

EXPERIENCIAS DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO EN EL CONTROL DE CONSTRUCCIÓN DE LAS DIFERENTES CAPAS DE PAVIMENTO

Conociendo la dificultad en Colombia para la consecución de presupuestos en conjunto con la falta de cultura de los entes gubernamentales para el mantenimiento de las vías, resulta imperioso ejecutar las obras de construcción de vías con una calidad total. Para lograr esta calidad total, entre otros aspectos es indispensable realizar un exhaustivo control de calidad en cada una de las etapas que conforman la construcción de un pavimento.

Una forma eficaz de control de calidad durante la construcción de una estructura de pavimento es realizar mediciones de deflexión durante la ejecución de cada capa que conforma la estructura. Es así que con el deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer-FWD), es posible obtener varios resultados en diversas estaciones para poder observar la calidad del material colocado y su homogeneidad.

A partir de estos resultados y aplicando las teorías empíricas es posible retrocalcular el Número Estructural Efectivo de la capa y/o pavimento ($SN_{efectivo}$) y así verificar el Número Estructural Proyectado en el diseño versus el Número Estructural Efectivo que se logra durante la construcción ($SN_{efectivo}$ vs $SN_{diseño}$).

Según la AASHTO, el Número Estructural (SN) es la sumatoria del producto del aporte estructural y el espesor de cada capa, y siguiendo el Manual de 1993, es igualmente posible conocer el SN a partir de ensayos No Destructivos, (Nondestructive Deflection testing, NDT).

El cálculo del $SN_{efectivo}$ es posible realizarlo mediante la metodología de la AASHTO (Manual de 1993) o por la formulación de Gustav Rohde (presentada en la Transportation Research Board Meeting de 1994).

La evaluación y análisis del $SN_{efectivo}$ se realizó en varios tramos de vías urbanas de la ciudad de Bogotá (Colombia), sobre las diferentes capas durante la construcción del pavimento. Las vías estudiadas estaban siendo intervenidas e incluían desde rehabilitación a nivel de base granular hasta una reconstrucción total.

El presente trabajo plasma los resultados obtenidos con las dos metodologías a fin de corroborar por medio del método de componentes de la AASHTO el nivel de veracidad de una u otra metodología. Para el caso de la experiencia de los autores en Colombia, el método de Gustav Rohde ha cerrado bastante bien,

al punto de emplearlo seguidamente en los proyectos de rehabilitación, a diferencia de la formulación AASHTO.

Una consecuencia adicional y valiosa del cálculo del $SN_{efectivo}$ es la calibración de los coeficientes de aporte estructural usados y recomendados por la prueba AASHTO en las diferentes capas que conforman la estructura de pavimento. Estos resultados presentan una primera estadística para la ciudad de Bogotá.

Estos trabajos de control se iniciaron vagamente más como concepto de calidad de obra de los constructores, pero luego se ha ido requiriendo el concepto por parte de la entidad contratante y los mismos supervisores de obra.

Por lo tanto, este trabajo forma parte de una etapa nueva del control de calidad de obra en Colombia al contar con tecnología de punta.

Las conclusiones de este trabajo son preliminares y se enmarcan mayoritariamente para las zonas de suelos y materiales utilizados en Bogotá.

INTRODUCCION

La Empresa Technology and Management TNM LTD, desde 1996 en la Sucursal de Colombia, ha medido con deflectometría la totalidad de la red vial pavimentada a cargo del Instituto Nacional de Vías en dos ocasiones, así como otros miles de kilómetros de vías a nivel urbano y rural. La red vial de Colombia pavimentada tiene 9456 kms. Así mismo, en Guatemala se ha medido en deflectometría la red vial de la misma que abarca 4500 kms.

Durante el año en curso se realizaron mediciones de deflectometría en la red urbana de Bogotá (longitud medida :3000 km calzada cada 50 m), como parte del trabajo de inventario de la malla vial de Bogotá; trabajo contratado por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). Como forma de verificar los resultados de deflectometría para el trabajo de malla vial, se seleccionaron diferentes vías de la ciudad, las cuales se encontraban en rehabilitación y en las cuales se hicieron mediciones de deflexión sobre las diferentes capas que conforman la estructura de pavimentos. Las vías seleccionadas estaban conformadas por diversidad de estructuras, encontrando materiales granulares, materiales estabilizados con cemento, materiales estabilizados con emulsión asfáltica y cemento, y mezclas asfálticas en caliente.

El control de calidad de la construcción de pavimentos en sus diferentes capas constitutivas utilizando las deflexiones producto del equipo FWD es perfectamente realizable por las correlaciones existentes entre los modelos AASHTO y ROHDE, calculando el aporte estructural de cada capa.

TO (FWD) EMPLEADO PARA NTES CAPAS DE UN PAVIMENTO

Ing. Carol Bockelmann, Technology and Management, TNM LTD Colombia

Ing. Jorge Armando Paz, Asesoría y Consultoría Ltda. PAZ INGENIEROS Colombia

METODOLOGIA APLICADA

Varios son los medios utilizados para medir las deflexiones producidas en el pavimento por cargas controladas, para fines de evaluar las capacidades de soporte. El más usado actualmente y luego de haberse perfeccionado durante más de dos décadas, es el deflectómetro de impacto. La compañía TNM, sucursal Colombia cuenta con un Deflectómetro de Impacto (FWD 8000), de la Cia. Dynatest. Este consiste en aplicar una carga dinámica (variable entre 2 t y 12 t) en el pavimento causada por la caída de una masa sobre un plato circular (de diámetro 30 cm) cuya superficie de contacto se asemeja al de la rueda de un camión. Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos en unidad de micrones (milésimas de milímetros) en siete puntos cada uno separado de la carga a una distancia de 30 cm, teniendo en cuenta que el primer geófono se encuentra bajo el punto de aplicación de la carga (Ver esquema general de trailer de medición).

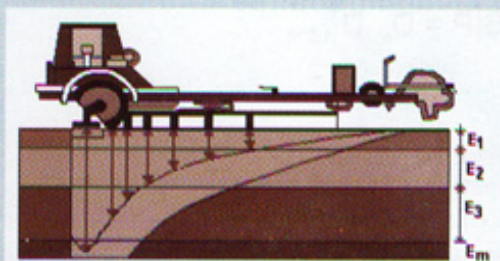


Figura 1: Esquema general del trailer de medición (FWD8000)

La magnitud de la carga es registrada en KN o KPa por otro sensor ubicado en el centro del plato de carga durante el instante que la carga es aplicada al pavimento. En cada estación se miden tres veces las deflexiones producidas por la caída de la carga. La triple aplicación de la carga permite verificar la posibilidad de repetición de deflexiones similares sobre el mismo punto y ejecutar nuevamente una medición en el mismo instante en que se observe dispersión en el resultado.

La captación de los efectos deflectivos en el instante de aplicación de la carga es registrada automáticamente por una computadora portátil presente en el vehículo que remolca el deflectómetro, la cual se consigna en archivos para ser procesados en la oficina por el software que analiza los resultados.

Tal como se comentó anteriormente, el cálculo del $SN_{efectivo}$ es posible realizarlo mediante la metodología de la AASHTO a partir de mediciones NDT (Manual de 1993) o por la formulación de Gustav Rohde (presentada en la Transportation Research Board Meeting de 1994). Se recuerda que adicionalmente existe otra metodología para el cálculo del $SN_{efectivo}$ propuesta por AASHTO que es con base en la observación visual.

En la tabla que se presenta a continuación se muestran los sectores de vías urbanas de la ciudad de Bogotá, Colombia, a las cuales se les realizó un seguimiento constructivo mediante toma de deflexiones a fin de valorar por medio del método de componentes de la AASHTO el nivel de veracidad de la metodología de la AASHTO (Manual de 1993) y la formulación de Gustav Rohde para el retrocálculo del $SN_{efectivo}$. En general se realizaron mediciones cada 10 m calzada alternando en los dos carriles de circulación.

No VIA	LOCALIZACION	LONGITUD (Km)	ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS EJECUTADA
1	Calle 53 entre carreras 9 y 13	0,3	Subbase, base y mezcla densa caliente
2	Autopista Bogotá - Briceño	0,4	Subbase, base y mezcla densa caliente
3	Carrera 13 entre calle 22 y 32	0,3	BEC y mezcla densa en caliente
4	Carrera 9 entre calle 92 y 95	0,7	BEAC y mezcla densa en caliente
5	Carrera 11 entre calles 64 y 72	0,8	BEAC y mezcla densa en caliente
6	Avenida el Dotado entre Avenida Bocayá y Aeropuerto	2	BEC y mezcla densa en caliente
7	Carrera 10 entre calles 22 y 26	0,3	Subbase, base y mezcla densa caliente

BEC* Base estabilizada con cemento

BEAC Base estabilizada con 3% de cemento y 6% de emulsión

Tabla 1: Localización vías y descripción de las capas medidas con FWD.

CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO Y DE LOS COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA

De manera informativa, las vías nombradas como 1, 2 y 3 presentan un análisis con mediciones realizadas a nivel de estructura terminada. Para este análisis se calcula el $SN_{efectivo}$ tanto por AASHTO como por Rohde y se compara contra el $SN_{diseño}$ (proyectado por el diseñador).

Por otro lado, las vías del 4 al 7 presentan además del análisis mencionado, un análisis por capa, dado que se realizaron mediciones en cada capa de la estructura a construir. Para las

mediciones se llevó un control topográfico del sitio de aplicación de la carga para cada capa ensayada.

Inicialmente se procede a explicar el cálculo del SN_{efectivo} tanto por la metodología AASHTO como por la metodología ROHDE.

3.1 Cálculo del número estructural efectivo (SN_{efectivo}) mediante la metodología AASHTO

La guía para diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO de 1993 presenta la metodología para el cálculo del SN_{efectivo} a partir de medidas de deflexión tomadas con el Deflectómetro de Impacto.

Inicialmente se emplea la fórmula para retrocálculo para hallar el módulo resiliente de la subrasante, M_r . Se recuerda que la metodología AASHTO conceptúa que las deflexiones producidas en la superficie del pavimento a una suficiente distancia del plato de carga, son debidas a la deformación de la subrasante solamente y también son independientes del tamaño del plato de carga, casi enteramente, y no enteramente porque los límites del bulbo de tensiones no son tan definidos como en la teoría.

El cálculo del Módulo es como sigue:

$$Mr = \frac{0.24 * P}{d_r * r}$$

Donde:

M_r = Módulo resiliente de la subrasante retrocalculado, en psi.

P , es la carga aplicada en libras.

d_r , es la deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga, en pulgadas y

r , es la distancia desde el centro del plato de carga, en pulgadas.

Ahora, otro cálculo previo es el módulo equivalente de la estructura de pavimento,

$$d_o = 1.5 * p * a * \left[\frac{1}{M_r \sqrt{1 + \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}}}} + \frac{1}{\frac{E_p}{\sqrt{1 + \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}}}}} \right]$$

Donde:

M_r = Módulo resiliente de la subrasante retrocalculado, en psi.

P , es la carga aplicada en libras.

a , es el radio del plato de carga en pulgadas.

D , es el espesor total de las capas del pavimento arriba de la subrasante, en pulgadas.

E_p , es el módulo efectivo de todas las capas del pavimento arriba de la subrasante, en pulgadas.

Finalmente el cálculo del SN_{efectivo} se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$SN_{\text{Efectivo}} = 0.0045 * D * \sqrt[3]{E_p}$$

3.2 Cálculo del número estructural efectivo SN_{efectivo} mediante la metodología ROHDE

Gustav Rohde, ingeniero consultor de la VWL, radicado en Sudáfrica presentó esta metodología en la Transportation Research Board Meeting en 1994.

Para investigar la hipótesis y desarrollar una relación entre las medidas de deflexión a nivel de superficie con falling weight deflectometer y el número estructural, un gran número de estructuras de pavimento fueron analizadas utilizando la teoría elástica multicapa.

El concepto que maneja es el siguiente: El valor máximo de deflexión d_o (medido a partir de FWD) es una combinación de la deflexión en la subrasante y la compresión elástica de la estructura del pavimento. Para explicar esto, Irwin explica la distribución de esfuerzos y el origen de las deflexiones bajo la carga de un FWD, así:

"Aproximadamente el 95% de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento son originadas debajo de un ángulo de desviación de 34° con la horizontal".

Basados en esta simplificación, se puede asumir que la deflexión medida en la superficie del pavimento a una distancia imaginaria de 1.5 veces el espesor total (h_o) de la estructura de pavimento (desde el centro del plato de carga), se origina totalmente en la subrasante.

Ahora, al relacionar el valor de la deflexión producida a 1.5 veces el espesor total (h_o) de la estructura de pavimento, con el valor de la deflexión central (bajo el plato de carga), se puede encontrar un "índice" asociado con la magnitud de la deformación que ocurre dentro de la estructura de pavimento y se define así:

$$SIP = D_o / D_{1.5*H_o}$$

Donde:

SIP , es el índice estructural del pavimento,

D_o , es la deflexión central, bajo el plato de carga bajo una carga de 40KN (9000lb)

$D_{1.5*H_o}$, es la deflexión medida en la superficie del pavimento bajo una carga de 40KN(9000lb) a una línea imaginaria de 1.5 veces el espesor total (h_o) de la estructura de pavimento.

H_o , es el espesor total del pavimento en pulgadas.

Es válido anotar que en el caso de encontrarse materiales cementados como apoyo del concreto asfáltico, el ángulo estimado de 34° con la horizontal no es razonable por la rigidez de esta capa que influye en que el bulbo de tensiones sea más horizontal. Por tal razón los valores de número estructural, se piensa, no serían tan reales.

Hipotéticamente, el índice SIP debe estar relacionado fuertemente con la rigidez de la estructura de pavimento y subsecuentemente a su número estructural. Se investigó esta hipótesis y se desarrolló una relación entre las medidas de deflexión en la superficie a partir de FWD y el número estructural del pavimento luego de analizar un gran número de estructuras utilizando la teoría elástica. Los cálculos del número estructural de las diferentes estructuras se realizaron mediante la ecuación de la AASHTO:

$$SN = \sum_{i=1}^N h_i \cdot a \cdot \frac{E_i}{E_p}^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

h_i , son los espesores de las capas de la estructura de pavimento, en pulgadas

a_i , son los valores de coeficientes de capa de los materiales utilizados en el ensayo de AASHO

E_p , es el módulo resiliente de los materiales utilizados en el ensayo AASHO.

Luego del análisis de las diferentes estructuras la mejor relación que se encontró fue incluyendo el espesor total del pavimento en el análisis.

$$SN = k_1 \cdot SIP^{k_2} \cdot H_p^{k_3}$$

La relación tiene el siguiente formato:

Donde:

SIP , es el índice del pavimento, calculado previamente.

H_p , es el espesor total del pavimento en mm.

k_1 , k_2 y k_3 son coeficientes que se muestran a continuación.

Tipo de superficie	K1	K2	K3	r2
Sello de asfalto	0,1165	-0,3248	0,8241	0,984
Concreto asfáltico	0,4728	-0,481	0,7581	0,957

Tabla 2: Coeficientes de la ecuación de Rohde para diferentes tipos de superficie

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los números estructurales por capa y totales a partir de las metodologías comentadas anteriormente para cada vía del presente trabajo.

Por cada vía se presenta la estructura propuesta por el proyectista y los resultados obtenidos a partir de mediciones. Los cálculos del SN se realizan en cada estación por cada punto medido, luego se obtiene el promedio, la desviación estándar de los resultados y el coeficiente de variación de los resultados.

Previo a los cálculos, se muestra a continuación datos de deflexión de una estación en la calle 53 (estación 0.01), y a partir de estos y de los espesores totales de estructura se calcula a manera de ejemplo el $SN_{efectivo}$ según ROHDE y AASHTO.

Estación	Carga (Km)	Temp °C	Df0	Df30 cms
0,01	40	18	381	250
Df60 cms	Df90 cms	Df120 cms	Df150 cms	Df180 cms
122	63	41	33	25

La deflexión se encuentra en milésimas de milímetro, (1/1000mm).

Según metodología AASHTO, calculando el M_i , se obtiene:

$$M_i = (9000 \cdot 0.24) / (0.000984 \cdot 71) = 30917 \text{ psi,}$$

E_{E_p} es de 87885psi, con un espesor total de 37pulgadas.

Calculando el $SN_{efectivo}$

$$SN_{Efectivo} = 0.0045 \cdot D \cdot \sqrt[3]{E_p}$$

arroja un valor de 7.48. Este valor se puede ver en la tabla No. 3 de resultados de la calle 53, en la estación 0.01.

Ahora, según metodología ROHDE:

El SIP es 381/1000 mm 35/1000 mm, y utilizando los coeficientes descritos en la tabla No. 2, y un espesor de 37 pulgadas, 949mm, se tiene:

$$SN = k_1 \cdot SIP^{k_2} \cdot H_p^{k_3}$$

El $SN_{efectivo}$ es 5.1. Este valor se puede ver en la tabla No. 3, en la estación 0.01.

4.1 Estructuras con mediciones a nivel de concreto asfáltico terminado

Dentro de este grupo se encuentran las vías 1, 2 y 3. Las mismas corresponden a la calle 53 entre carrera 9 y carrera 13, la autopista Bogotá-Briceño y la carrera 13 entre calle 22 sur y calle 32 sur.

Calle 53 entre Carrera 9 y Carrera 13.

La estructura diseñada es:

	h(pulgadas)	a_i	m_i	SN
Concreto Asfáltico	5.9	0.4	1	2.36
Base granular	7.9	0.13	1	1.03
Subbase Granular	9.8	0.11	0.9	0.97
Relleño Seleccionado	13.8	0.08	0.9	0.99
SN Total				5.35

Los resultados de $SN_{efectivo}$ tanto para la metodología AASHTO como ROHDE se presentan a continuación.

Se observa la buena relación entre el $SN_{diseño}$ y el $SN_{efectivo}$ promedio según ROHDE, con un coeficiente de variación menor del 10%, indicando la homogeneidad de los trabajos realizados.

Estación (Km)	Número Estructural Efectivo	
	SN Rhode	SN AASHTO
0.00	5.60	7.94
0.01	5.10	7.48
0.02	5.00	7.39
0.03	5.40	7.75
0.04	5.20	7.60
0.05	4.70	7.00
0.06	4.90	7.24
0.07	5.50	7.91
0.08	5.60	8.11
0.09	5.40	7.83
0.10	5.30	7.70
0.11	5.50	7.99
0.12	4.50	6.92
0.13	5.60	8.17
0.14	5.50	8.13
0.15	6.40	9.11
Promedio	5.3	7.77
Desvío Standard	0.44	0.53
Coef. Variación	8.3%	6.8%

Tabla 3: Cálculo del SN_e a nivel de carpeta asfáltica



El $SN_{efectivo}$ promedio según AASHTO resulta mayor que el $SN_{efectivo}$ promedio según ROHDE.

El valor de $SN_{efectivo}$ promedio según ROHDE de 5.3, refleja la estructura propuesta por el proyectista. A primera vista, el $SN_{efectivo}$ según AASHTO indica una sobrevaloración de la estructura construida.

Autopista Bogotá - Briceño

La estructura propuesta es:

		h(pulgadas)	a_i	m_i	SN
Concreto Asfáltico		7.5	0.4	1	3.00
Base granular		7.9	0.13	1	1.03
Subbase Granular		11.8	0.11	1	1.30
					SN Total 5.33

Los resultados de $SN_{efectivo}$ tanto para la metodología AASHTO como ROHDE se presentan a continuación:

Estacion (Km)	Número Estructural Efectivo	
	SN Rhode	SN AASHTO
0.00	5.50	7.20
0.02	5.90	7.61
0.04	5.30	6.97
0.06	5.50	7.16
0.08	6.10	7.66
0.10	5.60	7.08
0.12	5.30	6.85
0.14	5.20	6.72
0.16	6.00	7.54
0.18	5.30	6.89
0.20	5.70	7.27
0.22	5.60	7.13
0.24	5.50	7.05
0.26	4.90	6.43
0.28	5.10	6.56
0.30	5.40	6.90
0.32	5.1	6.53
0.34	5.2	6.70
0.36	5.20	6.86
0.38	5.3	6.90
0.40	5.2	6.74
Promedio	5.42	6.99
STD	0.31	0.34
Coef. Variación	5.7%	4.9%

Tabla 4: Cálculo del SN_p a nivel de carpeta asfáltica

El $SN_{efectivo}$ promedio según ROHDE (5.42) es cercano al $SN_{diseño}$ (5.33), concluyendo que la estructura ejecutada cumple con lo que el proyectista propuso, y la valoración de esta metodología.

El coeficiente de variación presenta un valor bastante bajo lo que indica la homogeneidad de los trabajos realizados.

Tal como se observó en la pista anterior, el $SN_{efectivo}$ promedio según AASHTO presenta valores más altos que los obtenidos con ROHDE.

Carrera 13 entre calle 22 sur y calle 32 sur

El proyectista propuso rehabilitar la estructura, retirando la carpeta asfáltica deteriorada, estabilizando el material existente con cemento, para luego colocar el refuerzo necesario en concreto asfáltico. La estructura propuesta es:

		h(pulgadas)	a_i	m_i	SN
Concreto Asfáltico		5.9	0.4	1	2.36
Material cementado		7.9	0.14	1	1.11
Material granular existente		7.9	0.07	0.8	0.44
					SN Total 3.91

Los resultados del $SN_{efectivo}$ a partir de las mediciones de deflexión por la metodología ROHDE y AASHTO, se presentan a continuación.

Estacion (Km)	Número Estructural Efectivo	
	SN Rhode	SN AASHTO
0.00	3.90	4.21
0.01	6.70	6.88
0.02	5.50	5.74
0.04	4.90	5.24
0.05	4.40	4.75
0.06	3.40	3.99
0.07	5.40	5.64
0.08	3.90	4.41
0.09	4.80	5.59
0.11	4.00	4.42
0.13	4.70	5.35
0.13	4.20	5.00
0.15	4.20	5.85
0.16	5.00	4.69

Estacion (Km)	Número Estructural Efectivo	
	SN Rhode	SN AASHTO
0.16	5.00	4.69
0.17	5.10	5.50
0.18	4.40	5.55
0.19	4.40	4.81
0.21	5.10	7.45
0.22	4.10	5.41
0.23	3.60	4.51
0.24	3.30	4.12
0.25	3.30	3.97
0.26	4.10	3.92
0.27	4.20	4.53
0.28	3.60	4.57
0.29	3.50	4.20
0.30	3.50	3.94
Promedio	4.3	4.96
Desvío Standard	0.74	0.86
Coef. Variación	17.2%	17.3%

Tabla 5: Cálculo del $SN_{efectivo}$ a nivel de carpeta asfáltica.

El $SN_{efectivo}$ promedio de ROHDE (4.3) presenta un valor superior al $SN_{diseño}$ (3.91) y los resultados arrojan un coeficiente de variación alto, reflejando la heterogeneidad de los trabajos realizados (principalmente falta de homogeneidad en el estabilizado con cemento).

Tal como se ha observado hasta ahora, el $SN_{efectivo}$ promedio según AASHTO arroja valores más altos que los obtenidos con la metodología de ROHDE, demostrando a juicio de los autores una sobrevaloración de la estructura construida. Esto corroborado por el método de componentes de la AASHTO.

4.2 Estructuras con mediciones en distintas capas de la estructura

Para las vías en las que se hicieron mediciones en cada capa constitutiva del pavimento, se presentan los cálculos fragmentados por capa.

Carrera 10 entre calle 22 y 26, calzada occidental

La estructura para la reconstrucción del pavimento deteriorado es:

		h(pulgadas)	a_i	m_i	SN
Concreto Asfáltico		5.9	0.4	1	2.36
Base granular		7.9	0.13	1	1.03
Subbase Granular		11.8	0.11	1	1.30
SN Total					4.69

Los resultados del $SN_{efectivo}$ a nivel de subbase granular se presentan a continuación

Estacion(Km)	Número Estructural Efectivo		Espesor subbase (cm)	a_2 Rhode
	RHODE	AASHTO		
0.08	1.2	1.56	30	0.10
0.1	1.5	1.42	30	0.13
0.121	1.3	1.70	30	0.11
0.14	1.3	1.47	30	0.11
0.16	1.2	1.54	30	0.10
0.18	1.3	1.42	30	0.11
0.2	1.3	1.46	30	0.11
0.22	1.4	1.55	30	0.12
0.24	1.2	1.67	30	0.10
0.26	1.2	1.39	30	0.10
0.28	1.1	1.39	30	0.09
Promedio	1.27	1.51		0.11
STD	0.11	0.11		0.01
Coef. Variación	8.7%	7.1%		8.7%

Tabla 6: Cálculo del SN_{ef} a nivel de subbase granular

Se observa que el $SN_{efectivo}$ promedio según Rhode (1.27) a nivel de subbase granular es bastante coincidente con el SN proyectado a ese nivel de estructura (1.30). El $SN_{efectivo}$ de AASHTO arroja un valor más alto, y en cierta forma coincide con el $SN_{diseño}$.

El coeficiente de aporte del material de subbase granular calculado según RHODE en promedio es 0.11, el cual es equivalente al proyectado.

Según AASHTO el coeficiente de aporte del material de subbase es 0.13; a juicio de los autores, el valor es alto por las características del material colocado. De otro lado, según los ábacos de AASHTO el material tiene un aporte máximo de 0.11. Los valores calculados arrojan un coeficiente de variación aceptable.

Ahora se procede a mostrar resultados a nivel de base granular.

Estacion(Km)	Número Estructural Efectivo		Espesor base (cm)	a_2 Rhode
	RHODE	AASHTO		
0.08	1.8	2.56	20	0.08
0.1	1.8	2.61	20	0.04
0.121	1.9	2.70	20	0.08
0.14	1.9	2.71	20	0.08
0.16	1.8	2.55	20	0.08
0.18	2.0	2.69	20	0.09
0.2	2.0	2.81	20	0.09
0.22	2.0	2.76	20	0.08
0.24	2.0	2.77	20	0.10
0.26	1.9	2.64	20	0.09
0.28	1.7	2.46	20	0.08
Promedio	1.89	2.66		0.08
STD	0.10	0.11		0.02
Coef. Variación	5.6%	4.0%		18.7%

Tabla 7: Cálculo del SN_{ef} a nivel de subbase granular

Nótese que una vez colocada la capa de base granular, el $SN_{efectivo}$ promedio de RHODE (1.89) presenta cierta disminución, respecto al $SN_{diseño}$ de 2.33. El valor del $SN_{efectivo}$ promedio de AASHTO arroja un valor superior al $SN_{diseño}$, con lo que se pensaría que se está cumpliendo con lo proyectado.

Calculado el coeficiente de aporte del material de base según RHODE, este arroja un valor de 0.08 en promedio, el cual es menor al 0.13 adoptado por el proyectista. Ese valor alerta al valor

constructor para la toma de decisión en cuanto a la falta estructural. Por otro lado, el coeficiente de aporte promedio según AASHTO es 0.15, el cual a juicio de los autores y verificando los ábacos de la AASHTO es un valor bastante elevado.

Finalmente, se presentan los resultados luego de colocada la capa asfáltica en la tabla 8.

Estacion (Km)	Número Estructural Efectivo		SN Concreto Asfáltico	Espesor C.A (cm)	a_1 Rhode
	RHODE	AASHTO			
0.08	4.1	5.0	2.3	15	0.39
0.1	4.4	5.9	2.6	15	0.44
0.121	4.1	6.0	2.2	15	0.37
0.14	4.6	5.7	2.7	15	0.46
0.16	4.1	5.6	2.3	15	0.39
0.18	4.3	5.6	2.3	15	0.39
0.2	4.5	5.4	2.5	15	0.42
0.22	4.5	5.9	2.5	15	0.42
0.24	4.8	5.5	2.8	15	0.47
0.26	4.6	5.8	2.7	15	0.46
0.28	4.6	5.8	2.7	15	0.46
Promedios	4.4	5.6	2.49		0.42
STD	0.2	0.3			0.04
Coef. Variación	5.6%	5.3%			8.3%

Tabla 8: Cálculo del SN_{ef} a nivel de capa asfáltica

Se puede notar que según el $SN_{efectivo}$ promedio según RHODE (4.4), se presenta una falta estructural pequeña respecto al $SN_{diseño}$ (4.69) por lo que se necesitaría completar teóricamente ese SN de 0.29 (4.69-4.4). De esta forma se garantiza que lo que se proyectó se este construyendo. Aquí se nota la conveniencia de las mediciones de deflexión, y la eficacia del retrocálculo, reflejando la falta estructural desde la capa de material de base granular. Estadísticamente, el coeficiente de correlación arrojado por los resultados es adecuado (menor al 10%).

Si se empleara la metodología AASHTO, el $SN_{efectivo}$ (5.6) diría que la estructura cumple con lo proyectado. A juicio de los autores, tal como se ha comentado hasta el momento, la metodología AASHTO produce una sobrevaloración de la estructura.

Carrera 10 entre calle 22 y 26, calzada oriental

La estructura propuesta es equivalente a la propuesta en la calzada occidental. Los resultados del $SN_{efectivo}$ a nivel de subbase granular se presentan a continuación:

Estacion(Km)	Número Estructural Efectivo		Espesor subbase (cm)	a_2 Rhode
	RHODE	AASHTO		
0.09	1.1	1.14	30	0.09
0.11	1.1	1.23	30	0.09
0.13	1.2	1.39	30	0.10
0.15	1.2	1.36	30	0.10
0.17	1.1	1.45	30	0.09
0.19	1.2	1.40	30	0.10
0.21	1.2	1.57	30	0.10
0.23	1.3	1.52	30	0.11
0.25	1.2	1.53	30	0.10
0.27	1.2	1.66	30	0.10
Promedio	1.18	1.43		0.10
STD	0.06	0.16		0.01
Coef. Variación	5.4%	11.1%		

Tabla 9: Cálculo del SN_{ef} a nivel de subbase granular



El valor de $SN_{efectivo}$ promedio según ROHDE (1.18) se acerca al $SN_{diseño}$ (1.30). El $SN_{efectivo}$ de AASHTO arroja un valor más alto, y también coincide en cierta forma con el $SN_{diseño}$. Queda la duda de cual es la metodología válida.

El valor de coeficiente de aporte del material de subbase según ROHDE coincide relativamente con lo propuesto por el proyectista.

Ahora, si se calcula el coeficiente de aporte del material de subbase según AASHTO, este es 0.12. También se acerca al propuesto en el diseño original. Queda la duda de cual es el aporte real.

Los coeficientes de variación arrojan valores adecuados (menor al 10%).

En la tabla 10 se plasman resultados con mediciones a nivel de base granular.

De los resultados, se observa que se presenta el mismo caso que en la calzada occidental, un $SN_{efectivo}$ según ROHDE de 1.87, menor al SN a este nivel de estructura propuesto en el diseño. Al retrocalcular se ve que el material colocado no presenta el coeficiente de aporte propuesto.

Estacion(Km)	Número Estructural Efectivo		Espesor base (cm)	a_2 Rhode
	ROHDE	AASHTO		
0.09	2	2.81	20	0.11
0.11	2.1	2.92	20	0.13
0.13	1.8	2.63	20	0.08
0.15	1.7	2.53	20	0.06
0.17	1.8	2.55	20	0.09
0.19	1.8	2.54	20	0.08
0.21	1.9	2.63	20	0.09
0.23	1.9	2.73	20	0.08
0.25	1.9	2.64	20	0.09
0.27	1.8	2.54	20	0.08
Promedio	1.87	2.65		0.09
STD	0.12	0.13		0.02
Coef. Variación	6.2%	4.9%		

Tabla 10: Cálculo del SN_{ef} a nivel de base granular

El valor del $SN_{efectivo}$ según AASHTO es mayor que el $SN_{diseño}$ a este nivel de estructura, lo que daría para analizar que se está cumpliendo con lo proyectado. A juicio de los autores, las características de los materiales colocados en la obra, son semejantes con los resultados que arroja la metodología ROHDE. El coeficiente de aporte del material de base granular, según AASHTO es de 0.15, el cual es bastante alto.

Finalmente se presentan resultados a nivel de concreto asfáltico.

Como se ve en los resultados, en esta calzada el $SN_{efectivo}$ promedio según ROHDE (4.02) es menor aún que el $SN_{diseño}$ presentando un SN de 0.67 (4.69-4.02), el cual viene reflejado desde el material de base granular y que debe ser compensado para cumplir con el diseño propuesto. Tal como se ha $SN_{efectivo}$

Estacion(Km)	Número Estructural Efectivo		SN Concreto Asfáltico	Espesor C.A (cm)	a_1 Rhode
	ROHDE	AASHTO			
0.09	4.2	5.7	2.2	15	0.37
0.11	4.3	5.9	2.2	15	0.37
0.13	4	6.0	2.2	15	0.37
0.15	3.8	5.7	2.1	15	0.36
0.17	3.5	5.6	1.7	15	0.29
0.19	4	5.6	2.2	15	0.37
0.21	4.2	5.4	2.3	15	0.39
0.23	3.6	5.9	1.7	15	0.29
0.25	4.2	5.5	2.3	15	0.39
0.27	4.4	5.8	2.6	15	0.44
Promedios	4.02	5.7	2.15		0.36
STD	0.3	0.2			0.046
Coef. Variación	7.5%	3.3%			

Tabla 11: Cálculo del SN_{ef} a nivel de capa asfáltica.

presentado hasta ahora, el $SN_{efectivo}$ según AASHTO arroja valores superiores respecto al obtenido con ROHDE. Tal como se comentó en el análisis de la calzada occidental, las características de los materiales colocados se aproximan más a los resultados obtenidos con la metodología ROHDE. Estadísticamente, los coeficientes de variación se encuentran en un rango tolerable.

Es válido anotar que si se compara el $SN_{efectivo}$ de AASHTO versus el $SN_{diseño}$, se concluiría que la estructura no presenta falta estructural, y que por el contrario, la misma cumpliría con lo proyectado.

Carrera 9 entre calle 92 y 95.

En esta vía se propuso por parte del proyectista, retirar la carpeta existente deteriorada, reciclar y estabilizar el material existente de base con 3% de cemento y 6% de emulsión (3% de asfalto residual) y finalmente colocar el refuerzo en concreto asfáltico necesario.

La estructura propuesta es la siguiente:

	h (pulgadas)	a_i	m_i	SN
Concreto Asfáltico	3.9	0.4	1	1.56
Mat.Estabilizado con 3% de cemento y 6% de emulsión	5.9	0.3	0.9	1.59
Material existente contaminado	13.8	0.1	0.9	1.24
				SN Total 4.40

A continuación se presentan los resultados de $SN_{efectivo}$

SN_{ef} promedio a nivel de base cementada		Aporte capa cementada/" según ROHDE	SN_{ef} promedio a nivel de capa asfáltica		Aporte capa asfáltica/" según ROHDE
ROHDE	AASHTO		ROHDE	AASHTO	
2.27	3.17	0.19	3.96	5.34	0.44
Cv = 23%	Cv = 19%		Cv = 14%	Cv = 11%	

Tabla 12: Resumen Resultados SN_{ef} , coeficientes de aporte, y coeficiente de variación.

De los resultados que se muestran en la Tabla No. 12, se observa que el $SN_{efectivo}$ a nivel de capa asfáltica según ROHDE arroja un valor de 3.96 el cual es menor que el 4.4 proyectado. Al calcular el $SN_{efectivo}$ sobre el material estabilizado, este arroja un valor de 2.27, con un coeficiente de aporte de 0.19 en promedio (con una gran variación de resultados, reflejando la heterogeneidad del trabajo realizado). El coeficiente de aporte adoptado en el diseño para el material estabilizado con 3% de emulsión y 3% de

cemento, es 0.3. Al hacer el cálculo de la falta estructural, producto del aporte del material estabilizado, $SN = (0.3 \cdot 0.9 \cdot 5.9) - (0.19 \cdot 5.9)$ es 0.47.

Si se le suma ese SN de 0.47 al 3.96 efectivo según ROHDE, se obtiene 4.43, equivalente al SN proyectado en el diseño original.

Ahora, si se tuviera en cuenta el análisis del $SN_{efectivo}$ según la AASHTO (5.34), parecería que la estructura colocada cumple con lo proyectado, demostrando la no falta estructural, además de la sobrevaloración del material estabilizado al adoptar un coeficiente de 0.3, el cual es un valor bastante alto a juicio de los autores para este material. Incluso, los ábacos de la AASHTO, a los materiales estabilizados con cemento les recomienda valores hasta de 0.28 por pulgada para resistencias a la compresión inconfina de más de 70 kg/cm^2 . Por otro lado, para materiales estabilizados con asfalto, la AASHTO recomienda coeficientes hasta de 0.3 por pulgada, pero para valores de estabilidad Marshall mayores a 1600 libras.

Carrera 11 entre calle 64 y 72.

La estructura propuesta por el proyectista para la rehabilitación de la vía es:

	h(pulgadas)	a_i	m_i	SN
Rodadura asfáltica	2	0.4	1	0.80
Base asfáltica	3.9	0.38	1	1.48
Mat. Estabilizado con 3% de cemento y 6% de emulsión	9.8	0.31	1	2.73
Material existente contaminado	10.2	0.12	0.9	1.10
SN Total				6.44

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis:

SN _{ef} promedio a nivel de base cementada		Aporte capa cementada ¹ , según ROHDE	SN _{ef} promedio a nivel de capa asfáltica		Aporte capa asfáltica ¹ , según ROHDE
RHODE	AASHTO		RHODE	AASHTO	
2.14	3.02	0.10	4.51	6.08	0.40
Cv = 29%	Cv = 24%		Cv = 18%	Cv = 15%	

Tabla 13: Resumen Resultados SN_{ef} , coeficientes de aporte, y coeficiente de variación

De los resultados que se muestran en la tabla No. 13, se observa que el $SN_{efectivo}$ según ROHDE arroja un valor de 4.51 el cual es menor que el 6.44 proyectado. Al calcular el $SN_{efectivo}$ según ROHDE sobre el material estabilizado, este arroja un valor de 2.14, con un coeficiente de aporte de 0.10 en promedio. Se anota que la variación de resultados a nivel de material estabilizado es bastante grande, reflejando un alto grado de heterogeneidad del trabajo realizado. Al hacer el cálculo de la falta estructural, producto del aporte del material estabilizado, $SN = (0.31 \cdot 1 \cdot 9.8) - (0.10 \cdot 9.8)$ es 2.05.

Si se le suma ese SN de 2.05 al 4.51 efectivo según ROHDE, se obtiene 6.56, próximo al SN proyectado en el diseño original.

Tal como se comentó en el análisis anterior, el $SN_{efectivo}$ según la AASHTO, al ser similar al propuesto, indicaría la no falta estructural. Se conceptúa al respecto, que para los autores existe una sobrevaloración de la metodología AASHTO, así como del coeficiente de aporte del material estabilizado con emulsión y con cemento.

Avenida el Dorado entre Avenida Boyacá y Aeropuerto.

La rehabilitación de esta vía contempla el retiro de la carpeta asfáltica, reciclado y estabilizado del material granular existente con 6% de cemento (inicialmente se había propuesto un 2%) y luego colocar el refuerzo en concreto asfáltico necesario.

	h(pulgadas)	a_i	m_i	SN
Rodadura asfáltica	3.5	0.4	1	1.40
Mat. Estabilizado con cemento (entre 2 y 6%)	7.9	0.16	1	1.26
Material granular existente	15.7	0.12	1	1.88
SN Total				4.55

Inicialmente el estabilizado esta proyectado para realizarse con 2% de cemento, y luego colocar 100 mm de concreto asfáltico. Luego de ejecutado un tramo con 2% de cemento se realizaron mediciones de deflexión y se observó que hay falta estructural respecto al $SN_{efectivo}$ para ese nivel de estructura. A partir de resultados de ensayos de compresión inconfina se decidió elevar el porcentaje de cemento al 6%, y en el tramo donde se estabilizó con 2% de cemento, aumentar el espesor de capa asfáltica a 140 mm de espesor (para compensar la falta estructural). Luego de colocada la carpeta en un espesor de 60 mm sobre todo el tramo, previa colocación de todo el refuerzo, se decide ejecutar las deflexiones para retrocalcular el $SN_{efectivo}$, y se obtiene que el $SN_{efectivo}$ según ROHDE para los tres tramos así:

Tramo	SN _{efectivo} promedio a nivel de base cementada		Aporte capa cementada ¹ , según Rohde
	ROHDE	AASHTO	
Km 8+480 - Km 9+860 (2% de cemento)	5.05	6.33	0.27
Km 10+000 - Km 10+550 (6% de cemento)	5.61	6.93	0.34
Km 10+600 - Km 12+450 (2% de cemento)	4.42	5.59	0.19

Tabla 14: Resumen Resultados SN_{ef} , coeficientes de aporte, y coeficiente de variación

Se anota que para el cálculo del coeficiente de aporte estructural del material estabilizado con cemento, a partir del $SN_{efectivo}$ de ROHDE se restó el aporte de 60 mm de la capa asfáltica colocada hasta ese momento, con coeficiente de aporte de 0.44/pulgada, así como 400 mm de material granular con un coeficiente de aporte de 0.12/pulgada. Si se partiera del $SN_{efectivo}$ de AASHTO, el coeficiente de aporte sería más alto aún.

La tabla anterior indica la gran heterogeneidad del trabajo realizado, así como unos valores de coeficiente de aporte estructural para el material estabilizado con cemento algo elevados a juicio de los autores. Una explicación al respecto es que la simplificación de casos



ROHDE se basa en que el ángulo que forma la línea del bulbo de tensiones con la horizontal, es 34° , con lo que esta hipótesis en los casos de materiales semirígidos (estabilizados con cemento) la línea del bulbo de tensiones es más horizontal (ángulo menor a 34°). Con este análisis, para el cálculo según ROHDE, sabiendo que con el ángulo se establece la deflexión medida a 1.5 veces el espesor total del pavimento no tendría aplicación dado que el ángulo con la horizontal de la línea del bulbo de tensiones es menor, generando una distancia menor, por lo que la deflexión no es a 1.5 veces el espesor total del pavimento.

Posteriormente, colocada la carpeta asfáltica en su totalidad, se realizaron mediciones de deflexión, y se ejecutó el cálculo, arrojando valores demasiado altos a juicio de los autores.

Tramo	SN _{ef} promedio a nivel de capa asfáltica		Aporte capa asfáltica ¹ según Rohde
	ROHDE	AASHTO	
Km 8+460 – Km 9+950 (2%) cemento	7.48	11.22	0.77
Km 10+000– Km 10+550 (6%) cemento	8.12	11.74	> de 1
Km 10+600-Km 12+450 (2%) de cemento	6.83	11.10	0.77

Tabla 15: Resumen Resultados SN_{ef}, coeficientes de aporte, y coeficiente de variación

CONCLUSIONES

El deflectómetro de impacto es un equipo versátil, con el que se puede realizar un control de calidad eficaz y oportuno de tal forma de comprobar que la estructura que se encuentra en construcción esté cumpliendo con el proyecto del diseñador.

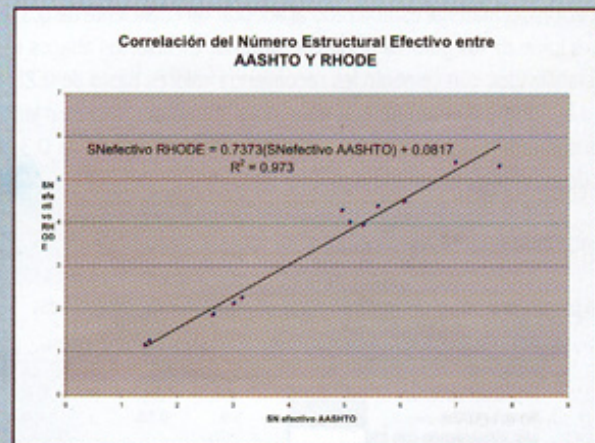
A partir del presente trabajo, se puede concluir que la metodología de retrocálculo del SN_{efectivo} según Rohde, se ajusta con cierta exactitud a los cálculos del SN realizados por el método de componentes de la AASHTO.

Al comparar los resultados de retrocálculo a partir de las deflexiones medida en diferentes pistas, mediante la metodología AASHTO y ROHDE, se observa una sobrevaloración de las estructuras mediante la metodología AASHTO. Esto podría desvirtuar un análisis de control de calidad utilizando dicha metodología ante una falta estructural.

Los retrocálculos del SN_{efectivo} mediante la metodología ROHDE han arrojado resultados bastante similares a los SN calculados por medio del método de componentes de la AASHTO, calibrando con esto la metodología ROHDE para las condiciones inherentes de Bogotá (materiales provenientes de areniscas, suelos cohesivos de consistencia media a alta, condiciones de humedad), etc.

La hipótesis de la formulación de ROHDE en donde el bulbo de tensiones generado por aplicar una carga con el FWD presenta un ángulo de 34° con la horizontal no cierra bien para con

pavimentos con presencia de capa semirígida (materiales estabilizados con cemento). Al observar los resultados de retrocálculo sobre pavimentos con presencia de capas semirígidas (estabilizadas con cemento), dado que el bulbo de tensiones genera una línea más horizontal (ángulo menor a 34° con la horizontal), perdiendo la simplificación de la línea del bulbo a 34° con la horizontal, se concluye que la misma debe ser aplicada con sumo cuidado sobre este tipo de pavimentos y ameritaría otro estudio a fin de ajustar la formulación Rohde a estos materiales.



Los coeficientes de aporte de los diferentes materiales que conforman las diferentes pistas evaluadas (con SN_{efectivo} según ROHDE) son parecidos a los valores recomendados por la metodología AASHTO en su ecuación de diseño.

Los coeficientes de variación de los valores de SN_{efectivo}, así como los coeficientes de aporte de diferentes capas, en dos vías (carrera 9 y carrera 11), resultaron bastante heterogéneos, mostrando la calidad de los trabajos ejecutados sobre todo en las capas estabilizadas. Con este tipo de trabajos de mediciones y retrocálculo se puede valorar la calidad de la obra ejecutada.

En el gráfico No. 2, se establece la correlación entre el SN_{efectivo} según ROHDE y el SN_{efectivo} según AASHTO presentando un valor de correlación de 0.973, siendo la relación:

$$SN_{efectivo} ROHDE = 0.737 * SN_{efectivo} AASHTO + 0.0817$$

De dicho análisis, se observa una buena correlación entre los valores obtenidos por una u otra metodología.

Tal como se comentó en la introducción, estos resultados son propios para las condiciones y materiales de la ciudad de Bogotá. Es recomendable realizar estas pistas de calibración para adecuar las relaciones existentes y validación de la metodología empleada (ROHDE y AASHTO) a las condiciones de otras regiones, aunque según la experiencia mostrada en el presente documento y otra obtenida en otros países, es de esperar similar comportamiento en los resultados.

BIBLIOGRAFIA

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Ing. Gustav Rohde, Determining a pavement's structural number from FWD testing, 73rd Annual meeting Transportation Research Board, 1994
3. TNM Limited, Informes de Rehabilitación carrera 13 entre Calle 22 sur y calle 32 sur, avenida El Dorado.

