

ESTUDIO PARA LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO DESDE LA CALLE 245  
HASTA EL PEAJE ANDES DE LA ABSCISA K1+700 A K2+800 SENTIDO SUR  
NORTE BASADOS EN MÉTODOS DE RETRO CÁLCULO.



ING. JUAN SEBASTIAN LÓPEZ NIÑO

Cód. 6100270

ING. JOSÉ GONZALO RÍOS

Director Especialización en Ingeniería de Pavimentos

ING. JULIAN HURTADO, MsC

Director Investigación

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

JUNIO 29 DE 2017

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETTIVOS .....	2
General .....	2
Específicos.....	2
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 Pavimento Flexible .....	4
3.1.1 Método de diferencias acumuladas .....	4
3.1.2 Secciones Homogéneas.....	5
3.1.3 Número estructural .....	5
3.1.4 Ensayo FWD.....	5
3.1.5 Parámetros Horak.....	7
3.1.6 Modelo Rubicon.....	8
3.1.7 Modelo YONAPAVE .....	8
4. MARCO GEOGRÁFICO .....	9
5. METODOLOGÍA.....	10
6. DESARROLLO Y RESULTADOS.....	11
6.1 Factor de Corrección de Carga: .....	12
6.2 Factor de Corrección por Temperatura: .....	12
6.3 Determinación de Zonas Homogéneas por Diferencias Acumuladas: .....	13
6.4 Evaluación Estadística por Zona: .....	14
6.5 Determinación de Números Estructurales Método Yonapave.....	15
6.5.1 Área del Cuenco de Deflexiones: .....	15
6.5.2 Longitud característica-Yonapave: .....	16
6.5.3 Módulo Equivalente de la Subrasante: .....	17
6.5.4 Cálculo de Numero Estructural Efectivo. ....	18
6.6 Proyección de Transito.....	18
6.7 Evaluación por Método AASHTO - 93.....	20
6.8 Determinación Espesores de Refuerzo por Aportes de Capa Asfáltica. 21	
6.9 Evaluación por Parámetros Horak. ....	21
6.10 Retro Cálculo de Módulos Modelo Rubicon.....	23
6.11 Evaluación por Fatiga y Ahuellamiento modelo Bisar 3. ....	24
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	26
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	29
Bibliografía .....	29

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 DESCRIPCIÓN PARÁMETROS HORAK.....	8
Tabla 2 Resumen Datos FWD Originales .....	11
Tabla 3 Deflexiones Normalizadas a una Carga Patrón.....	12
Tabla 4 Datos Corregidos por Carga y Temperatura .....	13
Tabla 5 Descripción de Zonas Homogéneas.....	14
Tabla 6 Análisis Estadístico de las Zonas Homogéneas.....	15
Tabla 7 Estimación de áreas para cada cuenco.....	16
Tabla 8 Tabla para coeficientes de ajuste .....	16
Tabla 9 Resumen de Longitudes Características para cada Zona.....	17
Tabla 10 Módulos Equivalentes para Cada Zona.....	17
Tabla 11 Factor Carril de diseño .....	18
Tabla 12 Cálculo Tasa de Crecimiento .....	19
Tabla 13 Cálculo Transito Equivalente Diario.....	19
Tabla 14 Espesor de Refuerzo Z-1 .....	21
Tabla 15 Espesor de Refuerzo Z-2 .....	21
Tabla 16 Espesor de Refuerzo Z-3 .....	21

## LISTA DE GRÁFICOS.

1 Equipo de Ensayo FWD .....	6
2 Localización Tramo en Estudio .....	9
3 Ábaco para factor de ajuste.....	13
4 Gráfica Determinación Zonas Homogéneas.....	14
5 Número Estructural Requerido Z-1 .....	20
6 Número Estructural Requerido Z-2.....	20
7 Número Estructural Requerido Z-3.....	21
8 Condición de Estado Capa de Rodadura y Base .....	22
9 Condición de Estado Capa de Sub-base .....	22
10 Condición de Estado Capa de Sub-rasante .....	22
11 Cuenco Original.....	23
12 Cuenco con ajuste de error. ....	24

## **ESTUDIO PARA LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO DESDE LA CALLE 245 HASTA EL PEAJE ANDES DE LA ABSCISA K1+700 A K2+800 SENTIDO SUR NORTE BASADOS EN MÉTODOS DE RETRO CÁLCULO.**

### 1. INTRODUCCIÓN

Día a día la inversión de recursos para la intervención de obras públicas, en este caso vías, se hace de forma más reducida y las necesidades cada vez son mayores, “El Ministerio de Hacienda plantea trasladar \$1,5 billones que están destinados a proyectos de ciencia y tecnología para proyectos de vías terciarias como cumplimiento a los acuerdos de paz El problema es que **como máximo se atenderían 3.000 kilómetros, cerca del 2% de los 140.000 kilómetros de vías terciarias que requieren atención y que por orden del Gobierno**, son responsabilidad de los regionales que, nuevamente, se quejan de falta de recursos para esta causa” (Revista Dinero, 2017), sumado a esto sí se tiene en cuenta el hecho de que año a año el parque automotor crece y por ende la demanda en el uso de las vías también crece. Como consecuencia de ello es el evidente avance en el deterioro de nuestras vías tanto nacionales y como no, las vías urbanas.

Para ello se hace necesario que con la premisa de recursos limitados (económicos y naturales), se busquen alternativas para mejorar las condiciones, se realicen intervenciones que van desde un sencillo sello de fisuras, pasando por alternativas como sobre-carpetas hasta procesos más complejos como el reemplazo total o parcial de la estructura.

Hasta no hace mucho tiempo la decisión del tipo de intervención dependía de quien realizara la visita e inspección y a quien se considerará como la persona más experimentada; sin quitar la importancia que tiene aplicar experiencia a la evaluación de pavimentos; es claro que para esta toma de decisiones no era recurrente el uso de métodos con los cuales se obtuvieran resultados más certeros y con los que realmente se pudiera tener un parámetro base para diseñar y determinar rehabilitaciones concienzudas.

Las evaluaciones que toman en consideración aspectos del comportamiento mecánico son aquellos análisis apoyados en la respuesta de la estructura ante la aplicación de cargas, quizá el ensayo que más toma fuerza bajo estas premisas es el ensayo FWD.

Analizando los resultados del ensayo de FWD se hace posible determinar la condición actual de la estructura, y con base en ello proponer la mejor alternativa de mejora para el tramo en estudio.

Es por eso el motivo del siguiente informe en el cual, se eligió un sector de vía que ya presenta un grado considerable de deterioro, a dicho tramo se le realizó la evaluación con el ensayo de FWD, punto de partida para los análisis del mismo.

## 2. OBJETIVOS

General

Presentar una alternativa de rehabilitación para el tramo de la calle 245 hacia el peaje de la abscisa k1+700 a k2+800 desde la calle 245 hacia el peaje Andes sentido sur-norte, en donde se apliquen diferentes modelos y ayudas de tipo software para cumplir con el objetivo.

Específicos

- Estar en la capacidad de identificar alternativas de rehabilitación en tramos viales que representen puntos neurálgicos para una comunidad o población, enfocados siempre en la optimización de recursos primordialmente económicos, además de generar alternativas que sean realmente de calidad y duraderas.
- Generar el diagnóstico del estado actual, analizando por capas la estructura, usando parámetros Horak para ello.
- Emplear modelos para determinar condiciones estructurales, en donde no sea necesario la intervención física (apiques) del tramo.
- Calcular los módulos propios de las capas mediante el uso de modelos de computadora.

- Estimar la capacidad residual del tramo en mención, bajo condiciones de fatiga y ahuellamiento.
- Lograr identificar problemas que quizá no estén asociados al funcionamiento pavimento-tráfico, sino otro tipo de factores externos.



### 3. MARCO TEÓRICO.

#### 3.1 Pavimento Flexible

Aquella estructura que flexa en su totalidad al recibir cargas, su función además de impermeabilizar consiste en disipar cargas pasando de puntuales a distribuidas.

##### 3.1.1 Método de diferencias acumuladas

El método de las diferencias acumuladas es un método estadístico utilizado por la AASHTO 1993 conforme al apéndice de la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos, para establecer Secciones Homogéneas.

Los pasos previos para determinar las secciones son:

1. En una primera columna discriminar las abscisas del ensayo.
2. La segunda columna se denomina Distancia de Intervalo muestra las diferencias entre las abscisas de la primera columna.
3. La tercera columna se denomina Distancia Acumulada, es la suma acumulada de la columna dos.
4. La cuarta corresponde a la deflexión medida para cada punto de la abscisa, la deflexión corresponde a la que se desea estudiar normalmente es la deflexión máxima es decir  $D_0$ .
5. La quinta columna es el promedio entre las deflexiones.
6. La sexta columna se denomina como el área del intervalo y no es más que la multiplicación entre la distancia acumulada y el promedio entre las deflexiones.
7. La columna siguiente es el Área Acumulada, allí se suman las áreas.
8. Al finalizar dicha columna se realiza el producto entre el área acumulada y la distancia o longitud total del tramo, a esta división se le denomina como factor de diferencia.

9. La última columna alberga la resta entre el área acumulada y la multiplicación del factor de diferencia y la distancia acumulado para cada dato. (Castro, 2009)

### 3.1.2 Secciones Homogéneas

Interpretación de la gráfica (abscisas vs. columna diferencia acumulada) del método anteriormente descrito en el cual se busca sectorizar el tramo en sub-sectores que presenten el mismo comportamiento de pendiente.

### 3.1.3 Número estructural

Es el número que expresa la resistencia del pavimento en términos del valor de soporte del suelo, del equivalente diario de 18 kips de carga por eje, del índice de utilidad y del factor regional. Los coeficientes adecuados convierten el valor SN en el espesor real de la carpeta, de la base y de la sub-base. (CUEVA DEL INGENIERO CIVIL, 2010)

### 3.1.4 Ensayo FWD

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente, la carga es producida por el tránsito vehicular. (M. Salgado Torres, 2002)

Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco de deflexión

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

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

Este método involucra una evaluación directa de la resistencia de la subrasante y el pavimento existente.

En pavimentos flexibles se utiliza para determinar el módulo resiliente de la subrasante, mientras que para pavimentos rígidos se utiliza para determinar la transferencia de carga en juntas y fisuras, estimar el módulo de reacción efectivo de la subrasante y el módulo de elasticidad del concreto.

El deflectómetro de impacto se fundamenta en la generación de una onda de carga en el pavimento o sobre la capa por estudiar. La onda es ocasionada por el impacto de la caída de una masa, y es transmitida al pavimento por medio de un sistema de amortiguadores elásticos apoyados sobre una placa de carga. (Higuera Sandoval, 2010)

*1 Equipo de Ensayo FWD*



Fuete: Propia, Equipo de la compañía Itineris

### 3.1.5 Parámetros Horak

Las mediciones de deflexión de estructuras de pavimento se utilizan para realizar análisis estructurales con el propósito de diseño de rehabilitación, así como para el monitoreo de redes de pavimento. Los equipos más antiguos, como la viga de Benkelman y el deflectógrafo de La Croix, se utilizaron ampliamente en el pasado y se desarrollaron diversas relaciones empíricas para el análisis y el diseño de superposición de organizaciones como Shell, el Asphalt Institute y TRRL. En la mayoría de los casos sólo se utilizó la forma del cuenco de deflexión y la importancia de su relación con la respuesta estructural del pavimento fueron básicamente ignorados y desperdiciados.

La mejora en los dispositivos de medición de deflexión no destructivos dio como resultado la capacidad de medir con exactitud todo el cuenco de deflexión y permitió el uso de todo el cuenco de deflexión en el análisis estructural de carreteras y pavimentos.

El proceso de análisis estructural del pavimento usualmente usa un enfoque multifacético con algunas o todas las siguientes actividades: auscultaciones visuales, ensayos instrumentales (tales como FWD y calidad de conducción), muestreo de material de campo, pruebas de laboratorio, etc. Actúan como indicadores de condición estructural y permiten que los parámetros del cuenco de deflexión del FWD se utilicen como aproximación de filtrado. Esto se hace mediante el cálculo de ellos a lo largo de la longitud del pavimento, y su uso para identificar y señalar las deficiencias estructurales en las diversas capas.

La deflexión máxima por sí sola es un instrumento contundente, ya que otras capas de pavimento a menudo omiten este valor máximo de deflexión, y no facilita localizar la capa de deficiencia estructural en la estructura total del pavimento. Los diferentes parámetros de curvatura funcionan de manera menos eficaz con los datos FWD, ya que pueden confundirse por la proximidad entre el borde de la placa de carga y el geófono con una distancia de 200 mm. Esto puede explicar algunos de los problemas que se plantean en la estimación de la carga admisible de la curvatura FWD, ya que varía notablemente con el espesor de revestimiento, lo que ha llevado a la exclusión de curvaturas de diseño predichas para revestimientos de asfalto de menos de 40 mm de espesor en los procedimientos Austroads 2004 Guide. Los nuevos parámetros

del cuenco de deflexión ofrecen una mejora en la interpretación del cuenco. (HORAK, 1988)

Tabla 1 DESCRIPCIÓN PARÁMETROS HORAK

Tipo de Estructura	Calificación Condición Estructural	PARÁMETROS DEL CUENCO DE DEFLEXIÓN			
		Do (µm)	BLI (µm)	MLI (µm)	LLI (µm)
GRANULAR BASE	BUENO	<500	<200	<100	<50
	MONITOREO	500-750	200-400	100-200	50-100
	CRITICO	>750	>400	>200	>100
CEMENTADA	BUENO	<200	<100	<50	<40
	MONITOREO	200-400	100-300	50-100	40-80
	CRITICO	>400	>300	>100	>80
ASFÁLTICA	BUENO	<400	<200	<100	<50
	MONITOREO	400-600	200-400	100-150	50-80
	CRITICO	>600	>400	>150	>80

1

### 3.1.6 Modelo Rubicon

Conjunto de herramientas que pueden aumentar en gran medida la productividad de los ingenieros involucrados con el diseño de la rehabilitación del pavimento. Herramientas avanzadas tales como simulación de Monte Carlo y Elementos Finitos pueden mejorar la profundidad y el alcance de análisis pavimento y los cálculos de diseño.<sup>2</sup>

### 3.1.7 Modelo YONAPAVE

Utiliza la base de las relaciones del modelo Hogg, junto con el programa Modulus para generar curvas, a partir de las cuales los valores de módulo pueden ser inferidos basados en las características de un cuenco de deflexión individual.

Permite rápidas estimaciones estructurales en el campo. La simplicidad del método y su independencia del uso de sofisticados programas de computadora hacen de

<sup>1</sup> Tomada de la presentación "Evaluación Estructural de Pavimentos" del docente Carol Bockelmann, número de diapositiva 36.

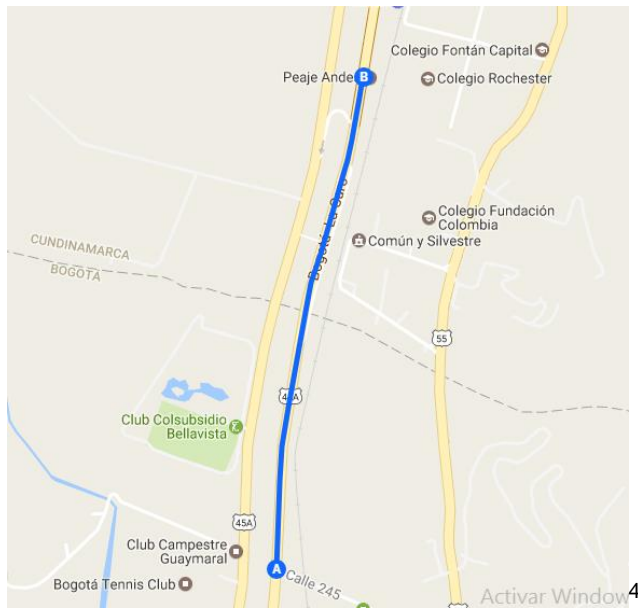
<sup>2</sup> Definición tomada de la página <http://www.rubicontoolbox.com/>.

YONAPAVE un método apto para evaluar las necesidades estructurales de una red de carreteras y hacer un estimativo de los costos usando la información deflectometría del FWD. Con el reiterado uso y la cimentación de experiencia local, sumado a la comparación y calibración con otros métodos de evaluación estructural y cálculo de refuerzos, YONAPAVE puede constituirse en el método adoptado para determinar las necesidades de refuerzo a nivel de proyecto ejecutivo. (Hogg, 1944)<sup>3</sup>

#### 4. MARCO GEOGRÁFICO

El área geográfica en la cual se encuentra el tramo de ensayo se ubica en el departamento de Cundinamarca; ciudad de Bogotá, sector humedal de “Torca”, en la calle 245, constituido totalmente por pavimento flexible, la longitud del tramo es de 7 km aproximadamente, sin embargo, la evaluación se realizará en 1 km de vía, sobre el carril externo de la abscisa k1+700 a k2+800 sentido sur norte.

Esta vía resulta de interés puesto que es uno de los puntos de conexión entre la carrera séptima y la Caro, por ende será uno de los puntos de enlace y como ruta de descongestión, según un estudio realizado para las vías de acceso norte circulan en promedio 2.200 vehículos (incluidas motocicletas) hora (CERÓN, 2016), de acuerdo a las composiciones vehiculares para Cundinamarca y Bogotá de este total un 34% son motocicletas (Economía, 2016), lo que indica que los vehículos serían 1.452 v/hora en promedio.



## 5. METODOLOGÍA.

El informe se desarrolló con la recolección de datos crudos de campo, del ensayo FWD, estos datos pasaron por un proceso de análisis y a los cuales se les realizó un procesamiento por diferentes modelos de cálculo (YONAPAVE, AASHTO93, Rubicon, Bisar).

A los crudos del ensayo FWD, se les realizó las correcciones para normalizar por carga (40 kN) esto de acuerdo a lo que recomienda la norma, luego se realiza la verificación por temperatura a (20°).

Luego de esto se estimaron zonas homogéneas por medio del método de diferencias acumuladas, con los datos de las zonas se realizó la evaluación estadística para determinar valores de deflexión y área, para proceder con lo que se describe en el siguiente párrafo.

El método YONAPAVE, se usó para determinar el número estructural en servicio (SN efectivo), este será comparado con el número estructural del pavimento requerido, así se puede determinar de ante mano en qué estado se encuentra la estructura en comparación con los requerimientos de acuerdo a un estimativo de ejes equivalentes proyectados a N años.

---

<sup>4</sup> Adaptado de Google Maps.

Seguido a ello se evalúan los parámetros Horak, para determinar el estado de cada capa a lo largo del tramo evaluado. Esta será la primera noción y los primeros análisis que se realizarán.

Además, con el dato de conteos se realizará una proyección vehicular, para estimar por medio del método AASHTO-93, los requerimientos estructurales futuros del tramo.

Se realizó un análisis por fatiga y ahuellamiento, considerando así que la evaluación de la estructura se encuentra completa; con esto último es posible estimar cuanto le debería de quedar en servicio o si finalmente ya se completó la condición de servicio para la que fue diseñado.

Al final se presenta si es de caso una alternativa de rehabilitación basado en los resultados antes obtenidos.

## 6. DESARROLLO Y RESULTADOS

Luego de recibidos los datos crudos del ensayo FWD, se escogen las deflexiones del tercer golpe, en el cual es de suponer el equipo ya ajusto la carga aplicada, por ende, la deflexión resultara más confiable, los datos organizados y filtrados son los siguientes:

Tabla 2 Resumen Datos FWD Originales

ABS	Datos Obtenidos en Campo									
	Carga	Temperatura		Deflexiones Medidas ( $\mu\text{m}$ )						
		Pav,	Aire	d <sub>0</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>
km	kN	°C	°C	0 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
K1+700	40,9	13,9	15	94	75	69	63	55	51	48
K1+800	41,2	13,6	15	107	74	66	60	55	49	45
K1+900	41	13,5	15	87	67	59	52	47	40	39
K2+000	41,6	13,9	15	103	79	61	46	32	20	8
K2+100	41,2	14	15	79	65	58	51	46	40	37
K2+200	41,1	13,8	14	97	83	72	64	57	52	46
K2+300	40,9	13,6	15	124	109	92	76	61	53	46
K2+400	40,7	13,6	15	152	124	104	85	72	63	55
K2+500	41,1	13,6	15	164	152	125	99	76	61	48
K2+600	41,3	13,6	15	100	87	66	49	36	29	25
K2+800	41,2	14,5	16	110	99	83	70	59	51	43

Fuente: Elaboración Propia.



6.1 Factor de Corrección de Carga:

Como se observa en la columna de carga, estas tienes diferentes valores de aplicación, para seguridad de los cálculos las cargas se van a normalizar a una carga normalizada de 40 kN, la fórmula empleada es la siguiente:

$$d_{\text{corregida por carga}} = \frac{d_i * \text{carga normalizada}}{\text{carga aplicada}}$$

Tabla 3 Deflexiones Normalizadas a una Carga Patrón

h CA (cm)	Datos normalizados a 40 kN (todos)						
	Deflexiones Medidas (µm)						
	d <sub>0</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>
	0 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
30	92	73	67	62	54	50	47
30	104	72	64	58	53	48	44
30	85	65	58	51	46	39	38
55	99	76	59	44	31	19	8
55	77	63	56	50	45	39	36
55	94	81	70	62	55	51	45
55	121	107	90	74	60	52	45
55	149	122	102	84	71	62	54
55	160	148	122	96	74	59	47
55	97	84	64	47	35	28	24
55	107	96	81	68	57	50	42

Fuente: Elaboración Propia

6.2 Factor de Corrección por Temperatura:

También es cierto que las temperaturas a las que se tomó el ensayo fueron variables, por ello también se debe realizar la corrección por temperatura, los valores de la temperatura patrón deben tener en cuenta la temperatura ambiente de la zona de evaluación, puesto que una mala interpretación de este dato traerá consecuencias de sub-estimación o el caso contrario sobrevaloración de la estructura. Para este caso puntual se considerará como temperatura 20° (68 °F), espesor de capeta 20 cm ó 8”.

La norma AASHTO 93, considera la siguiente expresión para dicha corrección:

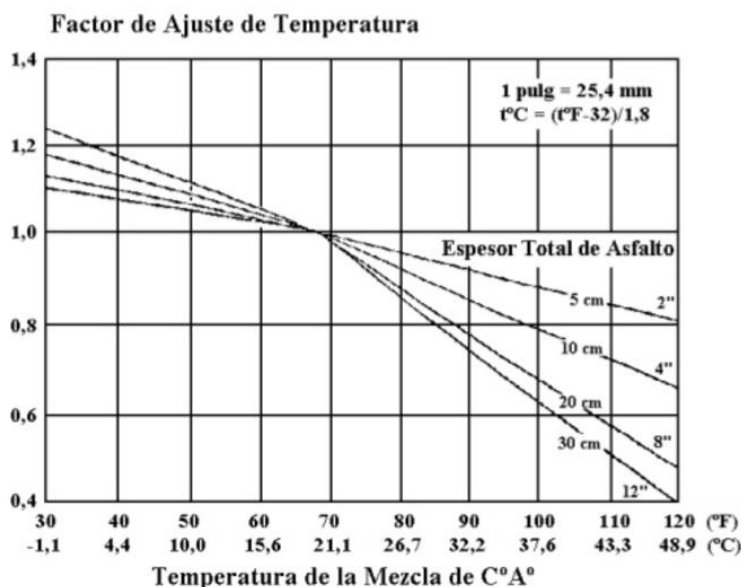
$$d_{\text{corregida por temperatura}} = d_{\text{corregida por carga}} * \text{factor de ajuste}$$

El factor de ajuste se obtiene de la siguiente gráfica, en ella se debe ingresar con el espesor de la carpeta existente (promedio 48,75 cm)<sup>5</sup> (ECHEVARRIA, 2015) y la temperatura patrón (68° F), sin embargo con este espesor de carpeta la gráfica no cuenta con una curva, lo que indica que no habría un factor de ajuste por temperatura, simplemente el factor sería 1, a continuación

<sup>5</sup> Valor tomado del mencionado informe pág.88

se presenta la gráfica para los diferentes factores de ajuste en función del espesor.

3 Ábaco para factor de ajuste



(AASHTO, 1993)<sup>6</sup>

Tabla 4 Datos Corregidos por Carga y Temperatura

factor de ajuste T(t)	Datos normalizados a 20°C - 68 °F (todos)						
	Deflexiones Medidas (µm)						
	d <sub>0</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>
	0 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
1,00	92	73	67	62	54	50	47
	104	72	64	58	53	48	44
	85	65	58	51	46	39	38
	99	76	59	44	31	19	8
	77	63	56	50	45	39	36
	94	81	70	62	55	51	45
	121	107	90	74	60	52	45
	149	122	102	84	71	62	54
	160	148	122	96	74	59	47
	97	84	64	47	35	28	24
107	96	81	68	57	50	42	

6.3 Determinación de Zonas Homogéneas por Diferencias Acumuladas:

Con el modelo estadístico de zonas homogéneas, resulta más fácil y práctico la interpretación del comportamiento de la estructura a partir de las deflexiones máximas <sup>7</sup>, de allí se deducen tres zonas, marcadas por sus abscisados, con ellos se realizará el siguiente desarrollo que tendrá que ver con la determinación de parámetros estructurales.

<sup>6</sup> Capitulo XI: Rehabilitación de Pavimentos con Refuerzo Método AASHTO – 93 , Pág. 176

<sup>7</sup> Nota del Autor: Todo do el procedimiento del cálculo de diferencias acumuladas se presenta en el anexo 1, "Zonas Homogéneas".

4 Gráfica Determinación Zonas Homogéneas

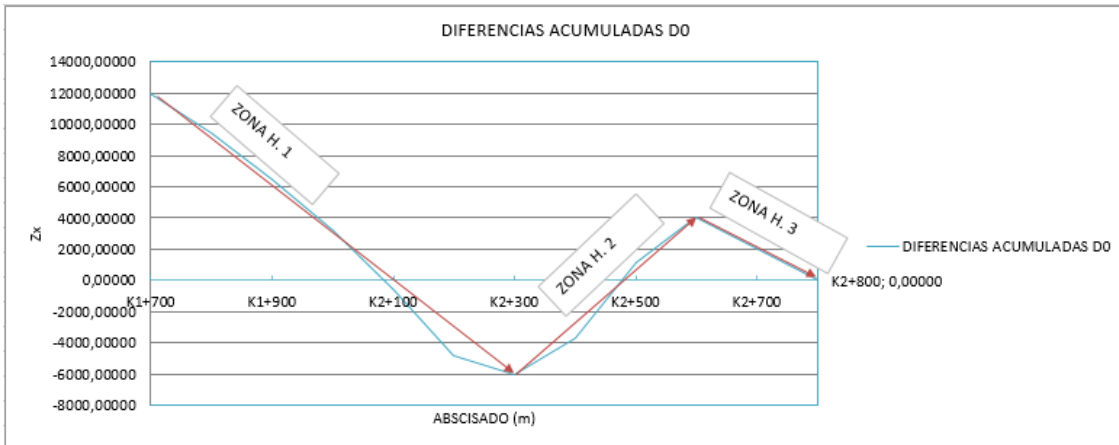


Tabla 5 Descripción de Zonas Homogéneas

Número de Zona	Abscisas de Análisis
1	K1+700 a K2+300
2	K2+301 a K2+600
3	K2+601 a K2+800

Fuente: Propia

6.4 Evaluación Estadística por Zona:

Como punto de partida, se debe escoger una deflexión máxima para cada zona homogénea, pero esto por sí solo no representa un punto de partida confiable. Para ello se hace una evaluación con el promedio y sobre este se evalúa el coeficiente de variación este no debe ser mayor a 0,45, de no ser así se debe realizar la escogencia del dato por el percentil 85 tomando como referencia la desviación estándar. El conjunto de datos que se evalúa es el mismo que se escoge para los tramos de zonas homogéneas, dicho esto se presentan las evaluaciones de cada zona:

Tabla 6 Análisis Estadístico de las Zonas Homogéneas

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ZONA 1		
K1+700 - K2+301	D0	ÁREA (in)
PROMEDIO	96,02	27,46
DESVIACIÓN ESTANDAR	14,29	1,81
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0,148838257	0,066079849
PERCENTIL 85	NO APLICA	NO APLICA

Fuente: Propia

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ZONA 2		
K2+301 - K2+600	D0	ÁREA (in)
PROMEDIO	131,78	28,42
DESVIACIÓN ESTANDAR	1,30	1,30
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0,009847787	0,045665169
PERCENTIL 85	NO APLICA	NO APLICA

Fuente: Propia

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ZONA 3		
K2+601 - K2+800	D0	ÁREA (in)
PROMEDIO	101,82	28,49
DESVIACIÓN ESTANDAR	29,38	1,68
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0,288584573	0,058897358
PERCENTIL 85	NO APLICA	NO APLICA

Fuente: Propia

## 6.5 Determinación de Números Estructurales Método Yonapave.

Prima este método debido, a que no se cuenta y no fue posible la toma de apiques para la determinación de espesores, como se mencionó en numeral 3.1.7, este es un modelo que no depende directamente de los espesores de las capas, sino de otros factores que se irán mostrando durante el desarrollo del capítulo.

### 6.5.1 Área del Cuenco de Deflexiones:

Parámetro desarrollado por Hoffman como parte de su Tesis de Maestría en el Instituto Tecnológico de Israel, e incorporada en el Método AASHTO en 1981 mientras trabajaba en su Doctorado en la Universidad de Illinois con el profesor M. Thompson. (SUÁREZ, 2009)

Para determinar el área se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{ÁREA} = 6 * \left[ 1 + 2x \frac{d_0}{d_0} + 2x \frac{d_{60}}{d_0} + \frac{d_{90}}{d_0} \right]^8$$

<sup>8</sup> Fórmula tomada de XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, Pág. 9.

Donde:

d0, d30, d60 y d90 = Deflexiones del FWD para r = 0, 30, 60, 90 cm.

Así y tomando los datos corregidos, se determina el área para cada cuenco de deflexiones del tramo en estudio, para este caso en particular once áreas en total.

Tabla 7 Estimación de áreas para cada cuenco.

ÁREA
in
28
25
27
25
29
29
29
27
30
27
30

Fuente: Propia

### 6.5.2 Longitud característica-Yonapave:

Determinado el valor de área, se procede a calcular la longitud característica, esta a su vez depende de otros coeficientes de ajuste, tanto la fórmula como la tabla de los coeficientes se presentan a continuación:

$$l_0 = A \times e^{B \times \text{ÁREA}^9}$$

Donde:

$l_0$  = longitud característica, en cm.

A, B = Coeficientes de ajuste de curvas.

Tabla 8 Tabla para coeficientes de ajuste

Rango de valores del ÁREA, Pulgadas	$h_0/l_0$	A	B
ÁREA $\geq$ 23	5	3.275	0.1039
21 $\geq$ ÁREA < 23	10	3.691	0.0948
19 $\geq$ ÁREA < 21	20	2.800	0.1044
ÁREA < 19	40	2.371	0.1096

Fuente: XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, Pág. 10

Las longitudes características del tramo son:

<sup>9</sup> Fórmula tomada de XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, Pág. 10.

Tabla 9 Resumen de Longitudes Características para cada Zona

Número de Zona	Lo (cm)
1	56,81
2	62,74
3	63,18

Fuente: Propia

## 6.5.3 Módulo Equivalente de la Subrasante:

Con base en la longitud característica, el módulo equivalente de la subrasante (Esg) puede determinarse en función de la presión del plato de carga, la deflexión central y un conjunto adicional de coeficientes de ajuste de curvas.<sup>10</sup>

(SUÁREZ, 2009)

La ecuación de modulo equivalente es:

$$E_{sg} = m \times \frac{p}{d_0} \times l_0^n$$

Esg = Módulo equivalente de la subrasante, en MPa.

p = Presión del plato de carga del FWD, en kPa.

d0 = Deflexión central, en  $\mu\text{m}$ .

l0 = Longitud característica, en cm.

m, n = Coeficientes de ajustes de curvas.

Los valores de m y n se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 10 Tabla para coeficientes de ajuste

$h_0/l_0$	M	n
5	926.9	-0.8595
10	1152.1	-0.8782
20	1277.6	-0.8867
40	1344.2	-0.8945

Fuente: XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, Pág. 10

Teniendo en cuenta la relación  $h_0/l_0$ , para áreas mayores a 23 de la tabla 9, se da una relación de 5, con este dato y sabiendo que todas las áreas de las zonas homogéneas son mayores a 23, los valores de m y n son 926,9 y -0,8595, aplicando la formula los diferentes módulos se resumen en el siguiente cuadro, aclarando que estos módulos tienen una corrección adicional por el tipo de material en la subrasante, en este caso se afecta por un factor 0,35 considerando que es un material fino:

Tabla 10 Módulos Equivalentes para Cada Zona

<sup>10</sup>Fórmula tomada de XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos, Pág. 10.

Número de Zona	Modulo Equivalente de la Subrasante (MPa)
1	212,02
2	141,85
3	182,47

Fuente: Propia

## 6.5.4 Cálculo de Numero Estructural Efectivo.

Después de calculados los parámetros anteriores, es posible el cálculo del número estructural con la siguiente expresión:

$$SN_{Efectivo} = 0,0182 \times l_0 \times \sqrt[3]{E_{sg}}$$

Tabla 12 Número Estructural Efectivo Para Cada Zona

Número de Zona	Número Estructural Efectivo
1	6,17
2	5,96
3	6,52

Fuente: Propia

## 6.6 Proyección de Transito.

Para el cálculo de este numeral, se toma como partida las tablas de conteo con las que cuenta INVIAS 2015, estación No. 5 que corresponde al tramo entre la entrada a Bogotá por el sector de La Caro, allí está el estimativo de Transito Promedio Diario Semanal (TPDS) y su composición, con este dato se va a realizar la proyección por ejes equivalente para el año 2027, considerando un periodo de diseño de 11 años teniendo en cuenta que estos conteos se publicaron en el año 2016.

De acuerdo a recomendaciones del “National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)” el factor de distribución para el carril de diseño (Fca) a considerar es de 0,45 si se tiene en cuenta una vía con cuatro carriles.

Tabla 11 Factor Carril de diseño

Número Total de carriles en cada dirección	Factor de distribución para el carril de diseño (Fca.)
1	1.00
2	0.90
3	0.60
4 o más	0.45

Fuente: ARA, 2004

El factor sentido de acuerdo a recomendaciones de Invias para rehabilitaciones es de 0,55. La tasa de crecimiento asumida es del 3% anual, luego con estos datos es posible calcular una tasa de crecimiento proyectada con la siguiente expresión:

$$Tasa\ de\ Crecimiento = \frac{(1 + tasa\ de\ crecimiento\ \%)^{(Periodo\ de\ Diseño-1)}}{tasa\ de\ crecimiento\ \%}$$

Tabla 12 Cálculo Tasa de Crecimiento

DATOS DE DISEÑO			
TRANSITO DIARIO	103679	TASA DE CRECIMIENTO %	3%
FACTOR SENTIDO	0,5	FACTOR CARRIL	0,45
PERIODO DE DISEÑO	11	TASA DE CRECIMIENTO PROYECTADA	12,81

Fuente: Propia.

Para estimar el transito equivalente proyectado, se debe contar con un TPDS, como ya se había mencionado este dato se toma de la publicación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), para ello entonces se toma un TPDS de 103.679 vehículos, de acuerdo a esto la distribución porcentual para cada tipo de vehículo es 83% de vehículos, 8% buses, 9% camiones, sin embargo, la distribución de los camiones no está tipificada. Para realizarlo se tomó como base los aforos hechos por (ECHEVARRIA, 2015)<sup>11</sup>, en ellos se corroboró que la distribución en porcentaje de camiones estuviera similar, efectivamente para el caso del informe la distribución estaba en 9,14%, por lo que se podía tomar los porcentajes de cada tipo de camión como un valor confiable, los resultados de distribución y la proyección de vehículos se presenta a continuación:

Tabla 13 Cálculo Transito Equivalente Diario

VEHICULOS	PORCENTAJE	# VEHICULOS DIARIOS	FACTOR DAÑO	TRANSITO EQUIVALENTE DIARIO
VEHICULOS	%			
AUTOS	83%	86.053,57	0,00	0,00
BUSES	8%	8.294,32	0,42	3.496,59
<b>CAMIONES</b>	<b>9%</b>	<b>9.331,11</b>		
C2P	43%	4.012,38	0,31	1.232,74
C2G	22%	2.054,34	2,89	5.946,91
C3	11%	1.001,45	5,31	5.318,00
C3S2	9%	825,97	8,37	6.910,25
C3S3	15%	1.434,10	6,29	9.024,17
	100%			31.928,67
<b>TRANSITO EQUIVALENTE TOTAL ACUMULADO</b>				<b>33.583.856,82</b>

Fuente: Propia.

<sup>11</sup> Valor tomado del mencionado informe pág.99



Finalmente, el tránsito estimado, para, evaluación por AASHTO-93, retro cálculos por evaluación Bisar y demás será de 33'583.856,82 millones de ejes equivalentes.

### 6.7 Evaluación por Método AASHTO - 93.

Con la proyección de tránsito y con los módulos obtenidos por el método YONAPAVE, es posible calcular los números estructurales requeridos para cada zona homogénea. Para la interfaz del programa AASHTO, se requiere ingresar datos de confiabilidad (valor que disminuye cuando se trata de una rehabilitación en la que se conoce el tránsito y el comportamiento de la estructura) desviación estándar, índices de servicio inicial (en función del IRI requerido) y final.

#### 5 Número Estructural Requerido Z-1

#### 6 Número Estructural Requerido Z-2

7 Número Estructural Requerido Z-3

6.8 Determinación Espesores de Refuerzo por Aportes de Capa Asfáltica. En la determinación de estos espesores se debe hacer una diferencia de números estructurales entre el obtenido por el método YONAPAVE (efectivo) y el que se obtuvo por modelo AASHTO-93 (requerido), con esta diferencia y considerando factores de entorno tales como clima, se asume un módulo de aporte para la mezcla de 0,42, es así como se obtienen los siguientes refuerzos en espesor de capa.

Tabla 14 Espesor de Refuerzo Z-1

SN efectivo	SN req.	Delta SN	Aporte	Refuerzo requerido (in)	Refuerzo requerido (cm)
6,17	3,77	N/A	0,42	NO REQUIERE	NO REQUIERE

Fuente: Propia

Tabla 15 Espesor de Refuerzo Z-2

SN efectivo	SN req.	Delta SN	Aporte	Refuerzo requerido (in)	Refuerzo requerido (cm)
5,96	6,68	0,72	0,42	1,73	4,38

Fuente: Propia

Tabla 16 Espesor de Refuerzo Z-3

SN efectivo	SN req.	Delta SN	Aporte	Refuerzo requerido (in)	Refuerzo requerido (cm)
6,52	6,17	N/A	0,42	NO REQUIERE	NO REQUIERE

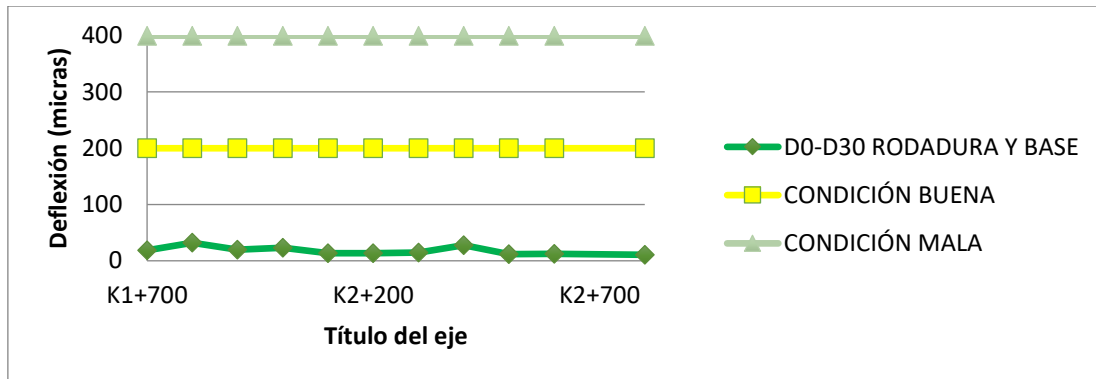
Fuente: Propia

6.9 Evaluación por Parámetros Horak. Otro de los recursos con los que se cuenta para la evaluación de estructuras de pavimentos a partir de la deflectometría, son los parámetros Horak, para ello se

presentan de forma gráfica cada uno de los tres parámetros, en cada uno de ellos aparecen las líneas fronteras para la evaluación cualitativa, estas líneas límites están basadas en el cuadro mencionado en el marco referencia del presente documento.

Esta primera evaluación, se realiza para la deflexión máxima es decir  $d_0$  y el sensor inmediatamente después  $d_{30}$ , con esta diferencia, se evalúan la capa de rodadura o carpeta y la capa base, los límites están entre 200 y 400 micras.

8 Condición de Estado Capa de Rodadura y Base

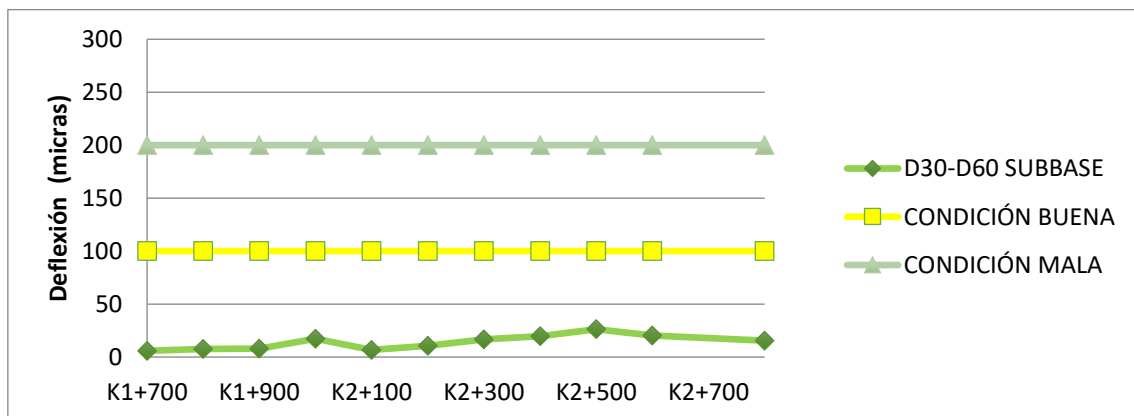


Fuente: Propia

De ante mano y sin entrar en mucho detalle se aprecia una condición muy buena en estas capas.

La siguiente gráfica mediante la diferencia de las deflexiones calculadas para  $d_{30} - d_{60}$ , son indicio para el estado de condición en la sub base. Los límites que delimitan la condición en términos de deflexión están entre 100 y 200 micras.

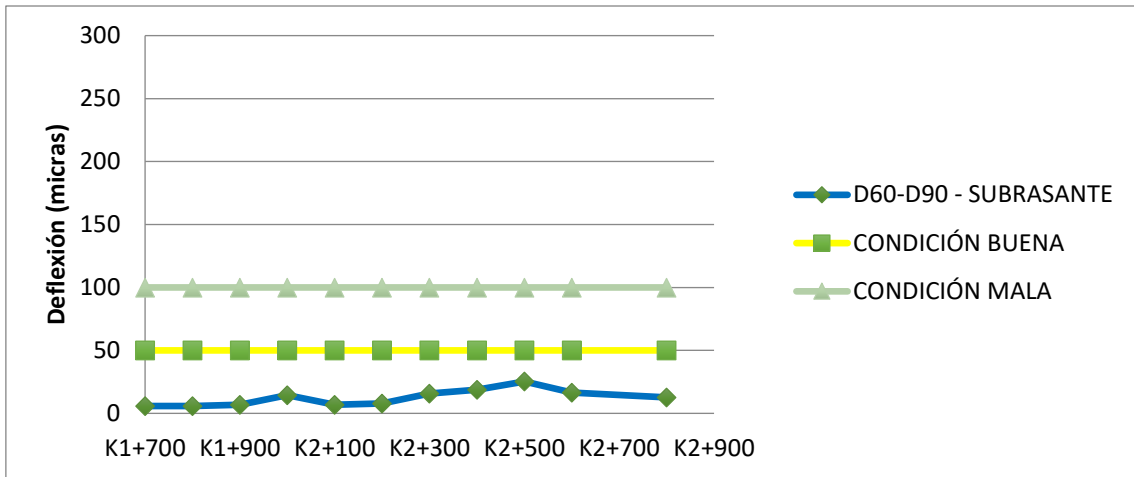
9 Condición de Estado Capa de Sub-base



Fuente: Propia

Por último, se presenta la gráfica que considera la condición de estado netas de la sub-rasante, con esta última quedan representadas las capas que componen la estructura del pavimento, desde la rodadura hasta la subrasante.

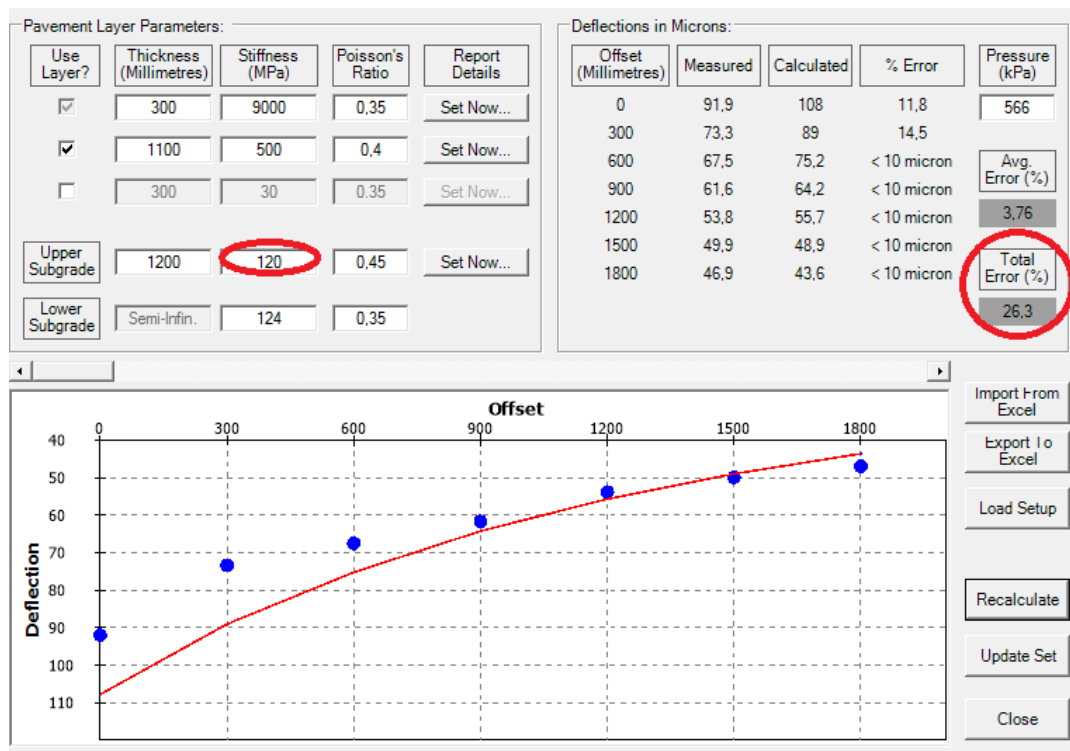
10 Condición de Estado Capa de Sub-rasante



### 6.10 Retro Cálculo de Módulos Modelo Rubicon.

Con este software se obtienen los módulos de las capas por retro cálculo, con los datos exportados de espesores y deformaciones, el software emite un cuenco de deflexión para cada punto, una de las formas de verificación es que el módulo de la subrasante sea coincidente con el que se obtuvo por otros métodos de retro cálculo, para este caso Yonapave, seguido a esto, las curvas deben ajustarse de tal forma que el error total sea igual o menor al 10%, esta corrección se debe aplicar a cada uno de los cuencos, cuando las correcciones se hayan hecho en su totalidad, se exportan los datos a Excel, para proceder con la siguiente verificación, para entender mejor lo antes mencionado se presenta un pantallazo de la interfaz del programa en la que se resaltan los parámetros a tener en cuenta:

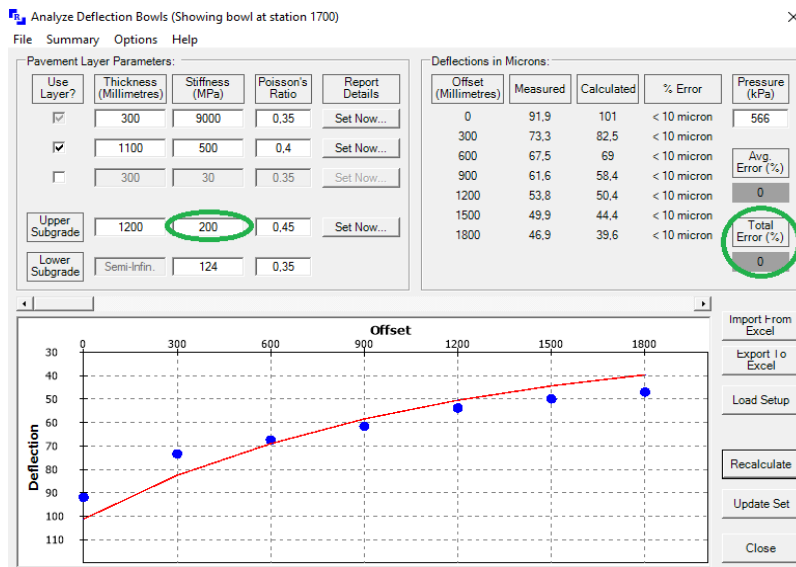
11 Cuenco Original



Fuente: Propia.

En este primer vistazo es claro que el error se encuentra por fuera del rango admisible, además el módulo de la sub-rasante se encuentra por debajo del calculado con el modelo Yonapave, con el objetivo de disminuir el error, el módulo se cambió a un valor similar al que se calculó es decir 200 MPa, los resultados se relacionan a continuación:

12 Cuenco con ajuste de error.



Fuente: Propia.

Es así como a cada una de las once deflexiones se les realizó la corrección, el resultado gráfico y la información exportada del programa con los módulos se relacionan en el anexo 3<sup>12</sup>.

6.11 Evaluación por Fatiga y Ahuellamiento modelo Bisar 3.

Teniendo en cuenta que el espesor de la carpeta asfáltica para el tramo es muy robusto, los módulos propios resultaron obviamente altos, arrojando resultados exageradamente grandes en cuanto al consumo por ahuellamiento y fatiga, los resultados se presentan a continuación<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Anexo 3. Resultados Programa Rubicon.

<sup>13</sup> Fragmento de tabla suministrada por personal de Itineris para el cálculo de la vida residual.

ITINERIS		Año	NEE	Espesores de Estructura (cm)			Módulos de Capas (Mpa)		
Desde	Hasta			CA	MG	Total	CA	MG	SR
K1+700	K1+800	2027	3,358E+07	30	110	140	9.000	500	200
K1+800	K1+900	2027	3,358E+07	30	110	140	7.880	500	120
K1+900	K2+000	2027	3,358E+07	30	110	140	10.000	500	108
K2+000	K2+100	2027	3,358E+07	30	110	140	4.690	400	120
K2+100	K2+200	2027	3,358E+07	50	75	125	6.810	500	120
K2+200	K2+300	2027	3,358E+07	50	75	125	5.750	500	180
K2+300	K2+400	2027	3,358E+07	50	75	125	4.160	200	180
K2+400	K2+500	2027	3,358E+07	50	75	125	3.090	255	150
K2+500	K2+600	2027	3,358E+07	50	75	125	2.660	179	140
K2+600	K2+700	2027	3,358E+07	50	75	125	3.630	350	180

Solicitaciones Admisibles				Consumos (%)			Verificación
Ejes Equivalentes Admisibles			Esfuerzo Admisible - Subrasante (MPa)	Fatiga por Tracción	Ahuella/to	Esfuerzo	
Factor por Deterioro y Edad	Fatiga por Tracción CA	Criterio Ahuella/to		CA			
0,9	1,72E+10	7,79E+11	0,223	0%	0%	2%	CUMPLE
0,9	1,35E+10	2,65E+11	0,134	0%	0%	3%	CUMPLE
0,9	1,92E+10	2,76E+11	0,101	0%	0%	3%	CUMPLE
0,9	4,43E+09	1,26E+11	0,134	1%	0%	3%	CUMPLE
0,9	4,92E+11	2,86E+11	0,134	0%	0%	2%	CUMPLE
0,9	4,21E+11	7,28E+11	0,201	0%	0%	2%	CUMPLE
0,9	7,95E+10	4,06E+11	0,201	0%	0%	3%	CUMPLE
0,9	6,05E+10	1,53E+11	0,168	0%	0%	3%	CUMPLE
0,9	2,93E+10	1,03E+11	0,156	0%	0%	4%	CUMPLE
0,9	6,24E+10	1,41E+11	0,145	0%	0%	3%	CUMPLE

Fuente: Hoja de Cálculo elaborada por la empresa Itineris, para el cálculo de vida residual.

Claramente los resultados son exorbitantes, a simple vista la estructura cumple en su totalidad con las solicitaciones necesarias.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- La primera característica que se distingue y no se puede dejar pasar por alto, son los resultados tan bajos de la deflectometría, probablemente una carga muy baja para el ensayo (promedio 41 kN).
- Los módulos equivalentes de la subrasante demuestran que pese a ser un material fino (materiales comunes en la sabana), presenta un excelente grado de consolidación, reflejado en los valores altos de modulo un promedio de 180 MPa cuando normalmente están dentro del rango de 70-100 MPa, en la subrasante parámetros que se obtuvieron por el método Yonapave.
- Los requerimientos para ejes equivalentes en una proyección de 10 años son bastante altos alrededor de treinta millones, a pesar de ello y como se analiza a continuación, no son un punto crítico para el desgaste en la estructura.
- Los números estructurales efectivos del tramo son también un claro ejemplo de la gran capacidad de soporte de la estructura, como se puede apreciar a excepción de la zona 2, los tramos no requieren de una intervención para repotenciar su capacidad estructural, por el contrario, sus valores propios están muy superiores a los requeridos para la cantidad de ejes con los que es y será transitada la vía.
- Como se dijo en la zona homogénea número 2, es la única parte en la que se debería evaluar la colocación de una sobre carpeta de tan solo cuatro cm, algo realmente mínimo.
- Con la gráfica de los parámetros Horak, se observa otro indicador para la excelente condición estructural de la vía, esto si tomamos en cuenta de que el comportamiento de todas y cada una de las condiciones están en el rango de excelente como resultado de la deflexión, es más ni siquiera están cerca de la línea que se tiene como parámetro de un buen valor.
- Con el apoyo del programa Rubicon, se pudo estimar que las mezclas evaluadas en el tramo, en su mayoría están en el rango de mezclas consideradas como de alto módulo de acuerdo a especificaciones Invias (6.000 a 10.000 MPa).

- La evaluación de fatiga y ahuellamiento, arrojo resultados, excesivamente altos, valores sobre todo en los ejes que nunca llegarán a coparse, de hecho, los ejes equivalentes requeridos son de 33 millones de ejes estos representan solo un 0,19% de la condición de capacidad para tracción total la cual es de 17 mil millones de ejes, esto por mencionar un solo tramo, más, sin embargo, el comportamiento es casi el mismo; como tal el consumo es del 0%.
- A consideración de una persona normal podría deducir a un excelente pavimento aun cuando la realidad no coincida con dichos resultados.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Lo primero que se debe entrar a considerar es la magnitud de carga, es decir replantear el ensayo aplicando una magnitud mayor a los 40 kN, es decir emplear un equipo de tipo HWD de carga pesada, el que se emplea para ensayo en aeropuertos en donde los espesores de carga son muy parecidos a los registrados en campo, así seguramente las deformaciones resultarán de mayor rango y por ende los análisis serán de mayor utilidad.
- Es claro además que apartándose de los resultados matemáticos, este es un tramo de vía en el que la sensación de conducción es poco a casi nada segura, en la que es común ver severas deformaciones (asociadas en su mayoría por el desecado de los arboles apostados en el separador de los carriles de la vía), por lo que debería evaluarse un valor de IRI, en donde seguramente los cálculos por km estarán igualmente supremamente elevados, de allí se podrían tomar otras consideraciones para la rehabilitación.
- Para tratamientos superficiales, se debe considerar la posibilidad de una auscultación visual, y estimar sectores críticos para bien sea reparachos u/o sello de fisuras.



- Con los cálculos de IRI, dependiendo del resultado, se puede pensar en la corrección del perfil longitudinal mediante labores de fresado disminuyendo el espesor de la carpeta siempre evaluando las solicitaciones de tránsito, para luego aplicar una sobre carpeta de re nivelación.
- Los resultados de altos módulos sin conocer a fondo el diseño de mezcla original de cada una de las intervenciones, son el resultado de una condición de numerosas intervenciones en las que la actividad principal es la colocación de sobre carpetas sin tener ningún otro factor en cuenta. El resultado de ello se evidenció en los apiques para la determinación de espesores, 30 – 50 cm.
- Activar un sistema de aislamiento entre las raíces de los árboles y la estructura de la vía, es decir que el agua necesaria para ambos factores tanto para el sostenimiento y vida del macizo como la de humedad del material granular sean independientes, esto se puede lograr mediante sistemas de drenaje que conduzcan el agua hacia las zonas verdes de forma más eficiente, sin entrar mucho al detalle mediante el uso de pavimentos drenantes en cunetas y filtros.
- Realizar fresado en todo el ancho de la calzada en un espesor de 20 cm esta actividad deberá ser controlada con topografía, permitiendo corregir el perfil longitudinal, luego sobre ella deberá instalarse una sobre carpeta con módulo de 3.000 Mpa, con la cual se garantice el cumplimiento de las solicitaciones por fatiga y ahuellamiento, en las condiciones actuales la carpeta en su forma estructural cumple, más sin embargo como ya se ha mencionado las condiciones para la conducción seguras no son las mejores.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

### Bibliografía

- AASHTO, 9. (1993). *GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURE*. Washington D.C.: AASHTO 93.
- Castro, M. B. (2009). *dspace.espo*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6124/10/capitulo%204.pdf>
- CERÓN, J. (30 de ABRIL de 2016). Los cuellos de botella que hacen de la autopista Norte una pesadilla. *EL TIEMPO*, pág. 1.
- CUEVA DEL INGENIERO CIVIL*. (5 de MAYO de 2010). Obtenido de [www.cuevadelcivil.com](http://www.cuevadelcivil.com)
- ECHEVARRIA, J. (2015). "*APP ACCESOS NORTE DE BOGOTA*" *GEOTECNIA PARA PAVIMENTOS*. BOGOTA: CANNO JIMENEZ Y COMPAÑIA.
- Economía, R. N. (9 de SEPTIEMBRE de 2016). El parque automotor colombiano supera los 12'600.000 unidades. *EL ESPECTADOR*, pág. 1.
- Higuera Sandoval, C. (2010). Caracterización de la resisitencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. *REVISTA FACULTAD DE INGENIERIA*, 74.
- Hogg, A. H. (1944). *Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of Finite Depth*. Reino Unido: Philosophical Magazine.
- HORAK, E. (1988). Aspects of Deflection Basin Parameters used in a Mechanistic Rehabilitation Design Procedure for Flexible Pavements in South Africa. University of Pretoria, PRETORIA, SOUTH AFRICA.
- M. Salgado Torres, y. o. (2002). *Posibles factores que inciden en el valor de las mediciones de deflexión de un pavimento*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Revista Dinero. (2017). Las Promesas Incumplidas del Gobierno a las Regiones. *Dinero*, 3.
- SUÁREZ, E. A. (2009). EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES A PARTIR DE. *XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos* (pág. 23). Bogotá: Universidad EAFIT.