor de ajuste para el módulo es de 0.65; para el material de subbase granular, es igual a 0.24; y para el material de base granular, es igual a 0.17 [22].

*O. Estudio “Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado – factor de ajuste “C”.* El grupo de investigación y desarrollo en infraestructura vial - GRINFRAVIAL - de la Escuela de Transporte y Vías, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, desarrolló un proyecto para determinar el factor de correlación entre el Módulo Resiliente determinado mediante retrocálculo y el obtenido en pruebas de laboratorio. Este estudio se llevó a cabo sobre muestras de suelo de subrasante natural, correspondientes a arcillas de baja plasticidad (CL), encontrándose que el factor que representa la relación entre el Módulo Resiliente de laboratorio y el retrocalculado, al utilizar el método AASHTO 1993, es 0.37 [24].

IV. RESULTADOS

Los resultados de aplicar los factores de ajuste recopilados durante la revisión bibliográfica, se analizaron con base en la información deflectométrica y de espesores levantada en un tramo de pavimento flexible localizado en el departamento de Cundinamarca, tal como lo muestra la Figura 5, la cual

además incluye la definición de las secciones homogéneas en función de la deflexión central (D0) y la medida a 180 cm del eje del plato de carga del FWD (D180), esta definición se ha hecho mediante el método de diferencias acumuladas, recomendado por la guía de diseño AASHTO 1993, y que se establece en el Anexo E de la guía para la rehabilitación de pavimentos del INVÍAS [15].



Fuente: El autor, 2016

Fig. 5. Espesores, deflexiones d0, d180 y secciones homogéneas del tramo evaluado

En cada sección homogénea definida, estadísticamente se ha obtenido el cuenco característico, representativo del comportamiento estructural de la sección, y a partir de la información de-

flectométrica de cada cuenco se han retrocalculado los módulos de las capas de la estructura de pavimento. Los resultados se exhiben en la Tabla 10.

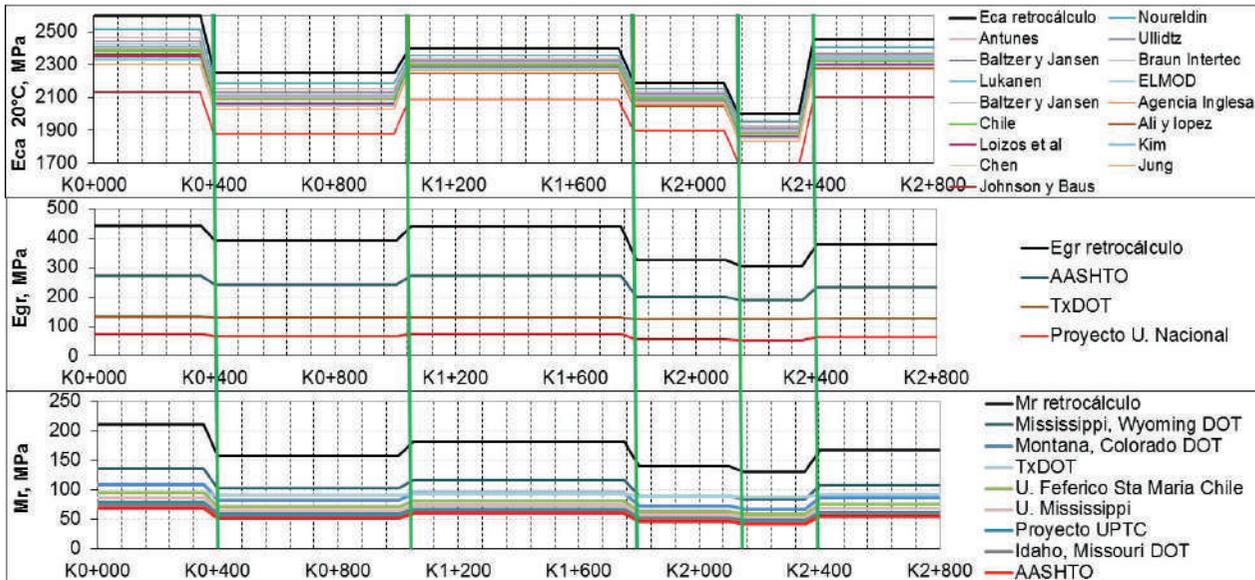
TABLA 10. MÓDULOS DE RETROCÁLCULO

Sección homogénea	Abscisa inicial	Abscisa final	T <sub>ca</sub> (°C)	T.Aire (°C)	Módulos de retrocálculo sin afectar		
					MPa		
					Ca	gr	Sr
1	K0+000	K0+400	18.3	13.50	2,600	440	210
2	K0+400	K1+050	18.5	13.70	2,251	390	158
3	K1+050	K1+801	19.2	14.30	2,396	437	181
4	K1+801	K2+150	19.1	14.20	2,189	324	140
5	K2+150	K2+401	18.8	13.90	2,000	305	130
6	K2+401	K2+800	18.9	14.00	2,454	376	168

Donde: T<sub>ca</sub> = Temperatura de la capa de concreto asfáltico; ca = Capa concreto asfáltico; gr = Capa material granular; sr = Capa de subrasante

Los módulos de retrocálculo han sido afectados por los factores de ajuste recopilados en la revisión bibliográfica. Al respecto se anota que, el módulo de la capa asfáltica se corrigió a una temperatura de referencia igual a 20 °C, la capa de base corresponde a un material granular sin estabilizar y la subrasante está conformada por

suelos cohesivos. El resultado de los módulos ajustados de cada capa se presenta en la Figura 6, esta contiene los módulos de retrocálculo y su variación al aplicar el factor propuesto en cada investigación; las series están organizadas en orden descendente en función del método que menor corrección realiza.



Fuente: El autor, 2016

Fig. 6. Módulos de retrocálculo ajustados mediante varios factores

### V. DISCUSIÓN

A partir del módulo de retrocálculo, se pueden obtener diferentes valores para el módulo ajustado, dependiendo del factor utilizado, de acuerdo con lo propuesto en varias investigaciones. Para la corrección del módulo de la capa asfáltica por efecto de temperatura, se recopilaron 22 metodologías, todas realizadas en estudios llevados a cabo en el extranjero. El factor de ajuste propuesto por cada metodología presenta mayor desviación, con respecto a la media de los resultados, conforme la temperatura medida se aleja de la temperatura de referencia, siendo mayor la desviación para temperaturas superiores a 20 °C, razón por la cual los módulos ajustados se presentan diferentes de acuerdo con la metodología empleada.

No se encontraron suficientes investigaciones tendientes a determinar la relación entre el módulo re-

trocalculado y el de laboratorio en capas granulares intermedias, esta situación puede obedecer a que de todos los módulos que se obtienen por retrocálculo, el de las capas granulares suele ser el que mayores inconsistencias presenta, por lo cual se recomienda verificar el valor obtenido con expresiones simplificadas en función de la ley de dependencia de esfuerzos de estos materiales. Con base en la premisa anterior, se podría justificar las significativas diferencias presentadas en el factor de ajuste propuesto en los estudios del TxDOT y el proyecto llevado a cabo en la Universidad Nacional de Colombia, los cuales de ser implementados castigarían demasiado la respuesta estructural de las capas granulares intermedias.

Varias investigaciones han sido encaminadas a determinar la relación entre el módulo de retrocálculo y el de laboratorio en suelos de subrasante; a partir de ellas, se puede inferir que, ante la situación de

decidir qué factor utilizar, primero se debe definir si la subrasante es el suelo natural o corresponde a un terraplén; enseguida, se debe conocer acerca del tipo de suelo, básicamente, si se trata de suelos finos o granulares; una vez definidas estas condiciones, el factor a aplicar aumentará de 0.33 a 1.00, si se trata de un terraplén granular sobre suelos de subrasante finos, o si el tipo de suelo presente en la subrasante natural cambia de fino a granular.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen bastantes investigaciones internacionales tendientes a determinar los factores para ajustar los módulos de retrocálculo de las capas de pavimento, sin embargo, a nivel local la investigación es escasa, por lo tanto, al momento de seleccionar el factor a aplicar, basado en estudios extranjeros, es de suma importancia el criterio ingenieril para estimar con buen grado de confiabilidad las condiciones en servicio de las capas de pavimento, al aplicar el factor adecuado.

Estos factores de ajuste a las condiciones in situ deberían ser aplicados únicamente al módulo retrocalculado usado en procedimientos de diseño de rehabilitación y evaluación estructural de pavimentos para los que fueron desarrollados, calibrados y validados mediante el uso del módulo medido en laboratorio, sin embargo, ante la falta de investigaciones locales son una buena referencia.

Para ajustar el módulo retrocalculado de la capa asfáltica, se recomienda utilizar una expresión que permita seleccionar la temperatura de referencia, debido a que muchos proyectos se realizan en zonas donde la temperatura de trabajo de la mezcla asfáltica es diferente a la habitualmente tomada como referencia, 20 °C. Ante la falta de investigaciones propias, las expresiones que se recomiendan para corregir el módulo retrocalculado son la de Lukanen, ELMOD y Baltzert y Jansen, las cuales aplican un factor corrector que se encuentra en un intervalo de confianza del 95 % de la media de los resultados obtenidos con las metodologías consultadas, el uso de estas expresiones no sobrevalora, ni desvirtúa el aporte y capacidad estructural de la capa asfáltica.

La revisión bibliográfica evidencia experiencias internacionales, y algunas nacionales, en la evaluación estructural de la subrasante y la determinación del factor de ajuste en suelos finos y granulares. Sin embargo, en suelos intermedios las experiencias son escasas, por lo cual es altamente recomendable conocer la relación existente entre el módulo de retrocálculo y el de laboratorio, en suelos de subrasante arenosos, limosos, limo-arenosos, y mezclas de estos con suelos finos.

## REFERENCIAS

- [1] Y.R. Kim, B.O. Hibbs and C.Y. Lee, Temperature correction of deflection and backcalculated asphalt concrete moduli, Transportation Research Record 1473, 1995, pp. 55-62.
- [2] COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos para carreteras - Anexo C, Bogotá, 2008, Anexo C.
- [3] H. Akbarzadeh, A. Bayat and H. Soleymani, “Analytical Review of the HMA Temperature Correction Factors from Laboratory and Falling Weight Deflectometer Tests”, International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 5, no. 1, pp. 30-39, 2011.
- [4] E.G. Fernando, W. Liu and D. Ryu, Development of a procedure for temperature correction of backcalculated AC modulus, Federal Highway Administration/Texas Transportation Institute Report 1863-1, Texas: Texas Transportation Institute, 2001, pp. 96-98.
- [5] A.K. Appea, “Validation of FWD testing results at the Virginia smart road: Theoretically and by instrument responses”, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2003, pp. 43-44.
- [6] D.H. Chen et al., Temperature correction on Falling Weight Deflectometer measurement.

- Transportation Research Record 1716: Paper N° 00-1428, 2016, pp. 37-38.
- [7] K. Koti, Guidelines for structural evaluation and strengthening of flexible road pavements using Falling Weight Deflectometer (FWD) technique. IRC 115 – 2014, Indian Road Congress, New Delhi. Jan., 2014, pp. 16-17.
- [8] E.O. Lukanen, R.N. Stubstad and R. Briggs, Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement, Publication No. FHWA-RD-98-085, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA, 2000, pp. 68.
- [9] C. Plati, V. Papavasiliou, A. Loizos and C. Tsaimou, Implementation of algorithms for asphalt moduli temperature correction. Proceeding of the 21 international conference on asphalt pavement, Raleigh, North Carolina, 1-5 June 2014, pp. 440-442.
- [10] A. Loizos, V. Papavasiliou, C. Plati and C. Tsaimou. Temperature correction of HMA moduli base on in situ pavement data. Proceeding of 6th International Conference “Bituminous Mixture and Pavement”, Thessaloniki, Greece, 10-12 June 2015.
- [11] C. Maylin, U. Ernesto and C. Gustavo, Manual de evaluación de pavimentos. Universidad Nacional de Ingeniería. Venezuela, 2009, pp. 7-41.
- [12] AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC:US, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993. Apendice L, L-13.
- [13] FHWA. Design pamphlet for the determination of layered elastic moduli for flexible pavement design in support of the 1993 AASHTO guide for the design of pavement structures, No FHWA-RD-97-077, Federal Highway Administration, 1997, p. 3.
- [14] FHWA. 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. Federal Highway Administration, 1997, p. 16.
- [15] COLOMBIA. Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos para carreteras. Bogotá, 2008, p. 371.
- [16] N. Kam, D. Hellrung, K. Ksaibati y S. Wulff, Systematic back-calculation protocol and prediction of resilient modulus for MEPDG. International journal of pavement engineering, 2016, p. 11.
- [17] M.P. Acevedo et al., Relación entre el módulo resiliente determinado mediante deflectómetro de impacto y el de laboratorio. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- [18] G. Baladi and T. Dawson, Session, Pavement subgrade MR design values for Michigan's seasonal changes, Final Report No RC-1531, Michigan State University, East Lansing, Michigan, 2009, p. 105.
- [19] U. Ernesto et al., Estimación del valor “C” incluido en el método AASHTO-93 para el retro-cálculo modular de la sub-rasante. Caso práctico. En: III Congreso Venezolano del Asfalto. Venezuela, 4: 6-9 octubre, 2004: Barquisimeto, Venezuela, Memorias, Barquisimeto, COVEAS, 2004, pp. 16.
- [20] CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN - CORPORACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN. COMISIÓN DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS, Recomendaciones para el diseño de pavimentos en Chile según AASHTO. Informe N° 1, Uso de los resultados del deflectómetro de impacto en el método de diseño AASHTO 1993, Chile, octubre de 1996, p. 20.

- [21] H. Jeong and G. Emmanuel, Comparison of resilient modulus values used in pavement design, Final Report BDL76-1, Texas Transportation Institute, Tallahassee, Florida, Ene., 2011.
- [22] L. Mario, “Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio”, Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, 2010, pp. 68-75.
- [23] B. Bonilla de La Torre y M. Rojas, “Comparación del módulo resiliente de la subrasante obtenido a partir de deflexiones de impacto y mediante ensayos de laboratorio en un proyecto vial del departamento de Cundinamarca”, Trabajo de grado de Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Bogotá, Colombia: Universidad Nueva Granada, Facultad de Ingeniería Civil, Escuela de Posgrados, 2010, p. 57.
- [24] E.A.Guzmán y C.H. Higuera, “Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado, factor de ajuste C”, Ingenio Magno, vol. 7, no. 1, pp. 62-83, 2016.