

Metodología de evaluación in-situ de capas granulares en pavimentos flexibles, usando el LWD

Adriana Patricia Agudelo Castañeda
Ingeniera en Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja
Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja, Colombia.
Especialista en geotecnia vial y pavimentos Asesora independiente.
adriana.agudelo89@gmail.com.

Iván Darío Burgos Ocaición
Ingeniero en Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja
Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja, Colombia.
Asesor independiente.
ingivandburgos@gmail.com.

Edwin Yesid González Torres
Ingeniero en Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja
Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja, Colombia. Asesor independiente.
ingviasyesid@hotmail.com

Recibido: 14 de noviembre de 2013 Aprobado: 10 de diciembre de 2013

Artículo de investigación como producto desarrollado en la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás.

Resumen

En la mayoría de los casos para construcción de pavimento, se establecen los resultados de ensayos de densidad como factor aprobatorio de la calidad de las capas construidas, pero estos no se relacionan con los parámetros bajo los cuales se caracterizan las capas en el diseño. Para cambiar esta situación en el control de calidad del pavimento durante su construcción, se elabora esta metodología de evaluación In-situ en capas granulares, la cual se desarrolló a través de una toma de datos de deflexiones con distintas humedades en el proyecto la Ruta del Sol en el tramo Guaduas – Koran, en las capas granulares que conforman la estructura. La información obtenida se utilizó para hacer una comparación del módulo resiliente obtenido en cada capa contra la humedad de la capa durante los días de la toma de información. En seguida se determinó con la humedad de trabajo de la capa el módulo resiliente de diseño. Haciendo un análisis estadístico de los datos tomados en campo se propone la metodología para obtener las curvas maestras de humedad versus módulo por cada capa de la estructura de pavimento. Con las curvas maestras, por cada punto de humedad obtenemos un módulo y de esta manera podemos evaluar in situ según las humedades que encontremos si la capa está dentro de los rangos esperados de módulo de diseño.

Palabras Claves: Capas Granulares, control de calidad, deflectómetro de impacto liviano, módulo resiliente.

Abstract

In the most cases for construction of pavement, establishing the density test results as approving the quality factor of the layers built, but these do not relate to the parameters under which the layers are characterized in the design. To change this situation in the pavement quality control during construction, this methodology is proposed for the evaluation in situ of granular layers which was developed through a data collection with different deflection on humidity in the project the Ruta el Sol Guaduas - Koran, in the granular layers that form the structure. The collected information was used to make a comparison of the resilient modulus obtained in each layer against the humidity of the layer, during the time of the data collection. Then, the resilient modulus of the design was determined with the humidity of the work of the layer. A methodology to obtain the master curves of humidity versus the modulus for each layer of the pavement was proposed by a statistical analysis of the collected data. With the master curves for each point of moisture we get a module and and we can evaluate in situ whether the layer is within the expected ranges, according to the humidity.

Key words: Granular Layers, quality control, Light weight Deflectometer, Resilient Modulus.

I. INTRODUCCIÓN

El mundo de la ingeniería de pavimentos ha tenido un gran cambio y evolución en el campo de la evaluación estructural, y se ha empezado a difundir de forma amplia la utilización de equipos automatizados de deflectometría. El uso del deflectómetro de impacto liviano (LWD) para control de calidad de construcción o investigación de materiales para terraplenes y la construcción de vías presentan ventajas muy altas en cuanto a tiempos de medición e información adquirida.

En Colombia se ha avanzado en el uso de equipos para la evaluación o diagnóstico en vías ya construidas, pero en el campo del control de calidad y optimización de diseños durante la construcción, su uso aún no ha sido tan fomentado. Durante la etapa de construcción de la estructura del pavimento no existe un control óptimo que garantice el cumplimiento de los parámetros de diseño. Uno de los parámetros más relevantes en el diseño de pavimentos es el módulo resiliente ya que éste define el desempeño y tiene incidencia en la vida útil del pavimento.

Sin embargo, no existe una metodología clara para llevar a cabo la evaluación in-situ del módulo resiliente de capas granulares de pavimento, que sirva para el control de calidad y la optimización del diseño por medio de este tipo de ensayos. Por esto el proyecto se fundamenta desde un punto de vista técnico en la necesidad de proveer a los ingenieros encargados del control de calidad de las obras, una herramienta clara con la cual puedan evaluar las estructuras de pavimentos durante el proceso de construcción de una forma adecuada.

II. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Esta investigación se realizó básicamente a partir de información primaria, la cual se tomó directamente en campo. Primero se delimitó la constitución del tramo de prueba con el fin de obtener las mediciones in-situ con el deflectómetro de impacto liviano (LWD) de cada una de las capas granulares de la estructura de pavimento. Se hizo el análisis de configuraciones de carga del LWD y se determinaron las configuraciones según el esfuerzo a aplicar en cada capa. En seguida se procesó la información y se dictaron las correspondientes recomendaciones. Por últi-

mo se obtuvo la metodología de evaluación in-situ de capas granulares con el LWD y se proponen conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Para las etapas de revisión bibliográfica y estado del arte se siguieron los lineamientos de investigaciones sobre el módulo resiliente de materiales granulares, revisión de parámetros que se utilizan en los métodos de diseño, control y especificaciones de las capas granulares y el estado del arte del LWD. Se hizo el análisis de las tensiones que afectan a las capas granulares de pavimentos flexibles y el análisis de configuraciones de carga del LWD.

En la constitución del tramo de prueba se tuvo en cuenta el avance físico en explanaciones del proyecto Ruta del Sol, Sector 1 (Tramo 2 Guaduas - Koran), con el fin de definir el lugar en el cual se hicieron las mediciones a las capas de subbase y base granular. El tramo de prueba en las abscisas del proyecto se ubicó del K41+000 al K41+100 (ver figura 1).

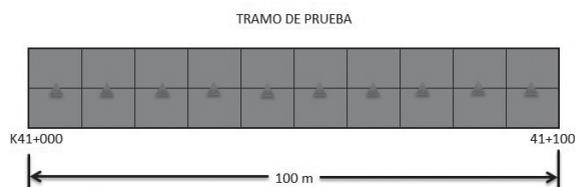


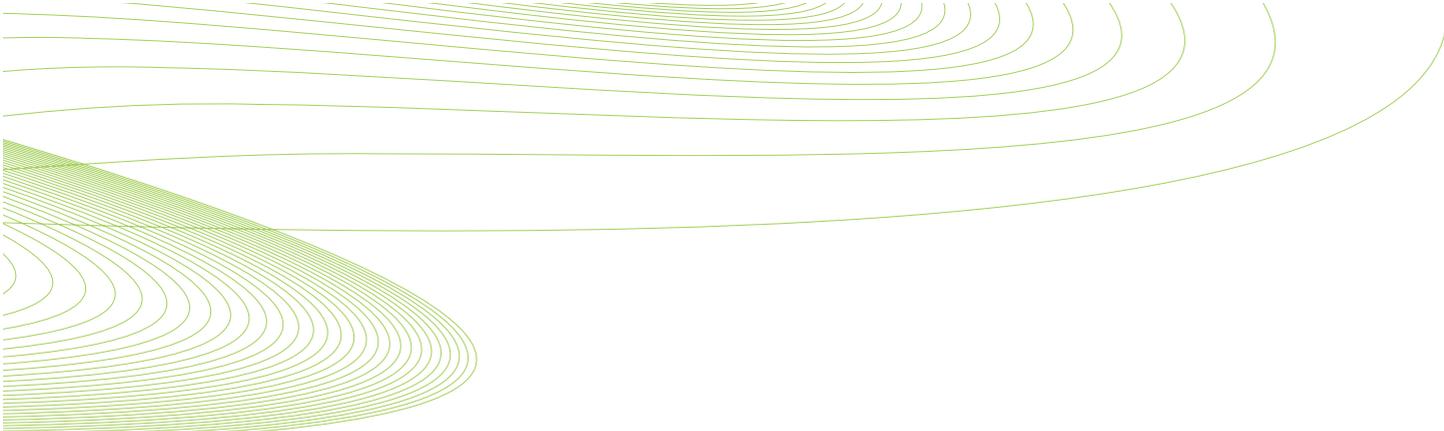
FIGURA 1. TRAMO DE PRUEBA.
Fuente: Autores del proyecto, 2013.

Las mediciones tomadas con el LWD, se hicieron según la distribución mostrada en la figura 1. Estas mediciones se realizaron durante diez (10) días seguidos para cada una de las capas granulares de la estructura del pavimento. Además en cada uno de los días de la toma de información se determinó la humedad de la capa.

Una vez procesados los valores obtenidos en las mediciones con el LWD se analizaron los resultados comparando el módulo resiliente obtenido contra la humedad de la capa, durante los diez (10) días de la toma de información.

Como resultado del análisis se obtuvo las curvas maestras por cada capa de la estructura de pavimento, con las cuales es posible obtener el módulo equivalente al de diseño, en función de la humedad actual de la capa. Esto con el fin de identificar las condiciones de resistencia mecánica de las capas granulares para diferentes porcentajes de humedades y así lograr la liberación de estas capas en





conformidad con los parámetros adoptados en el diseño. Así se propuso la metodología para la evaluación in-situ de la capacidad de soporte de capas granulares de pavimentos flexibles mediante el uso del LWD.

III. ESTADO DEL ARTE

Gran parte de las investigaciones realizadas a la fecha a nivel mundial han estado enfocadas a demostrar la utilidad y confiabilidad del LWD a través de tramos de prueba. Sin embargo, los esfuerzos destinados a establecer la influencia de las distintas configuraciones del equipo en las mediciones han sido limitados.

Según Fleming, Lambert, & Frost (2007), el LWD es una herramienta útil y versátil, pero para proporcionar datos de alta calidad se requiere un buen entendimiento de su funcionamiento y posibles limitaciones por parte del usuario. A continuación se presenta un compilado de los resultados obtenidos en investigaciones realizadas hasta la fecha y que tienen relación directa con los objetivos definidos en el presente trabajo de investigación:

A. Plato de carga.

Usualmente en las mediciones con el LWD se utiliza el plato de 300 mm. Estudios realizados por Van, Groenendijk, & Beuving, en el 2002, revelaron que el área de contacto entre el plato de carga y la superficie evaluada debe ser mayor a 200 mm, debido a que la carga de contacto debe inducir flexión y no corte.

B. Número de golpes por punto evaluado.

En una investigación hecha por Kamiura, Sekine, & Maruyam, (2000), se llegó a la conclusión que luego del tercer golpe, la deflexión se hace constante y el promedio del 3° al 5° golpe es el representativo del punto evaluado.

C. Número de mediciones por capa evaluada

Collop, Armitage, & Thom, en una investigación hecha en el 2001 determinaron que la desviación estándar de un grupo de mediciones realizadas con el LWD depende del número de mediciones realizadas. Para obtener un 95 % de confiabilidad en el valor de la desviación estándar obtenida es necesario realizar un mínimo de 50 mediciones, con una separación máxima de 10 m. entre ellas.

IV. RESULTADOS

Mediciones sobre capa Subbase Granular

En la Figura 2, se observan los diferentes modelos estadísticos, en donde se analizó el comportamiento apropiado a la serie de datos tomados. Dada la información tomada en campo se analizó que el mejor comportamiento del módulo resiliente respecto a la humedad fue el modelo polinomial.

TABLA I
FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN IN-SITU DE LA SUB-BASE GRANULAR

DESCRIPCIÓN:		METODO PARA MEDIR LAS DEFLECCIONES CON UN DEFLECTOMETRO DE PESO LIGERO (LWD) SUBBASE GRANULAR ASTM E-2583						CODIGO: F-13-82 VERSION: 6 FECHA: 15/09/2012				
ABSCISADO INICIAL:		ABSCISADO FINAL:		TRAMO:		FECHA:		22/07/2013				
K41+006		K41+100		K41+100		No. DE REG.:		20002				
No. PUNTO	LOCALIZACIÓN	No. MEDICION	RADIO PLATO (mm)	CARGA (KN)	ESFUERZO (KPa)	MODULO (Mpa/h)	OBSERVACIONES	CAPA	FECHA	CALZADA	CAPIL	HUMEDAD
15	41075	3	200	8.1	150	100		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
16	41080	1	200	8.1	150	99	C2D C	SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
16	41080	2	200	8.1	150	98		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
16	41080	3	200	8.1	150	103		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
17	41085	1	200	8.1	150	98	C2D C	SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
17	41085	2	200	8.1	150	101		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
17	41085	3	200	8.1	150	99		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.1
18	41090	1	200	8.1	150	98	C2D C	SBG	10/07/2013	C2D	C	10.2
18	41090	2	200	8.1	150	101		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.2
18	41090	3	200	8.1	150	99		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.2
19	41095	1	200	8.1	150	98	C2D C	SBG	10/07/2013	C2D	C	10.2
19	41095	2	200	8.1	150	100		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.2
19	41095	3	200	8.1	150	102		SBG	10/07/2013	C2D	C	10.2

NOMBRE	REALIZO	REVISÓ	APROBÓ
CARGO			
FIRMA			

Fuente: Autores 2013.

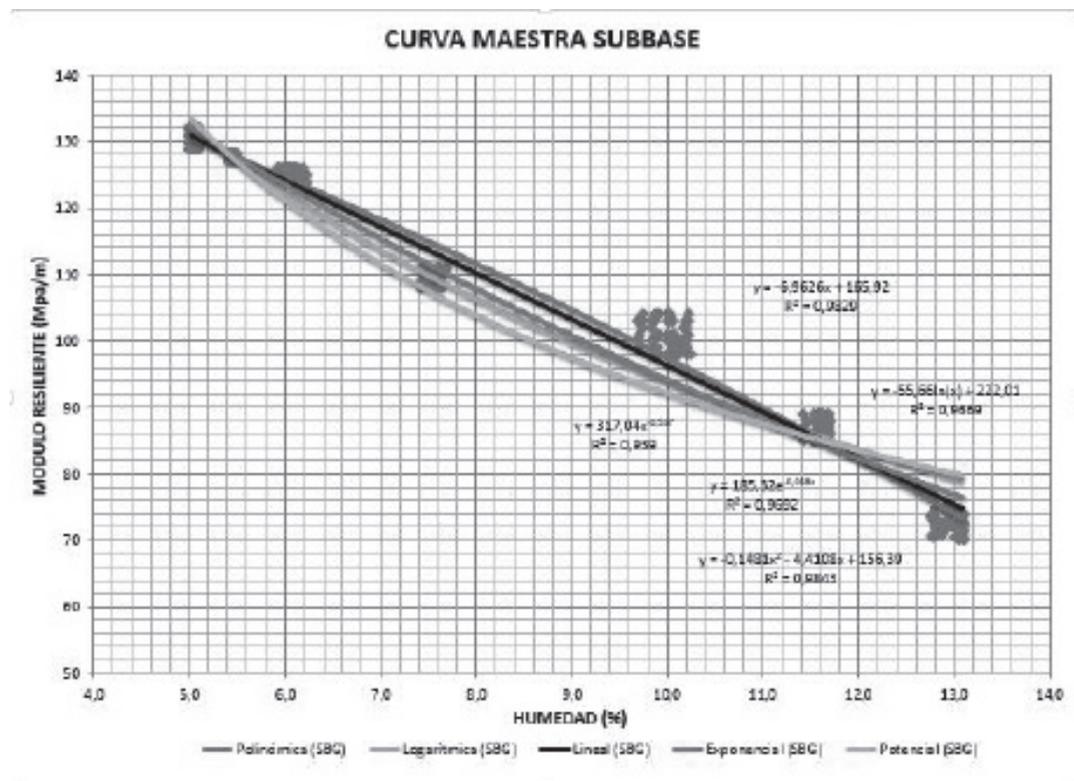


FIGURA 2. MODELOS ESTADÍSTICOS DE LA INFORMACIÓN IN-SITU DE LA SUBBASE GRANULAR. Fuente: Autores. 2013.

En la Tabla II, se presentan las ecuaciones obtenidas por los diferentes modelos estadísticos, el modelo que se ajustó a los datos es el Polinomial con un R^2 de 0.9843, presentando su punto máximo en el eje de las ordenadas a 156.39 Mapa/m.

TABLA II
MODELOS ESTADÍSTICOS DE LA INFORMACIÓN IN-SITU DE LA SUB-BASE GRANULAR.

MODELOS ESTADÍSTICOS		(R ²)
LINEAL	$y = -8.9626x + 165.92$	R ² = 0.9829
POLINOMIAL	$y = -0.1481x^2 - 4.4108x + 156.39$	R ² = 0.9843
POTENCIAL	$y = 317.04x - 0.537$	R ² = 0.939
LOGARITMICA	$y = -55.66 \ln(x) + 222.01$	R ² = 0.9609
EXPONENCIAL	$y = 185.32e^{-0.068x}$	R ² = 0.9692

Después de haber realizado la depuración de la información se obtuvo el modelo para representar la curva maestra para el material de subbase granular del sector 1 tramo 2 de la ruta el sol.

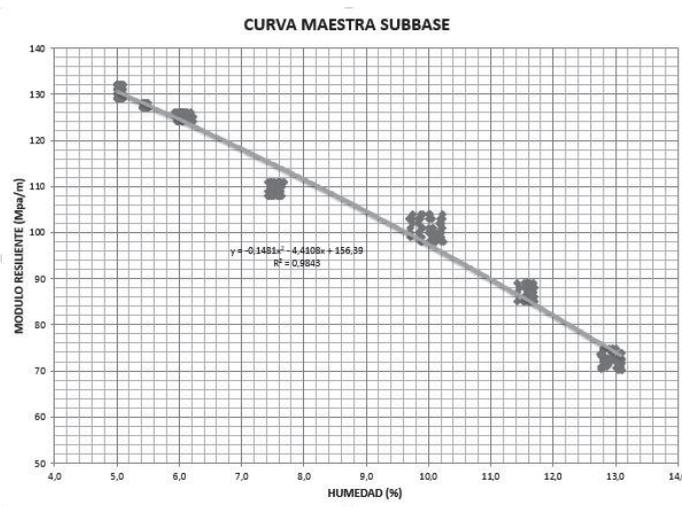


FIGURA 3. CURVA MAESTRA.
Fuente: Autores. 2013.

Una vez determinado el modelo del módulo resiliente para el material de subbase granular del sector 1 tramo 2 de la Ruta el Sol, se presenta la matriz de proyección de módulos de la sub-base granular con el fin de estimar el momento apropiado para realizar la aplicación de la capa posterior y obtener el mejor comportamiento de la estructura de pavimento optimizando el módulo resiliente, como se observa en la Tabla III.

TABLA III
MATRIZ DE PROYECCIÓN DE MÓDULOS DE LA SUB-BASE GRANULAR.

HUMEDAD (%)	MODULO (Mpa/m)
4,0	136
4,5	134
5,0	131
5,5	128
6,0	125
6,5	121
7,0	118
7,5	115
8,0	112
8,5	108
9,0	105
9,5	101
10,0	97
10,5	94
11,0	90

Fuente: Autores. 2013.

Mediciones sobre capa base granular

TABLA IV
FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN IN-SITU DE LA BASE GRANULAR.

HELIOS Consorcio Vial		METODO PARA MEDIR LAS DEFLECCIONES CON UN DEFLECTOMETRO DE PESO LIGERO (LWD) BASE GRANULAR ASTM E-2583						CODIGO: F-13-82 VERSION: 0 FECHA: 15/08/2012				
DESCRIPCIÓN:			TRAMO:		FECHA:		22/07/2013					
ABSCISADO INICIAL:		ABSCISADO FINAL:		No. DE REG.		20002						
No. PUNTO	LOCALIZACIÓN	No. MEDICION	RADIO PLATO (mm)	CARGA (KN)	ESFUERZO (KPa)	MODULO (Mpa/m)	OBSERVACIONES	CAPA	FECHA	CALZADA	CARRIL	HUMEDAD
15	41075	3	200	8,1	150	160		BG	22/07/2013	CZD	C	10.8
16	41080	1	200	8,1	150	163	CZD C	BG	22/07/2013	CZD	C	10.9
16	41080	2	200	8,1	150	162		BG	22/07/2013	CZD	C	10.9
16	41080	3	200	8,1	150	162		BG	22/07/2013	CZD	C	10.9
17	41085	1	200	8,1	150	162	CZD C	BG	22/07/2013	CZD	C	11.0
17	41085	2	200	8,1	150	160		BG	22/07/2013	CZD	C	11.0
17	41085	3	200	8,1	150	163		BG	22/07/2013	CZD	C	11.0
18	41090	1	200	8,1	150	162	CZD C	BG	22/07/2013	CZD	C	10.9
18	41090	2	200	8,1	150	163		BG	22/07/2013	CZD	C	10.9
18	41090	3	200	8,1	150	163		BG	22/07/2013	CZD	C	10.9
19	41095	1	200	8,1	150	160	CZD C	BG	22/07/2013	CZD	C	11.0
19	41095	2	200	8,1	150	163		BG	22/07/2013	CZD	C	11.0
19	41095	3	200	8,1	150	160		BG	22/07/2013	CZD	C	11.0

NOMBRE	REALIZO	REVISÓ	APROBÓ
CARGO			
FIRMA			

Fuente: Autores. 2013.

En la Figura 4, se observan los diferentes modelos estadísticos en donde se analizó el comportamiento más apropiado a la información tomada In-situ, dada la información tomada en campo se analizó que el mejor comportamiento del módulo resiliente respecto a la humedad fue el modelo polinomial.

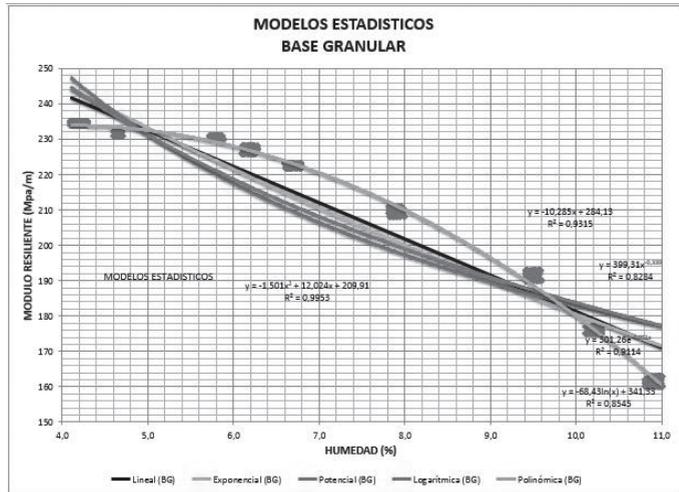


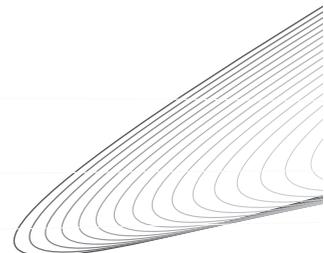
FIGURA 4. MODELOS ESTADÍSTICOS DE LA INFORMACIÓN IN-SITU DE LA BASE GRANULAR.
Fuente: Autores. 2013.

En la Tabla V, se presentan las ecuaciones obtenidas por los diferentes modelos estadísticos, el modelo que se ajustó a los datos es el Polinomial con un R² de 0.9953, presentando su punto máximo en el eje de las ordenadas a 209.91 Mapa/m.

TABLA V
MODELOS ESTADÍSTICOS DE LA INFORMACIÓN IN-SITU DE LA BASE GRANULAR.

MODELOS ESTADISTICOS	(R ²)
LINEAL	$y = -10.285x + 284.13$ R ² = 0.9315
POLINOMIAL	$y = -1.501x^2 + 12.024x + 209.91$ R ² = 0.9953
POTENCIAL	$y = 399.31x^{-0.339}$ R ² = 0.8284
LOGARITMICA	$y = -68.43 \ln(x) + 341.33$ R ² = 0.8545
EXPONENCIAL	$y = 301.26e^{-0.051x}$ R ² = 0.9114

Fuente: Autores. 2013.



Después de haber realizado la depuración de la información se obtuvo el modelo para representar la curva maestra para el material de base granular del sector 1 tramo 2 de la Ruta el Sol, como se observa en la Figura 5.

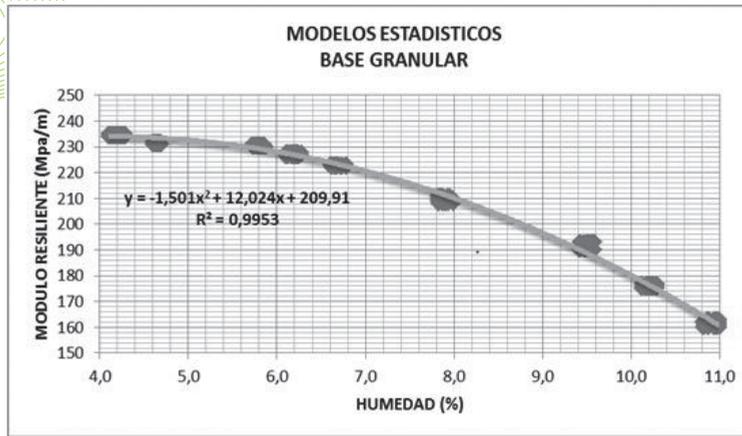


FIGURA 5. CURVA MAESTRA. Fuente: Autores. 2013.

TABLA VI
MATRIZ DE PROYECCIÓN DE MÓDULOS DE LA BASE GRANULAR.

HUMEDAD (%)	MODULO (Mpa/m)
4,0	234
4,5	234
5,0	232
5,5	231
6,0	228
6,5	225
7,0	221
7,5	216
8,0	210
8,5	204
9,0	197
9,5	189
10,0	180
10,5	171
11,0	161

Fuente: Autores. 2013.

Una vez determinado el modelo del módulo resiliente para el material de base granular del sector 1 tramo 2 de la Ruta el Sol, se presenta la matriz de proyección de módulos de la base granular. Esto con el fin de estimar el momento apropiado para realizar la aplicación de imprimación y obtener el mejor comportamiento de la estructura de pavimento, optimizando el módulo resiliente.

B. Verificación de los módulos de diseño de la estructura de pavimento.

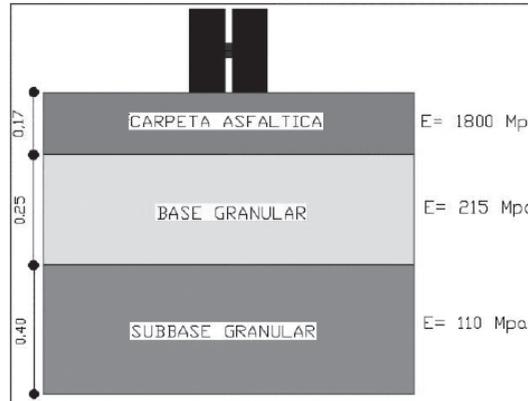


FIGURA 6. MODELO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE SECTOR 1 (TRAMO 2) RUTA DEL SOL. Fuente: Autores. 2013.

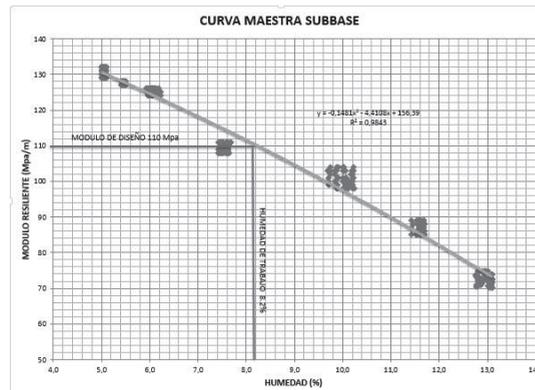


FIGURA 7. VERIFICACIÓN DEL MÓDULO DE DISEÑO DE LA BASE GRANULAR. Fuente: Autores. 2013.

Como se observó en la figura 7, la humedad a la cual se obtiene el valor de módulo de diseño que se ha denominado humedad de trabajo para la capa de subbase granular es de 8.2%. Esta humedad sería la ideal para poder liberar la capa para la puesta de la capa de base; pero como sabemos la dinámica de las obras de construcción no permite a que esperemos que la capa alcance la humedad de trabajo. Por lo tanto, mediante la calibración de la curva maestra podemos hacer la liberación de la capa verificando mediante la matriz de proyección de módulos que la humedad que tomemos en la capa cumpla con el módulo proyectado.

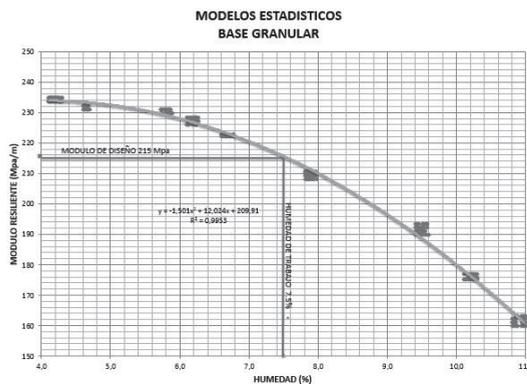


FIGURA 8. VERIFICACIÓN DEL MÓDULO DE DISEÑO DE LA BASE GRANULAR.
Fuente: Autores. 2013.

Como se observó en la figura 8, la humedad a la cual se obtiene el valor de módulo de diseño, que se ha denominado humedad de trabajo para la capa de base granular es de 7.5%. Esta humedad sería la ideal para poder liberar la capa para la puesta del riego de imprimación. Sin embargo, sabemos que la dinámica de las obras de construcción no permite a que esperemos que la capa alcance la humedad de trabajo. Por lo tanto, mediante la calibración de la curva maestra podemos hacer la liberación de la capa verificando mediante la matriz de proyección de módulos que la humedad que tomemos en la capa cumpla con el módulo proyectado.

C. Metodología para la evaluación in-situ de la capacidad de soporte de capas granulares de pavimentos flexibles mediante el uso del LWD

Este capítulo tiene como propósito presentar una metodología que permita hacer seguimiento y análisis al tramo de prueba, estu-

diado a partir de mediciones de deflexiones y humedades. Con el fin de identificar las condiciones de resistencia mecánica de las capas granulares para diferentes porcentajes de humedades y así lograr la liberación de estas capas en conformidad con los parámetros adoptados en el diseño.

La metodología consiste en la toma de datos durante varios días en lugares determinados del tramo de prueba, de deflexiones tomadas con LWD y humedad mediante ensayos de laboratorio, Speedy o con densímetro nuclear, dependiendo de la disponibilidad de éstos.

1) Selección tramo de prueba

Para la selección del tramo de prueba se deben tener en cuenta ciertas características como no haber sido expuesto a cargas de tránsito, estar recientemente conformada la capa a evaluar (1 día), extensión mínima de 100 metros, ancho de 5 metros y no estar imprimado.

El tramo de prueba se debe encontrar cerrado y señalizado para impedir el tránsito sobre él y así evitar posibles alteraciones superficiales y estructurales, por causas diferentes a la disminución de humedad.

2) Tiempos y frecuencias de toma de datos.

a) Tiempo. La toma de información se deberá hacer en las horas de la tarde, para evitar el exceso o aumento de humedad causado por un factor natural en las horas nocturnas y sin lluvias.

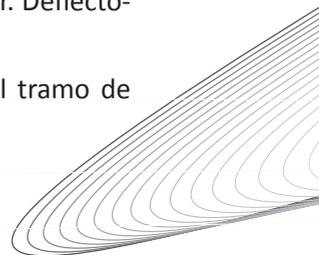
b) Frecuencia. La obtención de datos de humedades y módulos se deben realizar diariamente durante 10 días.

3) Equipos.

a) Humedad. La medición de la humedad se puede hacer por medio de ensayos de laboratorio, Speed y/o nuclear, dependiendo de la disponibilidad de éstos, pero se debe realizar con el mismo ensayo durante todo el tiempo que se realicen las mediciones (10 días).

b) Resistencia de la base Granular. Deflectómetro de impacto liviano (LWD).

4) Distribución de ensayos en el tramo de prueba.



Los puntos ensayados deben ser marcados, de forma que puedan ser identificados.

a) Humedad. La humedad se determinará para 5 puntos por cada día de mediciones, la selección de estos puntos se hará de manera aleatoria, de forma uniforme y distribuidos en toda el área del tramo, evitando tomar datos o muestras en puntos ya intervenidos.

b) Resistencia de las capas Granulares. El tramo de prueba se dividirá en dos franjas y la toma de deflexiones se hará cada 5 metros en tresbolillo tal como se muestra en la figura 1.

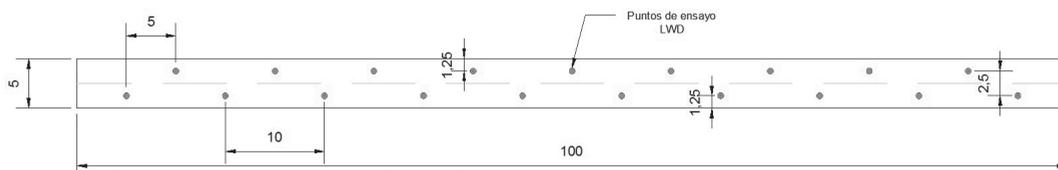


FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE ENSAYOS EN TRAMO DE PRUEBA.
Fuente: Autores. 2013

5) Producto a entregar

a) Humedad.

Los datos de humedad se deben entregar en un archivo Excel, este archivo debe contener como mínimo la siguiente información como la localización del punto de ensayo (Abscisa – franja; FD (Franja derecha) y FI (Franja izquierda), de acuerdo con el sentido de avance del abscisado), fecha, hora, estado del Clima, tipo de ensayo para su determinación y valor obtenido de humedad

b) Resistencia de la capa a evaluar.

La entrega de datos de módulos con el LWD, se debe realizar en archivo kbd o en archivo Excel, como mínimo deben tener la siguiente información como la localización del punto de ensayo (Abscisa – franja; FD (Franja derecha) y FI (Franja izquierda), de acuerdo con el sentido de avance del abscisado), fecha, hora, estado del clima, radio de plato de carga usado, carga, esfuerzo, deformación y módulo.

6) Obtención de las curvas maestras.

Con los resultados obtenidos en campo se procede a graficar en Excel la humedad versus la resistencia de la capa evaluada. Se traza una línea de tendencia y se tabulan en una tabla los valores de módulo para cada punto de humedad.

Con el mejor modelo estadístico que se ajuste a la gráfica obtenemos la ecuación que nos servirá para armar una matriz en la cual optemos diferentes valores de módulo resiliente en función de la humedad de la capa. Esta matriz nos servirá para poder llevar a cabo el proceso de liberación de las capas evaluadas identificando las condiciones de resistencia mecánica de las capas granulares para diferentes porcentajes de humedades y lograr la liberación de estas capas en conformidad con los parámetros adoptados en el diseño.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La estructura de un pavimento está conformada por varias capas granulares de materiales seleccionados que son instalados sobre la subrasante natural y/o mejorada, un modelo estructural de diseño de pavimentos está representado en una clasificación de la capa con ciertas propiedades como Módulos (E), relación de poisson (μ) y espesores (h).

El modelo estructural establecido para la construcción de una vía tiene que cumplir las propiedades según el diseño, pero el control exigido por las entidades contratantes y según la normativa Colombiana, en campo se verificar la compactación de las capas granulares, humedad y recomendaciones de los espesores recomendados para compactar. Los demás parámetros de diseño y especificaciones técnicas de capa una de las capas que conforman la estructura son verificadas en laboratorio, antes de ser instalada o el

momento que el material se está extendiendo, pero no se realiza ningún control en las propiedades o comportamiento después de ser instalada y compactada.

Hay materiales que pueden tener un óptimo comportamiento a la compactación del material según el proctor obtenido en laboratorio, pero no se tiene en cuenta los parámetros realmente utilizados en diseño. En el desarrollo de la metodología se implementó la curva maestra para unos materiales en particular que son empleados para conformar la estructura del pavimento en la doble calzada de la ruta del Sol sector 1 (tramo 2 Guaduas - Koran).

Con el proctor obtenido en laboratorio se obtiene la densidad del material a cierta humedad, que es la humedad de compactación. Pero en el desarrollo de la metodología se optiene una humedad que es la de trabajo, con la cual se establecen parámetros para definir en qué momento se puede liberar una capa para posteriormente instalar la siguiente capa o aplicación de la imprimación.

El material de subbase granular utilizado para la pavimentación de la doble calzada de la ruta del Sol sector 1 (tramo 2 Guaduas - Koran), presentó un comportamiento polinomial al representar gráficamente el módulo resiliente vs. la humedad, aumentando el módulo resiliente con la pérdida de humedad empleada para obtener la compactación máxima del material.

Se obtuvo según los resultados que el módulo para la humedad óptima de compactación no cumple según el diseño de la estructura de pavimento, razón por la cual se construyó la curva maestra y la matriz de proyección del módulo. Teniendo alguno de los modelos presentados gráficamente o con la matriz, se debe hacer el control de humedades día a día según las condiciones climáticas, de esta manera poder liberar la capa y continuar con el proceso constructivo.

Para el material de subbase granular sometido a estudio se obtuvo que la capa de subbase granular se puede liberar después de obtenerse una humedad de trabajo del 8.2% con la cual se obtiene un módulo resiliente de 110 Mpa, el cual se encontraría por encima del módulo de diseño obtenido en el modelo estructural. Una vez obtenida la humedad necesaria para alcanzar el módulo resiliente de la subbase granular y cumpliendo con la

compactación requerida se puede continuar instalando la capa siguiente que en el mayor de los casos es la base granular.

Para el material de base granular sometido a estudio se obtuvo que la capa de base granular se puede liberar después de obtenerse una humedad de trabajo del 7.5% con la cual se obtiene un módulo resiliente de 215 Mpa, el cual se encontraría por encima del módulo de diseño obtenido en el modelo estructural. Una vez obtenida la humedad necesaria para alcanzar el módulo resiliente de la base granular y cumpliendo con la compactación requerida se puede continuar instalando la capa siguiente que en el mayor de los casos es la imprimación.

El tiempo transcurrido desde el día de la compactación hasta el día de liberación de la capa puede variar según la altura del proyecto, la humedad de la zona y condiciones climáticas presentes durante el período de liberación de la capa.

En el momento de construcción de la vía se debe dejar las obras de drenaje necesarias para evitar alteraciones en las propiedades de la capa granular, ya que la humedad es un parámetro esencial para estabilidad de la estructura.

El modelo de proyección y matriz de proyección presentada es aplicable para según la capa de subbase o base granular, para los materiales que se están instalando actualmente para la construcción de la ruta del Sol sector 1 (tramo 2 Guaduas - Koran).

Esta metodología para liberar las capas es exigente en el proceso constructivo para cumplir con los parámetros del modelo estructural, se debe hacer una sectorización de secciones homogéneas tanto de la capacidad de soporte de la subrasante (CBR), hasta llegar al nivel de imprimir para proceder a instalar la capa de rodadura.

Como tema de control técnico, se obtuvo que el material instalado para conformar las capas de subbase y base granular cumplen los parámetros de espesor, módulo resiliente, compactación del material y demás obtenidos ensayos practicados en laboratorio.

Si el control en cada una de las capas construidas se hace como se desarrolló en la metodología tenga por seguro que la estructura presentará un buen desempeño para satisfacer adecuadamente las funciones del



pavimento. Éste debe ser capaz de resistir a las cargas impuestas por el tránsito establecido en el diseño, disminuyendo los costos de mantenimiento y postergando el tiempo de rehabilitación de la vía.

La metodología empleada tiene ventajas en la toma de la información ya que es rápida y segura, además se puede obtener resultados In-situ. El equipo para el desarrollo de la metodología es el deflectómetro de impacto liviano (LWD), en caso de que la entidad que controla el diseño no tenga el capital para adquirirlo hay laboratorios que prestan dicho servicio, y de esta manera se garantiza la estabilidad de la obra.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El control de humedad en el proceso constructivo de cualquier capa granular es fundamental para el buen comportamiento de las capas dentro de la estructura del pavimento, de manera que es importante manejar obras de drenaje para evitar saturación en los materiales y que en el período de operación no hayan alteraciones en los módulos.

Con el incremento del tiempo (días) disminuye la humedad porque hay un proceso de evaporación y el material se seca, de modo que el módulo resiliente a medida que pierde humedad gana resistencia mecánica, hasta llegar a los valores de módulo con los cuales se diseñó el pavimento.

La pendiente del comportamiento entre la humedad vs. el módulo resiliente incrementa a medida que los materiales presentan mejor gradación y propiedades físico-mecánicas, con el transcurrir del tiempo (días) el módulo de los materiales granulares incrementará con la disminución del porcentaje de humedad.

El mayor inconveniente a sortear para liberar capas granulares no ligadas con deflectometría de impacto, es el tiempo requerido después de su conformación para que se reduzca la humedad óptima de compactación a una humedad de trabajo con la cual normalmente se alcanzan las resistencias de diseño, inconveniente que se puede tratar obteniendo una curva maestra Humedad – Módulo Resiliente, que permita obtener módulos equivalentes al de diseño para diferentes humedades del material componente de una capa.

La liberación de capas no ligadas (SBR, SBG, BG), a través de parámetros de resistencia (Módulo Resiliente) es posible, para lo cual se debe adoptar una metodología clara en los procedimientos de medición, y características de configuración del equipo, para llegar a representar de una forma adecuada las condiciones de trabajo de las capas evaluadas.

Como resultado de la investigación se propuso la metodología adecuada para poder obtener la curva maestra que permita aplicar el ensayo de deflectometría de impacto con LWD, en la liberación de capas no ligadas, sin que sea necesario esperar la reducción de la humedad de compactación a la de trabajo, mayor inconveniente que se presentaba en la aplicación de este ensayo, dada la premura y dinámica de las obras de construcción de vías.

El buen comportamiento de la estructura de pavimento depende del excelente proceso constructivo para llevar a cabo el cumplimiento de los parámetros de diseño, el control de humedades durante el proceso de instalación, compactación y tiempo para liberar las capas es fundamental para la estabilidad de la obra. Se debe sectorizar para sacar secciones homogéneas desde la subrasante hasta la capa posterior a la capa de rodadura, tener buen control de los espesores y la humedad de trabajo para garantizar el módulo empleado en el modelo estructural. El laboratorista que toma la información debe ser capacitado para que tenga conocimiento de la metodología empleada para que la información tomada sea verídica y pertinente para ser procesada.

Se debe realizar el ensayo a los materiales a emplear para conformar la estructura del pavimento y obtener la curva maestra y/o la matriz de proyecciones, con base en la información recolectada. De esta manera se determina el momento indicado para liberar las capas granular y continuar con el proceso constructivo. Este procedimiento se debe realizar para cada una de las capas a emplear. Las condiciones climáticas son fundamentales para el buen desempeño de las capas granulares en el modelo, razón por la cual se requiere que el material no reciba más agua de la recomendada, y que en el proceso de liberación si se presentan lluvias la capa sea protegida para evitar que haya infiltración de agua y retrase el proceso constructivo, o que perjudique las propiedades del material con la pérdida de finos y aumento de vacíos en la capa.

Si las condiciones climáticas son similares se recomienda tomar los datos a la misma hora, manteniendo la misma frecuencia de tiempo. Es importante tomar las lecturas con (LWD) en el mismo punto desde el día cero hasta el día que se libere la capa para sacar la curva maestra. Después de tener la curva maestra o la matriz de proyecciones es necesario realizar el control de humedad de trabajo para la liberación de las capas sin alterar las muestras, se debe tener en cuenta si la zona donde se tomaron les ingresa luz solar o si no tienen acceso por obstáculos aledaños.

El modelo de proyección y matriz de proyección presentada es aplicable para según la capa de subbase o base granular, para los materiales que se están instalando actualmente para la construcción de la ruta del Sol sector 1 (tramo 2 Guaduas - Koran).

Para poder utilizar la curva maestra y la matriz de proyección de módulos en materiales granulares de distintas propiedades mecánicas, se debe seguir la metodología planteada en este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Queremos con toda nuestra fe y esfuerzo, primero que nada, dedicarle este trabajo a Dios que siempre nos guía y acompaña, a nuestros padres quienes nos guiaron con sus consejos y sabiduría para no rendirnos en este paso que hemos dado en nuestra vida y cumplir con esta meta. A nuestros hermanos por su cariño, comprensión y colaboración. A todos los ingenieros que han contribuido a mi formación académica y como persona.

Un sincero agradecimiento al ingeniero Néstor Perico, quien durante el desarrollo de éste estuvo al tanto de las situaciones que se presentaban, que quien con sus ideas, conocimientos, tiempo y paciencia, nos guió y animó en la culminación de este trabajo.

REFERENCIAS

Collop, A., Armitage, R., y Thom, N. (2001). Assessing Variability of In Situ Pavement Material Stiffness Moduli. *Journal of Transportation Engineering*, págs. 74-81.

Fleming, P., Lambert, J., y Frost, M. (2007). A Review of the Lightweight Deflectometer for Routine In situ Assessment of Pavement Material Stiffness, 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, 2007. 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: Transportation Research Board.

Kamiura, M., Sekine, E., y Maruyam, T. (2000). KAMStiffness evaluation of the subgrade and granular aggregates using the portable FWD. Dawson Balkema.

Van, G. C., Groenendijk, J., y Beuving, E. (2002). Experience with various types of foundation tests, KOAC-WMD Dutch Road Research Laboratories. Netherlands.

