



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Criterios de optimización del diseño de sobrecarpetas asfálticas para Bogotá, basados en ensayos no destructivos

ORLANDO ELÍAS GÓMEZ MALDONADO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2015

Criterios de optimización del diseño de sobrecarpetas asfálticas para Bogotá, basados en ensayos no destructivos

ORLANDO ELÍAS GÓMEZ MALDONADO

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA - GEOTECNIA

Directora:

Ph.D CAROL ANDREA MURILLO FEO

Línea de Investigación:

Modelación y análisis en geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2015

***A Rodrigo Rodas quien hizo que el esfuerzo
valiera la pena y quien me ha enseñado a
valorar mis habilidades y minimizar mis
defectos.***

Agradecimientos

A la ingeniera Carol Andrea Murillo Feo directora de la presente tesis de maestría por su apoyo en la realización de los ensayos de deflexión y por su acompañamiento en la formulación y expansión del alcance de este trabajo de investigación.

Resumen

Teniendo en cuenta que en la ciudad de Bogotá cerca del 56% de las vías locales se encuentran en una condición mala se hace necesario optimizar los recursos disponibles para rehabilitación y reconstrucción de segmentos viales. Los métodos no destructivos de evaluación estructural de pavimentos son una manera eficaz de priorizar recursos para la investigación subsolar y la realización de ensayos de laboratorios al proporcionar información de cada capa de la estructura. En esta investigación se realizaron mediciones del cuenco de deflexiones en tramos viales con diferentes condiciones estructurales utilizando el FWD (falling weight deflectometer). Además se recopiló la información de deflexión de tramos adicionales. Con el fin de evaluar las variables que afectan el comportamiento de los cuencos de deflexión se planteó un modelo bidimensional de elementos finitos el cual fue ajustado a las mediciones in situ. Con la modelaciones realizadas se plantearon correlaciones entre parámetros geométricos del cuenco y las características mecánicas de las capas de la estructura. Además se plantean límites de estos parámetros para vías locales. Utilizando el modelo propuesto se plantearon dos ecuaciones para la estimación del diseño de sobrecarpetas.

Palabras clave: deflectometría, elementos finitos, Falling Weight Deflectometer, sobrecarpetas flexibles.

Abstract

Bogotá is a city with about 56% of local roads in poor conditions and limited resources. Nondestructive methods for structural pavement evaluation are an effective way of prioritizing resources for soil exploration and laboratory tests as they provide information of each layer of the structure.

Deflection basin measurements were directly performed in road sections with different structural conditions using FWD (falling weight deflectometer). Further additional sections were compiled from third parties.

A two-dimensional finite element model is proposed based to evaluated the influence of the variables in the deflection basin. This model was adjusted with in situ measurements and different correlations between the geometric parameters of the deflection basin and the mechanical characteristics of the layers in the structure were calculated. As a result, limits for these parameters in new local pavements are proposed.

Finally, two equations for estimating design overlays were obtained.

Keywords: deflectometry, finite elements, Falling Weight Deflectometer, flexible overlays.

Contenido

| | Pág. |
|---|-----------|
| Resumen | V |
| Lista de figuras | IX |
| Lista de tablas | XI |
| Introducción | 1 |
| 1. Marco teórico | 4 |
| 1.1 Cuenco de Deflexión | 4 |
| 1.1.1 Generalidades | 4 |
| 1.1.2 Medición del cuenco de deflexión | 7 |
| 1.1.3 Caracterización del cuenco de deflexión | 9 |
| 1.1.4 Parámetro área..... | 11 |
| 1.1.5 Parámetro área bajo el perfil del pavimento (AUPP)..... | 12 |
| 1.1.6 Parámetros geométricos asociados a las características mecánicas de las capas de pavimento. | 14 |
| 1.2 Evaluación de características mecánicas utilizando parámetros del cuenco de deflexiones..... | 17 |
| 1.2.1 Evaluación del módulo resiliente de la subrasante utilizando retrocálculo. | 17 |
| 1.2.2 Valores reportados del módulo resiliente en la ciudad de Bogotá. | 23 |
| 1.2.3 Correlación entre el módulo resiliente y los parámetros geométricos del cuenco de deflexión. | 26 |
| 1.2.4 Uso de curvas típicas y parámetros normalizados en la evaluación del pavimento..... | 28 |
| 1.3 Efecto de las características estructurales en el cuenco de deflexión..... | 31 |
| 1.4 Métodos para el diseño de sobrecarpetas asfálticas en pavimentos flexibles..... | 35 |
| 1.4.1 Generalidades. | 35 |
| 1.4.2 Metodología de la AASHTO..... | 35 |
| 1.4.3 Metodología YONAPAVE..... | 37 |
| 2. Metodología..... | 39 |
| 2.1 Recopilación de información | 40 |
| 2.2 Trabajo de campo..... | 41 |
| 2.3 Características de las estructuras evaluadas | 46 |
| 2.4 Modelación numérica | 48 |
| 2.5 Análisis estadísticos | 54 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.5.1 | Gráficos de residuales..... | 55 |
| 2.5.2 | Coeficiente de determinación ajustado (R2 ajustado)..... | 55 |
| 2.5.3 | Valor F | 56 |
| 2.5.4 | Valor T | 56 |
| 3. | Análisis de resultados | 57 |
| 3.1 | Análisis de los cuencos de deflexión medidos. | 57 |
| 3.1.1 | Índice de curvatura en la superficie (SCI)..... | 58 |
| 3.1.2 | Índice de curvatura en la base (BDI)..... | 61 |
| 3.1.3 | Índice de curvatura en la base (BCI)..... | 62 |
| 3.2 | Modelación de elementos finitos para tramos buenos en condición buena (T-1 a T-7 y B-1 a B-2) | 64 |
| 3.2.1 | Ecuación de corrección. | 65 |
| 3.3 | Caracterización de la subrasante a través de mediciones de deflexión. | 74 |
| 3.4 | Caracterización de las capas granulares en términos del cuenco de deflexiones..... | 75 |
| 3.5 | Caracterización de las capas asfálticas en términos del cuenco de deflexiones..... | 77 |
| 3.6 | Modelación de estructuras regulares y malas (R-1 a R-3 y M-1 a M-4). | 78 |
| 3.7 | Diseño y validación de sobrecarpetas. | 80 |
| 3.8 | Criterios de evaluación estructural para estructuras de pavimentos nuevos en vías locales de la ciudad de Bogotá. | 85 |
| 4. | Conclusiones y recomendaciones | 91 |
| 4.1 | Conclusiones | 91 |
| 4.2 | Recomendaciones y aportes..... | 92 |
| | Bibliografía | 93 |
| | Anexos | 97 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1-1. Forma típica del cuenco de deflexión..... | 6 |
| Figura 1-2. Evaluación cualitativa del cuenco de deflexiones..... | 7 |
| Figura 1-3. Fuente de error común al utilizar la viga Benkelman..... | 8 |
| Figura 1-4. Pulsos típicos del FWD y su correspondiente cuenco de deflexiones..... | 9 |
| Figura 1-5. Representación gráfica del área bajo el perfil de pavimento..... | 12 |
| Figura 1-6. Correlación entre la deflexión máxima y la AUPP..... | 13 |
| Figura 1-7. Zonas del cuenco de deflexión..... | 15 |
| Figura 1-8. Distribución de esfuerzos supuesta en la estructura de pavimentos..... | 19 |
| Figura 1-9. Geometría del modelo de Hogg..... | 20 |
| Figura 1-10. Cuencos de deflexión sintéticos del modelo de Hogg..... | 21 |
| Figura 1-11. Zonificación geotécnica de Bogotá..... | 25 |
| Figura 1-12. CBR de diseño, de los estudios de urbanizadores..... | 25 |
| Figura 1-13. Correlación entre el BCI y el módulo resiliente de la subrasante..... | 26 |
| Figura 1-14. Definición del módulo punto de rotura. Tomado de Ceylan & Gopalakrishnan, (2006)..... | 27 |
| Figura 1-15. Correlación entre el BCI ajustado y el CBR..... | 28 |
| Figura 1-16. Curvas típicas para el cálculo de módulos con diferentes espesores de capa. Tomado de Mamlouk, (1985)..... | 29 |
| Figura 1-17. Estructura de 4 capas analizada..... | 31 |
| Figura 1-18. Influencia de la capa granular en el cuenco de deflexión..... | 32 |
| Figura 1-19. Influencia de la rigidez de la base asfáltica (izquierda) y de la subrasante(derecha) en el cuenco de deflexiones..... | 33 |
| Figura 1-20. Influencia de la relación de Poisson de la base asfáltica (derecha) y de la subrasante (izquierda) en el cuenco de deflexiones..... | 33 |
| Figura 1-21. Relación entre la rigidez de la capa de rodadura y las pendientes del cuenco de deflexiones..... | 34 |
| Figura 2-1. Equipo FWD marca JILS..... | 41 |
| Figura 2-2. Geófonos del equipo FWD..... | 42 |
| Figura 2-3. Niveles de daño para la clasificación de los tramos evaluados..... | 43 |
| Figura 2-4. Corrección por temperatura..... | 45 |
| Figura 2-5. Variaciones entre las deflexiones predichas por los diferentes modelos y las medidas in situ..... | 50 |
| Figura 2-6. Variación en la deflexión causada por el uso de modelos constitutivos no lineales..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 2-7. Influencia del tipo de modelación en la capacidad de predicción de las deflexiones..... | 51 |
| Figura 2-8. Influencia del tipo de modelación en la capacidad de predicción de las deflexiones..... | 52 |
| Figura 2-9. Malla de elementos finitos típica..... | 53 |
| Figura 2-10. Zona de aplicación de la carga..... | 54 |
| Figura 2-11. Gráfica típica de residuos para un modelo lineal múltiple. | 55 |
| Figura 3-1. Mediciones in situ sin corregir del cuenco de deflexiones..... | 57 |
| Figura 3-2. Valores de SCI medidos para pavimentos nuevos y en buen estado. | 58 |
| Figura 3-3. Valores de SCI medidos para pavimentos nuevos en vías arteriales vs rangos propuestos por Horak (2008)..... | 59 |
| Figura 3-4. Valores de SCI medidos para pavimentos nuevos en vías locales vs rangos propuestos por Horak (2008)..... | 59 |
| Figura 3-5. Reparaciones realizadas en el tramo B2 desde la toma de mediciones..... | 60 |
| Figura 3-6. Sellado de juntas alrededor de las reparaciones del tramo B2. | 60 |
| Figura 3-7. Valores de BDI para pavimentos nuevos en vías arteriales. | 61 |
| Figura 3-8. Valores de BDI para pavimentos nuevos en vías locales..... | 61 |
| Figura 3-9. Valores de BCI para tramos B-1 y B-2. | 62 |
| Figura 3-10. Hundimientos asociados a succión. | 63 |
| Figura 3-11. Fisuras debido a los hundimientos..... | 63 |
| Figura 3-12. Influencia del tipo de carga en la deflexión de la estructura T-1. | 65 |
| Figura 3-13. Residuales de la corrección propuesta. | 67 |
| Figura 3-14. Corrección de las deflexiones T-5. | 68 |
| Figura 3-15. Corrección de las deflexiones T-6. | 68 |
| Figura 3-16. Corrección de las deflexiones T-1. | 69 |
| Figura 3-17. Corrección de las deflexiones T-2. | 69 |
| Figura 3-18. Corrección de las deflexiones T-3. | 70 |
| Figura 3-19. Corrección de las deflexiones T-4. | 71 |
| Figura 3-20. Corrección de las deflexiones B-1..... | 71 |
| Figura 3-21. Corrección de las deflexiones B-2..... | 72 |
| Figura 3-22. Corrección de las deflexiones T-7. | 73 |
| Figura 3-23. Corrección de las deflexiones T-7(capas separadas)..... | 73 |
| Figura 3-24. Correlación entre el BCI y el módulo de la subrasante..... | 75 |
| Figura 3-25. Efecto del módulo de las capas granulares en el cuenco de deflexiones.... | 76 |
| Figura 3-26. Cuenco de deflexiones tramo M-4..... | 79 |
| Figura 3-27. Cuenco de deflexiones tramo R-1 con sobrecarpetas..... | 82 |
| Figura 3-28. Cuenco de deflexiones tramo M-2 con sobrecarpetas. | 83 |
| Figura 3-29. Estructuras flexibles tradicionales modeladas (espesores en cm)..... | 86 |
| Figura 3-30. Variación del cuenco de deflexiones para vías locales. | 87 |
| Figura 3-31. Estructuras flexibles adicionales modeladas..... | 88 |
| Figura 3-32. Variación del BDI. | 89 |
| Figura 3-33. Variación del SCI. | 90 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1-1. Criterios de deflexión máxima para la evaluación estructural de pavimentos... 5 | 5 |
| Tabla 1-2. Parámetros del cuenco de deflexión. 10 | 10 |
| Tabla 1-3. Variación del parámetro área para 3 grupos de pavimentos flexibles. Tomado de Hoffman & Thompson, (1981) 12 | 12 |
| Tabla 1-4. Correlaciones entre el AUPP y la deformación de la carpeta asfáltica. 14 | 14 |
| Tabla 1-5. Valores utilizados para la evaluación comparativa de pavimentos con base granular. 15 | 15 |
| Tabla 1-6. Valores utilizados para la evaluación comparativa de pavimentos con base de materiales bituminosos. 16 | 16 |
| Tabla 1-7. Evaluación de la respuesta de la subrasante..... 20 | 20 |
| Tabla 1-8. Parámetros de ajuste para el cálculo de la longitud característica..... 22 | 22 |
| Tabla 1-9. Parámetros de ajuste para el cálculo del módulo de la subrasante. 22 | 22 |
| Tabla 1-10. Zonificación geotécnica a partir del CBR en la ciudad de Bogotá. 24 | 24 |
| Tabla 2-1. Ubicación de los geófonos en el equipo utilizado..... 41 | 41 |
| Tabla 2-2. Tramos evaluados utilizando deflectometría. 43 | 43 |
| Tabla 2-3. Tramos evaluados en la investigación..... 46 | 46 |
| Tabla 3-1. coeficientes de determinación para la corrección planteada. 66 | 66 |
| Tabla 3-2. Prueba F para la corrección..... 66 | 66 |
| Tabla 3-3. Prueba T para la corrección..... 67 | 67 |
| Tabla 3-4. Prueba T para la correlación entre los parámetros del cuenco y el módulo ponderado de las capas granulares. 77 | 77 |
| Tabla 3-5. Prueba T para la correlación entre los parámetros del cuenco y el módulo ponderado de las capas asfálticas. 77 | 77 |
| Tabla 3-6. Características mecánicas y geométricas tramos regulares y malos. 80 | 80 |
| Tabla 3-7. Diseños de sobrecarpetas, para 10 años en vías locales..... 81 | 81 |
| Tabla 3-8. parámetros del cuenco de deflexión tramo R-1..... 82 | 82 |
| Tabla 3-9. características mínimas de las capas para las estructuras modeladas,..... 85 | 85 |
| Tabla 3-10. Límites para el BCI para pavimentos nuevos en vías locales de Bogotá. 89 | 89 |

Introducción

En Colombia el 90% de la carga que se transporta, lo hace por el modo carretero, teniendo en cuenta la importancia económica de las vías actualmente la mayor parte de las intervenciones en las vías de Colombia consisten en rehabilitaciones y mantenimientos, particularmente en las zonas urbanas. En Bogotá el 56 % de las vías locales están en mal estado y teniendo en cuenta que los recursos son limitados cada inversión que se realice debe estar acompañada de un riguroso proceso de control tanto en el diseño como en la construcción de cualquier proyecto vial, para garantizar que los recursos sean adecuadamente invertidos. Las estrategias de gestión vial recomiendan la construcción de sobre-carpetas en el pavimento existente, con el fin de optimizar costos y alargar la vida útil de la estructura de pavimento, pero en la práctica tradicional se utilizan diversos métodos empíricos de diseño con información de entrada poco confiable, que en algunos casos lleva al sobre o sub dimensionamiento de carpetas, causando sobrecostos y problemas de tráfico innecesarios, por lo anterior es necesaria una adecuada caracterización de la condición estructural de las vías a intervenir.

En el país se han venido utilizando métodos de evaluación de la condición estructural basados en auscultación visual y en mediciones de deflexión a partir de la viga Benkelman, que es un método de carga estática, el cual esta desaconsejado por el AASHTO desde hace varios años. Es importante resaltar que estas mediciones tienen serias limitaciones, como la dificultad para reproducir los resultados, el bajo rendimiento en la recolección de la información, sus limitaciones para simular adecuadamente el paso del tráfico y determinar la extensión y forma del cuenco de deflexiones. Teniendo en cuenta estas limitaciones, en el país se han introducido equipos que han sido utilizados en el mundo, como el FWD (Falling Weight Deflectometer). El FWD simula mejor las cargas del tráfico, ya que representa el efecto producido por las cargas dinámicas de los vehículos pesados para diferentes niveles de frecuencia y/o velocidad. A la par de la llegada de estos equipos, en la Universidad Nacional se han realizado investigaciones para validar su utilización y

lograr correlaciones entre resultados de laboratorio y los del FWD, así como relaciones entre la viga Benkelman y el FWD.

Esta investigación tiene como objetivo la caracterización de los cuencos de deflexión típicos de la ciudad para estructuras con diferente nivel de servicio, con esta caracterización se proponen valores límites de los parámetros geométricos del cuenco que permiten la evaluación de la condición de las estructuras.

En la realización de esta investigación se realizaron mediciones con el FWD en 10 tramos clasificados en diferentes niveles de servicio con una longitud total de aproximadamente 2400 m. Para realizar la clasificación se realizó una inspección visual y se consideró el porcentaje de área superficial con daños. En total se realizaron 150 mediciones utilizando el equipo FWD. Además se consideraron otras mediciones realizadas en la ciudad de Bogotá. Con el fin de evaluar diferentes escenarios y de validar los métodos de diseño de sobrecarpetas utilizados en la ciudad se planteó un modelo de elementos finitos. Este fue desarrollado en el software ABAQUS Student Edition 6.12. La modelación se realizó como un sistema 2D, elástico, isotrópico y axisimétrico. La carga dinámica aplicada se simuló como una presión distribuida en una placa de 15 cm de radio.

Este modelo fue ajustado a partir de las mediciones en campo, la información de los ensayos de laboratorio y el análisis estadístico de la influencia de cada variable. Se modelaron diferentes escenarios que permitieron plantear correlaciones entre características mecánicas de las capas de pavimento y los parámetros geométricos del cuenco de deflexiones. Se proponen límites para los parámetros del cuenco de deflexiones para estructuras de pavimento. Además se presentan dos ecuaciones de pre-dimensionamiento de sobrecarpetas asfálticas a partir de mediciones no destructivas.

Hipótesis

- Los diseños de sobrecarpetas para la ciudad de Bogotá pueden ser optimizados a partir de la simulación de cuencos de deflexión utilizando un modelo de elementos finitos validado con mediciones no destructivas con el FWD.

Objetivo General

- Caracterizar los cuencos típicos de deflexión para estructuras de pavimento flexible en diferentes estados estructurales, que permitan proponer un conjunto de diseños óptimos de espesores de sobrecarpeta.

Objetivos Específicos

- Caracterizar y analizar los cuencos de deflexión típicos para diferentes condiciones de serviciabilidad de pavimentos flexibles.
- Determinar funciones de ajuste que permitan clasificar los cuencos de deflexión medidos en los rangos determinados.
- Implementar diferentes métodos de diseño de sobrecarpetas y modelar las estructuras producto de los mismos utilizando un programa de elementos finitos.

1. Marco teórico

La caracterización de las condiciones estructurales de los pavimentos existentes, hace parte de los métodos de diseño para las estrategias de rehabilitación y mantenimiento de cualquier red vial. En redes viales extensas como las de una ciudad los costos y afectaciones al tráfico restringen la posibilidad de realizar muestreos para ensayos de laboratorio.

Por lo anterior se han desarrollado diversos métodos no destructivos para la determinación de las dos variables más importantes: espesores y módulos de las capas de la estructura existente. La caracterización de los módulos se realiza a partir de la deformación en la superficie del pavimento debido a la aplicación de una carga. Los métodos para el análisis y la medición de esta respuesta son descritos a continuación.

1.1 Cuenco de Deflexión

1.1.1 Generalidades

La evaluación estructural de pavimentos tiene como objetivo determinar la capacidad portante del sistema, conformado por la estructura de pavimento y la subrasante, en un momento determinado. Esta evaluación debe realizarse cuando se prevén cambios en las cargas o usos de un segmento vial o para determinar la necesidad de intervención (rehabilitación o mantenimiento).

Según Hoffman y Thompson (1981) la evaluación estructural es un problema complejo debido a la multiplicidad de materiales que conforman el pavimento y a la variación de las propiedades de estos durante el día en términos de temperatura y carga.

Desde mediados del siglo pasado la deflexión superficial se ha venido utilizando como un indicador del comportamiento estructural de los pavimentos.

La deflexión superficial se define como la deformación vertical del pavimento debido a la aplicación de una carga que puede ser estática o dinámica, medida a nivel de superficie. Además representa una respuesta mecánica del sistema pavimento-subrasante como un todo. Esta respuesta a la aplicación de una carga se puede medir de manera rápida y fácil con la ventaja adicional de ser no destructiva para la estructura evaluada.

La recomendación de la Armada de los Estados Unidos en 1953 de limitar la deflexión en superficie a 6,35 mm la primera de su tipo. Esta recomendación se obtuvo aplicando la teoría bicapa de Burmister. (Schwartz & Carvalho, 2007). Posteriormente la Western Association of State Highway Officials en 1955 (Hoffman & Thompson, 1981) y como resultado de su ensayo de pavimentos sugirió la limitación de la deflexión a 1 mm. A partir de estos desarrollos se produjeron diversas recomendaciones sobre este parámetro. Las más importantes se presentan en la Tabla 1-1 .

Tabla 1-1. Criterios de deflexión máxima para la evaluación estructural de pavimentos.

| Referencia | Rangos de Deflexión | Criterios |
|---------------------|---|--|
| WAASHO | $d_{max}=45$ mils (1) $d_{max}=35$ mils (2) | (1) Primavera (2) Otoño Deflexiones medidas ante un eje de 18 Kip |
| Hveem | $d_{all} \leq 50$ mils (1) $d_{all} \leq 17$ mils (2) | (1) Tratamiento superficial (2) Concreto asfáltico de 4 pulgadas de espesor d_{all} = máxima deflexión permitida |
| Carneiro | $20 \text{ mils} \leq d_{max} \leq 35 \text{ mils}$ | Deflexiones medidas con viga benkelman para un eje de 18 kip y una presión de inflado de 80 psi |
| Whiffin et al | $20 \text{ mils} \leq d_{max} \leq 30 \text{ mils}$ (1) $5 \text{ mils} \leq d_{max} \leq 15 \text{ mils}$ (2) | (1) Concreto asfáltico sobre base granular (2) Concreto asfáltico sobre base estabilizada con cemento. |
| State of California | $d_{all} = f(TAC, N)$ $d_{all} = 46$ mils, TAC=6 in, N=10000 $d_{all} = 22$ mils, TAC=6 in, N=1000000 | TAC= espesor del concreto asfáltico N=número de repeticiones de ejes de 5 kip |
| Asphalt Institute | $d_{all} = 22$ mils(1) $d_{all} = 100$ mils, (2) | (1) DTN=1000 (2) DTN=2 DTN=tráfico promedio diario de ejes de 18 kip |

Nota. Fuente Hoffman & Thompson, (1981) , mils= 0,001 in.

Aunque la deflexión máxima hace parte importante de la caracterización del sistema pavimento-subrasante, investigaciones como las de Whitcomb (1982), Stubstad et al (1983) y la Universidad de Dundee encontraron que la deflexión máxima por sí sola no es suficiente para determinar la condición estructural de un pavimento ni para retrocalcular los módulos de las capas que los componen, (Horak, 1987).

Teniendo en cuenta lo anterior, se han desarrollado métodos no destructivos para evaluar no solo la deflexión máxima sino deflexiones a cierta distancia del punto de aplicación de la carga. A este conjunto de deflexiones medidas se les conoce como cuenco de deflexiones. En la Figura 1-1 se presenta la forma típica del cuenco de deflexiones.

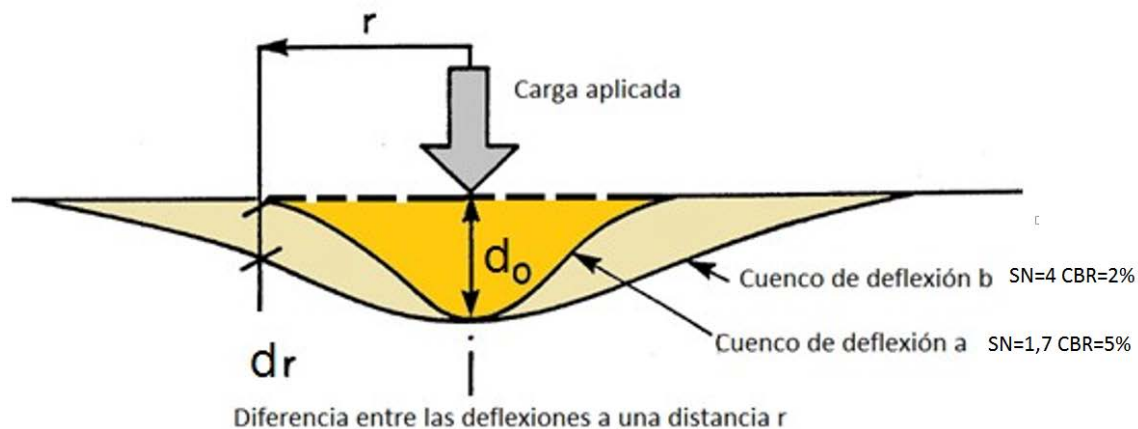


Figura 1-1. Forma típica del cuenco de deflexión.

Tomado de Horak, (1987)

En la Figura 1-1 también se observa como dos cuencos de deflexiones pueden tener la misma deflexión máxima y representar una condición estructural opuesta. La medición del cuenco de deflexiones permite determinar características como la rigidez de las capas que componen el pavimento así como las características de la subrasante. Estas características se reflejan en el cuenco de deflexiones a través de los parámetros geométricos del mismo. En la Figura 1-2 se presenta una evaluación cualitativa de diferentes cuencos de deflexión. Particularmente se tipifican los cuencos para diferentes relaciones de rigideces entre el pavimento y la subrasante.

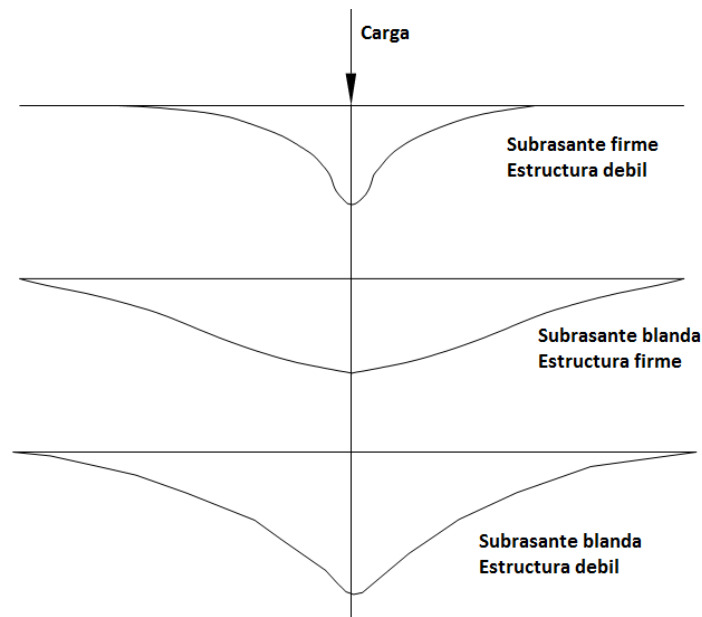


Figura 1-2. Evaluación cualitativa del cuenco de deflexiones.

Tomado de Jung, (1989)

1.1.2 Medición del cuenco de deflexión

Los métodos no destructivos de evaluación estructural han sido desarrollados buscando aumentar la velocidad de medición, mejorar la precisión, simular de manera realista las cargas del tráfico y reducir los costos de las mediciones. Se debe resaltar que las medidas de deflexión y la forma del cuenco dependen del equipo utilizado. Lo anterior se debe a que la respuesta de las estructuras ante la magnitud, tipo y tasa de aplicación de la carga es no lineal. Según Hoffman y Thompson (1981) la anterior característica dificulta la generación de correlaciones significativas entre las técnicas de medición para diferentes estructuras. Meier (1995) propone la clasificación de los métodos de medición, de acuerdo a las características de carga a las que someten el pavimento. Los métodos se pueden agrupar en tres categorías como se muestra a continuación:

- Carga estática

Estos métodos miden la respuesta del sistema estructura de pavimento-subrasante (cuenco de deflexiones) ante una carga vertical esencialmente estática. Los equipos típicos de esta categoría son la viga Benkelman y el deflectógrafo de Lacroix. Aunque estos equipos son relativamente económicos y fáciles de utilizar, tienen como principales desventajas la incapacidad de proporcionar un punto de referencia estable en pavimentos en donde el cuenco de deflexiones exceda los 8 pies de largo (Figura 1-3), la dificultad de

extrapolar los resultados para que reflejen la influencia de las cargas dinámicas del tráfico y proporcionan información incompleta ya que generalmente solo se obtiene la deflexión máxima.

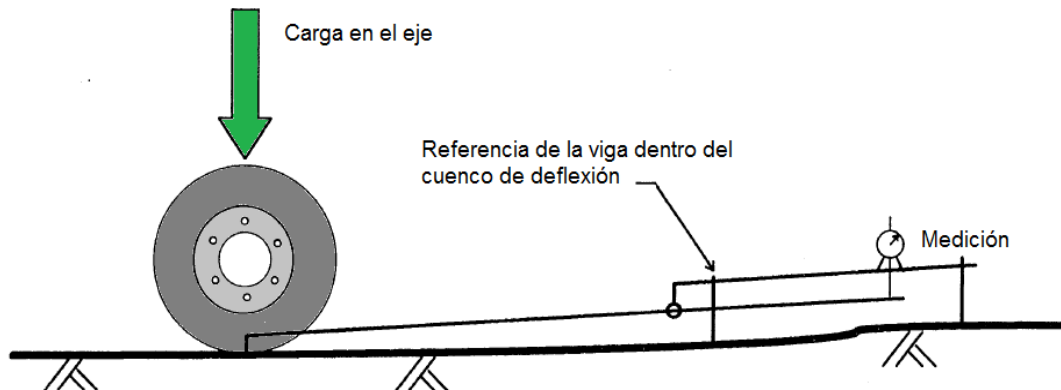


Figura 1-3. Fuente de error común al utilizar la viga Benkelman.

Tomado de Meier, (1995)

- Carga dinámica de estado estacionario.

Estos métodos buscan simular las cargas impuestas por los vehículos utilizando una carga sinusoidal que empieza y termina en cero, alcanzando un pico equivalente al impuesto por el tráfico. El periodo de tiempo debe ser similar al tiempo de contacto de la rueda del vehículo con el pavimento.

Los sistemas que utilizan este tipo de carga son el Dynaflect, el Road Rater y el Wes 16-kip vibrator. Los anteriores equipos tienen como principales inconvenientes la dificultad para reflejar la dinámica de las cargas impuestas por el tráfico particularmente en términos de cargas máximas y frecuencia evaluadas.

- Carga dinámica transitoria.

Este tipo de equipos aplican una carga de impulso al pavimento y registran la historia de deflexión en diferentes puntos. La carga de impulso se consigue utilizando un peso en caída libre. El Falling Weight Deflectometer (FWD) es el equipo de medición más utilizado actualmente, porque la carga que le impone al pavimento es similar a la inducida por el tráfico. El FWD consta de un peso montado en un eje vertical, que se encuentra dentro de un tráiler que puede ser remolcado por camionetas convencionales.

El peso es elevado por un mecanismo hidráulico a una altura que varía entre 5 y 50 cm. El peso se deja caer sobre un plato de carga de 30 cm de diámetro. La carga que se induce en el pavimento tiene como características una duración del orden de los 30 ms y magnitudes pico de entre 9000 y 90000 N (Roesset, 1998).

Otra de las características principales del FWD es que la deformación es medida a diferentes distancias del punto de aplicación de la carga. Se utilizan transductores de velocidad ubicados entre los 30 y 180 cm de distancia al punto de aplicación de la carga. El número de sensores varía de acuerdo a cada equipo. Debido a esta característica del equipo se han definido propiedades geométricas conocidas como parámetros del cuenco de deflexión.

1.1.3 Caracterización del cuenco de deflexión

Por las limitaciones que presenta la deflexión máxima, como indicador para la caracterización del estado de una estructura de pavimento, se han desarrollado otros parámetros que permiten describir el estado de esfuerzos en las diferentes capas, relaciones de rigidez y calificar el estado de un pavimento.

En la Figura 1-4 se puede observar que existe un retraso en los picos de deflexión en los diferentes puntos de medición. Lo anterior implica que el cuenco de deflexiones es más una herramienta para la presentación de los datos que una entidad física (Meier, 1995).

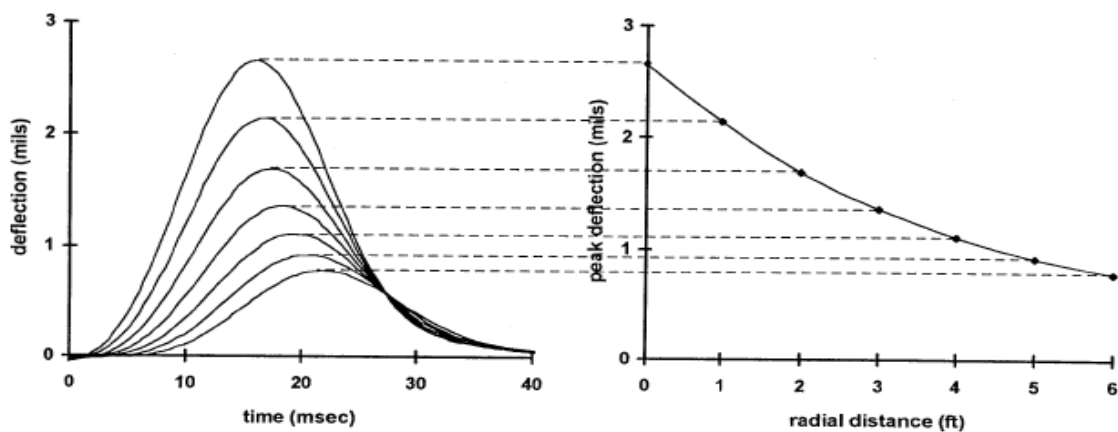


Figura 1-4. Pulsos típicos del FWD y su correspondiente cuenco de deflexiones

Tomado de Meier, (1995)

En este capítulo se describirán los parámetros más relevantes para los pavimentos flexibles con capas granulares y la correlación de estos con diferentes propiedades de las capas que conforman la estructura de pavimento. En la Tabla 1-2 se presenta una recopilación de los parámetros disponibles para evaluar el cuenco de deflexiones.

Tabla 1-2. Parámetros del cuenco de deflexión.

Tomado de Kim, (2000)

| Parámetro de deflexión | Formula | Equipo de medición | Referencia |
|--|---|--------------------------------|-----------------|
| Deflexiones (dr) | dr: deflexión medida a una distancia de la carga. | FWD | Hoffman 1981 |
| Área | $\text{ÁREA} = 6(d_0 + 2d_{12} + 2d_{24} + d_{36})/d_0$ | FWD | |
| Áreas adicionales | $\text{ÁREA}_2 = 6(d_{12} + 2d_{18} + d_{24})/d_0$ $\text{ÁREA}_3 = 6(d_{24} + 2d_{36} + d_{48})/d_0$ | FWD | |
| Índices de área (AI) | $AI_1 = d_0 + d_{12}/\square d_0$ $AI_2 = d_{12} + d_{24}/2d_0$ $AI_3 = d_{24} + d_{36}/2d_0$ $AI_4 = d_{36} + d_{48}/d_0$ | FWD | |
| Área bajo el perfil del pavimento (AUPP) | $\text{AUPP} = \frac{5 \cdot d_0 - 2d_{12} - 2d_{24} - d_{36}}{2}$ | FWD | Hill & Thompson |
| Índice de curvatura en la base (BCI) | $\text{BCI} = d_{24} - d_{36}$ ó $\text{BCI} = d_{36} - d_{48}$ | Dynaflect FWD | Kilareski 1982 |
| Índice de daño en la base (BDI) | $\text{BDI} = d_{12} - d_{24}$ | RR & FWD | Kilareski 1982 |
| Índice de flexión (BI) | $\text{BI} = d_0/a$ | Viga Benkelman | Hveem 1954 |
| Índice de extensibilidad de la carga (LSI) | $\text{LSI} = (d_{48} / d_{24}) \times F$ | FWD | Wimsatt 1995 |
| Deflexión máxima (d ₀) | d_0 | Viga Benkelman Dynaflect | Shrivner 1968 |
| Radio de curvatura (R) | $R = r^2 / (2 d_0 (d_0 / d_r - 1))$ | Viga Benkelman | Dehlen 1962 |
| Radio de influencia (RI) | $\text{RI} = x/d_0$ | Viga Benkelman | Ford 1962 |
| Factores de forma (F) | $F_1 = (d_0 - d_{24}) / d_{12}$ $F_2 = (d_{12} - d_{36}) / d_{24}$ $F_3 = (d_{24} - d_{48}) / d_{36}$ | FWD | Hoffman 1981 |
| Pendiente de deflexión (SD) | $\text{SD} = \tan^{-1}[(d_0 - d_r) / r]$ | Viga Benkelman | Kung 1967 |
| Extensibilidad (S) | $S = 25 (d_0 + d_{12} + d_{24} + d_{36}) / d_0$ | Dynaflect Road Rater FWD | Vaswani 1971 |

| | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------|---------------|
| Índice de curvatura de la superficie (SCI) | SCI=d ₀ -d ₁₂ | Road Rater Dynaflect FWD | Shrivner 1968 |
|--|-------------------------------------|--------------------------|---------------|

1.1.4 Parámetro área

El área del cuenco de deflexión representa un área normalizada de una sección del cuenco de deflexión que empieza en el centro de carga y va hasta una distancia de 36 in o aproximadamente 900 mm, este parámetro se puede calcular dependiendo del sistema de unidades como se presenta a continuación (Talvik & Aavik, 2009):

$$\text{ÁREA}(in) = \frac{6 * (d_0 + 2 * d_{12} + 2 * d_{24} + d_{36})}{d_0}$$

$$\text{ÁREA}(mm) = \frac{150 * (d_0 + 2 * d_{300} + 2 * d_{600} + d_{900})}{d_0}$$

Dónde:

d₀, d₁₂, d₂₄, d₃₆ son las deflexiones medidas a 0, 12, 24,36 in del punto de aplicación de la carga

d₀, d₃₀₀, d₆₀₀, d₉₀₀ son las deflexiones medidas a 0, 300,600, 900 mm del centro de aplicación de la carga.

El parámetro área varía entre un mínimo 11,1 pulgadas (28 mm) y un máximo de 36 pulgadas (900 mm). El mínimo se determinó utilizando la formulación de Boussinesq de un semi-espacio elástico. El máximo valor de área se presenta cuando las 4 deflexiones medidas son iguales. (Hoffman & Thompson, 1981).

Debido a que el área representa el conjunto de deflexiones del pavimento, es un parámetro adecuado para realizar una descripción general del mismo. Después de generar una base de datos con 144 secciones transversales de pavimentos y utilizando el software ILLI-PAVE para los análisis, basados en los trabajos de Figueroa, (1979), Hoffman & Thompson (1981) encontraron que para pavimentos flexibles convencionales:

- El parámetro área es relativamente insensible a la magnitud de la carga.
- La variación del parámetro área para tres grupos de espesores se presenta en la Tabla 1-3
- El parámetro área aumenta con la rigidez del pavimento como se observa en el punto anterior.

- Los materiales granulares de base típicos tienen un efecto menor en las deflexiones de estructuras de pavimento convencional.
- La extensibilidad y el área son parámetros que representan características similares del pavimento.

Tabla 1-3. Variación del parámetro área para 3 grupos de pavimentos flexibles.
Tomado de Hoffman & Thompson, (1981)

| Valor del parámetro área (in) | $1 < T_{ac} < 3$ $4 < T_{gr} < 12$ | $3 < T_{ac} < 5$ $4 < T_{gr} < 24$ | $3 < T_{ac} < 8$ $6 < T_{gr} < 18$ |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Máximo | 22,27 | 26,72 | 29,64 |
| mínimo | 11,65 | 12,87 | 13,29 |

Nota. Los valores presentados en la tabla están en pulgadas, T_{ac} es el espesor del concreto asfáltico, T_{gr} es el espesor de las capas granulares. Los valores de módulo resiliente del concreto asfáltico variaron entre 100 y 1400 ksi.

1.1.5 Parámetro área bajo el perfil del pavimento (AUPP).

El área bajo el perfil del pavimento (AUPP) es uno de los parámetros geométricos que mejor permite caracterizar su condición estructural. Se ha demostrado que utilizando este parámetro se puede calcular las deformaciones en el concreto asfáltico. (Garg & Thompson, 1998). En la Figura 1-5 una representación gráfica de la AUPP:

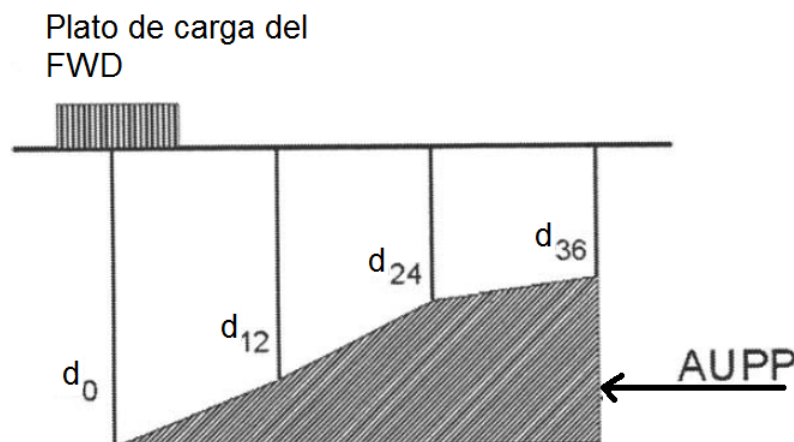


Figura 1-5. Representación gráfica del área bajo el perfil de pavimento.

Tomado de Shahin, (2005)

De diferentes análisis realizados con los datos del MN/ROAD (Minnesota Road Test) se encontró que el AUPP depende principalmente de la deflexión máxima como se observa en la Figura 1-6.

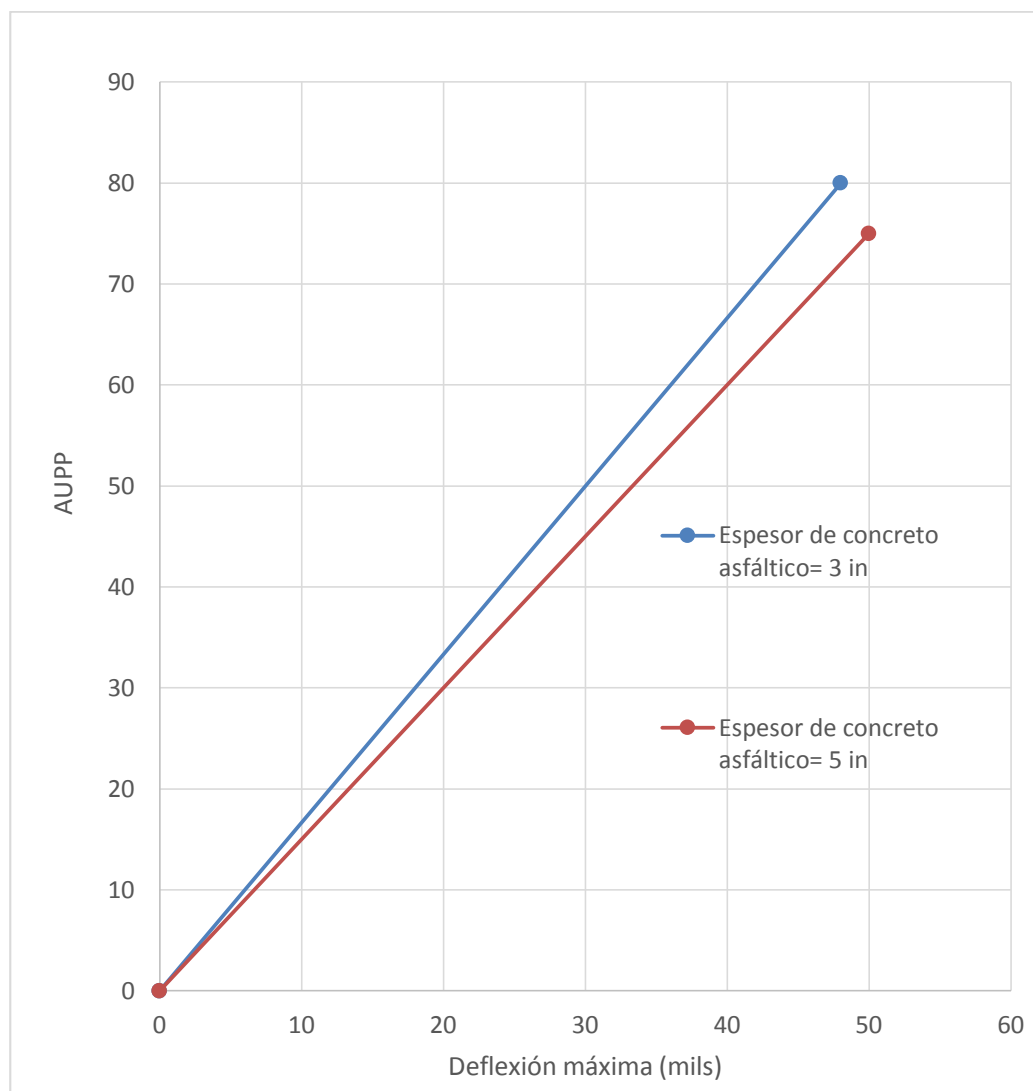


Figura 1-6. Correlación entre la deflexión máxima y la AUPP.

Tomado de Garg & Thompson, (1998).

También se puede observar que la relación entre el AUPP y la deflexión máxima varía con el espesor de concreto asfáltico. Del anterior hecho se puede inferir que existe una relación entre el AUPP y el comportamiento mecánico de la carpeta asfáltica, como lo determinaron Garg & Thompson (1998), quienes encontraron que este parámetro puede ser utilizado para la estimación de la deformación en la base de la carpeta asfáltica (ε_t). En la Tabla 1-4 se presentan las correlaciones recopiladas por Shahin (2005) y Garg & Thompson, (1998):

Tabla 1-4. Correlaciones entre el AUPP y la deformación de la carpeta asfáltica.

| Ecuación | Fuente | Criterios |
|---|---|--|
| $\varepsilon_t = 14,497AUPP^{0.873406}$ | Crovetti (2002) | - |
| $Log(\varepsilon_t) = 1,001 + 1,024 * Log(AUPP)$ | Hill & Thompson | $R^2=0,997$ Para capa de concreto asfáltico entre 9,5-14 in |
| $Log(\varepsilon_t) = 1,2105 + 0,821 * Log(AUPP)$ | Algoritmo IDOT (Illinois Department Of Transportation) | $R^2=0,973$ Para capa de concreto asfáltico entre 3-8 in |

Las anteriores ecuaciones indican que la correlación es mayor cuando la capa de concreto asfáltico es más gruesa. Esto queda también indicado en los resultados de Garg & Thompson (1998), donde se concluye que la correlación entre datos medidos y los simulados es más precisa para capas mayores a 5 pulgadas, es decir en los casos donde el concreto asfáltico tiene un aporte estructural.

1.1.6 Parámetros geométricos asociados a las características mecánicas de las capas de pavimento.

El cuenco de deflexiones puede ser dividido en 3 zonas (Horak & Emery, 2009), como se observa en la Figura 1-7. Cada una de estas zonas puede ser descrita utilizando la diferencia entre la deflexión inicial y final en la zona. Estas diferencias corresponde a la pendiente de cada zona y dan origen a 3 parámetros: índice de curvatura de la superficie (SCI), índice de daño en la base (BDI) e índice de curvatura en la base (BCI).

En la Tabla 1-5 y en la Tabla 1-6 se presentan los valores típicos de los anteriores parámetros y su relación con la condición del pavimento. Estos valores fueron determinados por Horak & Emery (2009) y permiten realizar una evaluación comparativa entre el estado del pavimento y unos valores considerados críticos. Este tipo de comparaciones permiten optimizar los recursos de mantenimiento en redes viales.

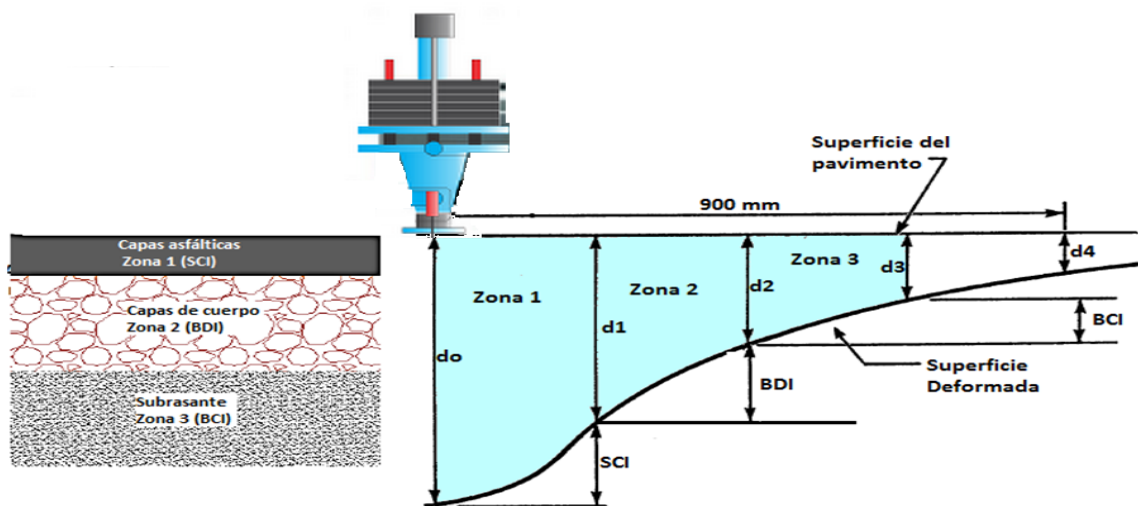


Figura 1-7. Zonas del cuenco de deflexión.

Tomada de Horak & Emery, (2009)

Tabla 1-5. Valores utilizados para la evaluación comparativa de pavimentos con base granular.

Tomado de Horak, (2008)

| | Condición estructural | Parámetros del cuenco de deflexiones | | | |
|---------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | d_0 (μm) | SCI (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) |
| Base Granular | Bueno | <500 | <200 | <100 | <50 |
| | Alarma | 500-750 | 200-400 | 100-200 | 50-100 |
| | Grave | >750 | >400 | >200 | >100 |

Tabla 1-6. Valores utilizados para la evaluación comparativa de pavimentos con base de materiales bituminosos.

Tomado de Horak, (2008)

| | Condición estructural | Parámetros del cuenco de deflexiones | | | |
|-----------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | d_0 (μm) | SCI (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) |
| Base Bituminosa | Bueno | <400 | <200 | <100 | <50 |
| | Alarma | 400-600 | 200-400 | 100-150 | 50-80 |
| | Grave | >600 | >400 | >150 | >80 |

- Índice de curvatura de la superficie (SCI).

Según Horak (2009) la zona 1 está más cerca al punto de aplicación de la carga y presenta una curvatura positiva. Esta zona se encuentra a 300 mm del punto de carga y está asociada a las capas superficiales del pavimento. Esta zona puede representarse a través del índice de curvatura de la superficie (SCI). Se ha encontrado que este parámetro puede ser utilizado para evaluar las estrategias de rehabilitación a utilizar (Department of Transport, Tourism and Sport of Ireland, 1999). También se han encontrado correlación entre el SCI y el módulo de las capas asfálticas con R^2 de hasta 0,796. (Behbahani & Sahaf, 2007).

- Índice de daño en la base (BDI).

La zona 2 o zona de inflexión presenta el cambio de una curvatura positiva a una negativa. Esta zona generalmente varía entre los 300 y los 600 mm y se asocia con el comportamiento de las capas de cuerpo de la estructura. Esta zona se caracteriza por el índice de daño en la base (BDI). En esta zona pueden detectarse los cambios en las capas del cuerpo. En el 2003 Al-Qadi & Kwasi Appea después de analizar datos multianuales para una vía secundaria concluyeron que secciones estabilizadas con geotextil tendrán un BDI de casi la mitad que el de una sección sin estabilizar. Además encontraron que en casos donde se presenta contaminación de los materiales granulares con finos de la subrasante la disminución de la resistencia de estos se ve reflejada en el BDI.

- Índice de curvatura en la base (BCI).

La zona 3 está asociada con el comportamiento de la subrasante y presenta una curvatura negativa expandiéndose entre 600 y 2000 mm del punto de aplicación de la carga. La extensión de esta zona está relacionada con el espesor total del pavimento.

De acuerdo a los análisis de sensibilidad llevados a cabo por Kim & Park, (2002) se encontró que el índice de curvatura en la base (BCI) definido como la diferencia entre las deflexiones a 600 mm y 900 mm, puede ser utilizado como indicador de la condición de la subrasante encontrando una fuerte correlación con la deformación en la superficie de la subrasante ($R^2=0,75$).

1.2 Evaluación de características mecánicas utilizando parámetros del cuenco de deflexiones.

1.2.1 Evaluación del módulo resiliente de la subrasante utilizando retrocálculo.

La determinación de las propiedades mecánicas de la subrasante es junto con la caracterización del tráfico las actividades más importantes para el diseño y evaluación de una estructura de pavimentos. El módulo resiliente es el mejor parámetro para caracterizar materiales no ligados en un pavimento, lo anterior teniendo en cuenta que la deflexión elástica (resiliente) representa mejor el comportamiento de la estructura que la deflexión total sin embargo según George K.P.(2003) el ensayo de laboratorio para obtener el módulo resiliente tiene las siguientes limitaciones:

- La muestra utilizada para realizar el ensayo no representa completamente las condiciones in situ debido a la alteración de la muestra, la succión del suelo y el nivel de compactación.
- Limitaciones de los equipos de laboratorio para representar los estados de esfuerzos del suelo, así como problemas de calibración que llevan a diferencias entre diferentes laboratorios.
- La dificultad, costo y tiempo involucrado en lograr un muestreo estadístico adecuado que refleje las variaciones en la subrasante.

Debido a estas limitaciones diversos autores han buscado correlacionar el módulo resiliente con ensayos de campo, particularmente con mediciones de la deflexión.

En este capítulo se presentan 2 metodologías para la determinación del módulo de la subrasante a partir de la deflexión. Las metodologías seleccionadas tienen en común, que no necesitan el espesor de las capas de pavimento para estimar el módulo de la subrasante.

Horak (2007) presenta basado en los trabajos de Ullidtz (1987) un método para calcular el módulo de superficie. Este parámetro representa el modulo promedio ponderado del semi espacio para las deflexiones superficiales medidas. La anterior equivalencia se obtiene utilizando las ecuaciones de Boussinesq.

El módulo de superficie se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$SM_{(r)} = \sigma_0 * (1 - \mu^2) * \left(\frac{a^2}{r * d_{(r)}} \right)$$

En donde:

$SM_{(r)}$: Módulo de superficie calculado a una distancia r.

σ_0 : Esfuerzo de contacto en MPa

μ : Relación de Poisson

r: Distancia al punto de aplicación de la carga en mm.

$d_{(r)}$: Deflexión a la distancia r en mm.

a: Radio del plato de carga en mm.

Para la anterior ecuación y considerando una distribución de esfuerzos a 45 grados como se presenta en la Figura 1-8, existe una distancia r a la cual la influencia de las capas de cuerpo y de superficie no es relevante por lo tanto el módulo de superficie representa a el módulo de la subrasante.

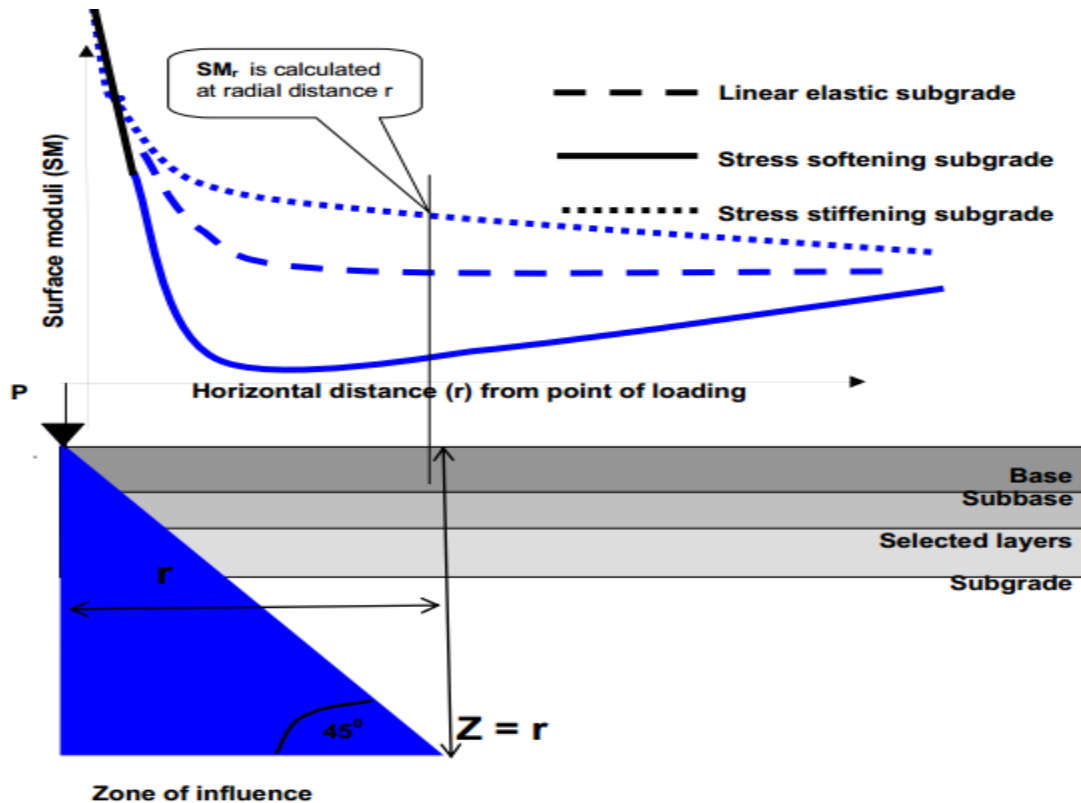


Figura 1-8. Distribución de esfuerzos supuesta en la estructura de pavimentos.

Tomado de Horak, (2008)

También se debe mencionar que cuando el módulo de superficie se calcula en la zona 3 del cuenco de deflexiones se puede identificar si la subrasante presenta un comportamiento lineal elástico, endurecimiento o ablandamiento ante el esfuerzo de compresión impuesto por el tráfico. En la Figura 1-8 se presenta de manera esquemática el comportamiento del módulo y su relación con el tipo de respuesta de la subrasante.

Teniendo en cuenta esta posibilidad, Horak propone unos rangos que dependen del módulo de superficie diferencial (SMD), que puede definirse como la diferencia entre los módulos de superficie (SM) calculados a las distancias 600 y 1200 mm. En la Tabla 1-7 se presentan los criterios utilizados para definir la respuesta de la subrasante.

Tabla 1-7. Evaluación de la respuesta de la subrasante.

Tomado de Horak, (2007)

| Response classification | Surface Modulus Differential (SMD) Ranges (MPa) |
|-------------------------|---|
| Stress softening | > 20 |
| Linear elastic | 20 to -20 |
| Stress stiffening | < -20 |

Hoffman (2003) propuso un método simplificado para la estimación del módulo resiliente de la subrasante. Este método (YONAPAVE) está basado en la mediciones de deflexión del FWD y su comparación con los cuencos de deflexión obtenidos aplicando el modelo de Hogg de una losa delgada apoyada sobre una subrasante elástica. Las variables que intervienen en este modelo son:

D: espesor de la losa

a: radio de carga

h: espesor hasta una base rígida

p: presión aplicada

E_{sg} : módulo de la subrasante

μ_{sg} : Relación de Poisson de la subrasante

En la Figura 1-9 se presenta la geometría básica del modelo utilizado.

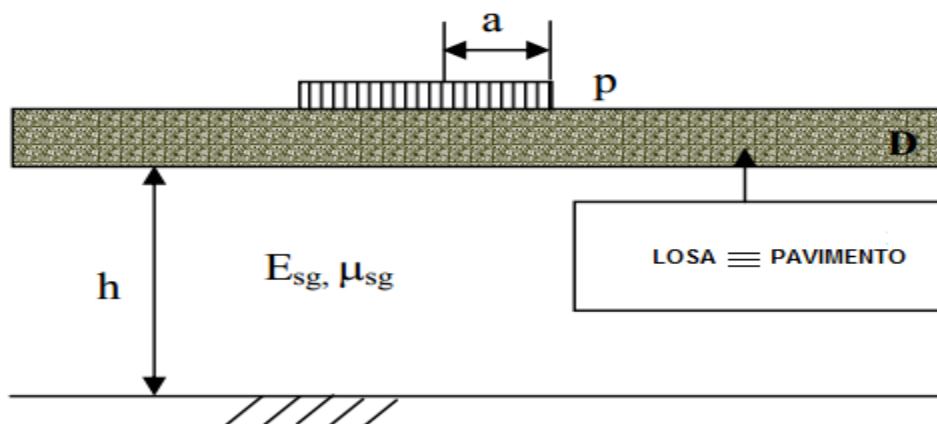


Figura 1-9. Geometría del modelo de Hogg.

Tomado de Hoffman, (2003)

El modelo de Hogg fue aplicado para una carga distribuida de 15 cm de radio y con la misma magnitud de la presión ejercida por el FWD, obteniendo así cuencos de deflexión sintéticos. Se debe resaltar que en este modelo se asumió una profundidad del estrato de roca profundo. En la Figura 1-10 se muestran los cuencos obtenidos.

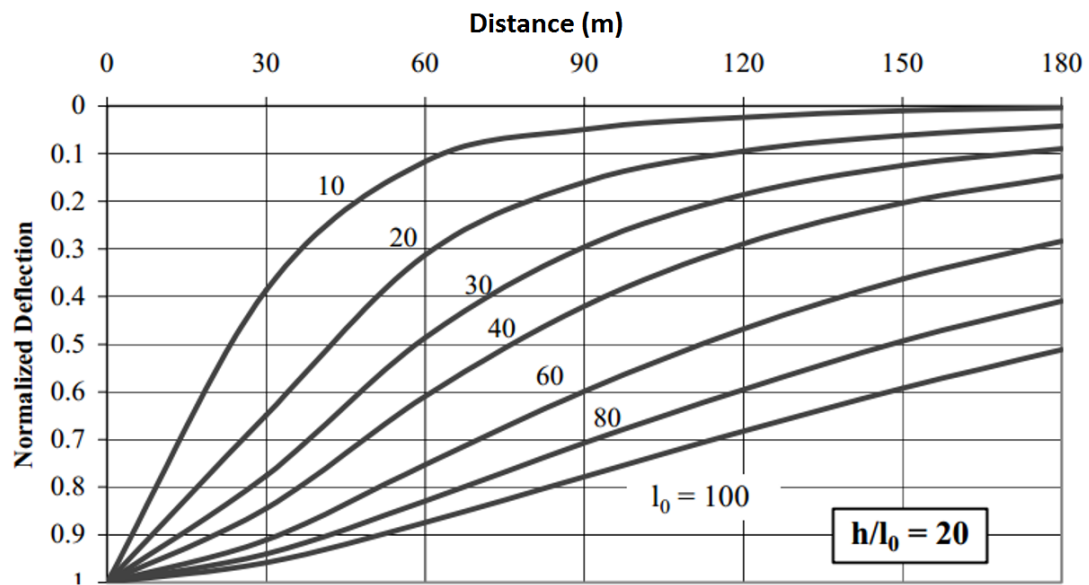


Figura 1-10. Cuencos de deflexión sintéticos del modelo de Hogg.

Tomado de Hoffman, (2003)

Estos cuencos fueron comparados con cuencos medidos in situ y con modelaciones realizadas utilizando el software MODULUS. A partir de estos ajustes se desarrollaron las ecuaciones para la estimación del módulo. Las ecuaciones dependen de la geometría del cuenco (área y deflexión máxima) y de la carga aplicada por el FWD.

La metodología YONAPAVE queda reducida a dos ecuaciones que dependen de parámetros de ajustes, que son función de las características propias de cada cuenco de deflexiones. A continuación se presentan las ecuaciones y los parámetros de ajuste que componen el método.

$$l_0 = A * e^{B * Area}$$

Donde:

l_0 : longitud característica del cuenco

Área: parámetro área del cuenco de deflexiones.

A y B: parámetros de ajuste de la curva que se presentan en la Tabla 1-8.

Tabla 1-8. Parámetros de ajuste para el cálculo de la longitud característica.

Tomado de Hoffman, (2003)

| Parámetro área (in) | h/l ₀ | A | B |
|---------------------|------------------|-------|--------|
| ≥ 23 | 5 | 3,275 | 0,1039 |
| 21-23 | 10 | 3,691 | 0,0948 |
| 19-21 | 20 | 2,8 | 0,1044 |
| <19 | 40 | 2,371 | 0,1096 |

Una vez se conoce la longitud característica del cuenco de deflexiones se procede a calcular el módulo resiliente de la subrasante:

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

Donde:

E_{sg}: módulo de la subrasante en MPa.

p: presión máxima aplicada por el FWD en kPa.

d₀: deflexión máxima en μm.

m y n: parámetros de ajuste de la curva que se presentan en la Tabla 1-9.

Tabla 1-9. Parámetros de ajuste para el cálculo del módulo de la subrasante.

Tomado de Hoffman, (2003)

| h/l ₀ | m | n |
|------------------|--------|---------|
| 5 | 926,9 | -0,8595 |
| 10 | 1152,1 | -0,8782 |
| 20 | 1277,6 | -0,8867 |
| 40 | 1344,2 | -0,8945 |

El método de YONAPAVE ha sido evaluado para los suelos de la ciudad. Leal (2010) realizó una comparación entre las diferentes técnicas de retrocálculo y resultados de ensayos de laboratorio para la determinación del módulo resiliente en la ciudad de Bogotá encontrando que:

- De acuerdo a los resultados obtenidos y a la revisión de otras investigaciones, se tiene que los módulos de la subrasante retrocalculados son mayores a los determinados en laboratorio.
- Se recomienda el uso de la metodología YONAPAVE para la determinación del módulo de subrasante, utilizando los factores de corrección propuestos.
- Dependiendo del material detectado el factor de corrección para el método de YONAPAVE varía entre 0,6 y 0,9.

1.2.2 Valores reportados del módulo resiliente en la ciudad de Bogotá.

En la ciudad de Bogotá usualmente se ha utilizado el CBR como parámetro para estimar el módulo resiliente de la subrasante. Según Salgado(2003) la ciudad de Bogotá puede dividirse en cuatro zonas geotécnicas de acuerdo a la variación del CBR como se presenta en la Tabla 1-10 y en la Figura 1-11 encontrando valores típicos entre 1 y 5 % en las diferentes zonas de la ciudad.

Tabla 1-10. Zonificación geotécnica a partir del CBR en la ciudad de Bogotá.
Tomado de Consorcio HVM-LG, (2007) y Salgado, et al., (2003).

| ZONA # | CBR (%) | LOCALIDADES | OBSERVACIONES |
|--------|-----------|---|--|
| Z1 | 1.6 - 2.5 | Suba, Engativá, Kennedy | El límite oriental de esta zona se establece en el corredor existente de la Avenida Ciudad de Cali entre la Avenida Ciudad de Villavicencio y la Avenida Alsacia, y entre la Avenida José Celestino Mutis y la terminación del perímetro urbano en el norte de la ciudad. En los límites anteriores, se excluye la localidad de Fontibón |
| Z2 | 2.6 - 3.0 | Suba, Usaquén, Engativá, Barrios Unidos, Fontibón, Teusaquillo, Chapinero, Kennedy, Puente Aranda, Santa fe, Antonio Nariño y La Candelaria | El límite occidental de esta zona se establece en el corredor existente de la Avenida Ciudad de Cali y el límite oriental se establece en el corredor de la Avenida Carrera 7ma. De igual forma, el límite sur se establece a lo largo del Río Tunjuelo y el límite norte se establece aproximadamente en el corredor de la proyectada Avenida Tibabita. dentro de esta zona se encuentra la localidad de Fontibón |
| Z3 | 3.1 - 4.0 | Suba, Usaquén, Chapinero, Santa fe, La Candelaria | Esta zona se encuentra en los cerros orientales partiendo desde la Avenida Carrera 7ma. Su límite sur se encuentra en la frontera que divide a la localidad de la Candelaria con la localidad de San Cristóbal. Adicionalmente, el sector ubicado en los cerros de Suba, hacen parte de esta zona. |
| Z4 | 4.1 -5.0 | San Cristóbal, Usme, Rafael Uribe, Tunjuelito, Bosa, Ciudad Bolívar | Esta zona se encuentra ubicada al sur del Río Tunjuelito, incluyendo los cerros ubicados en las localidades de San Cristóbal y Usme, así como los cerros ubicados en la localidad de Ciudad Bolívar |

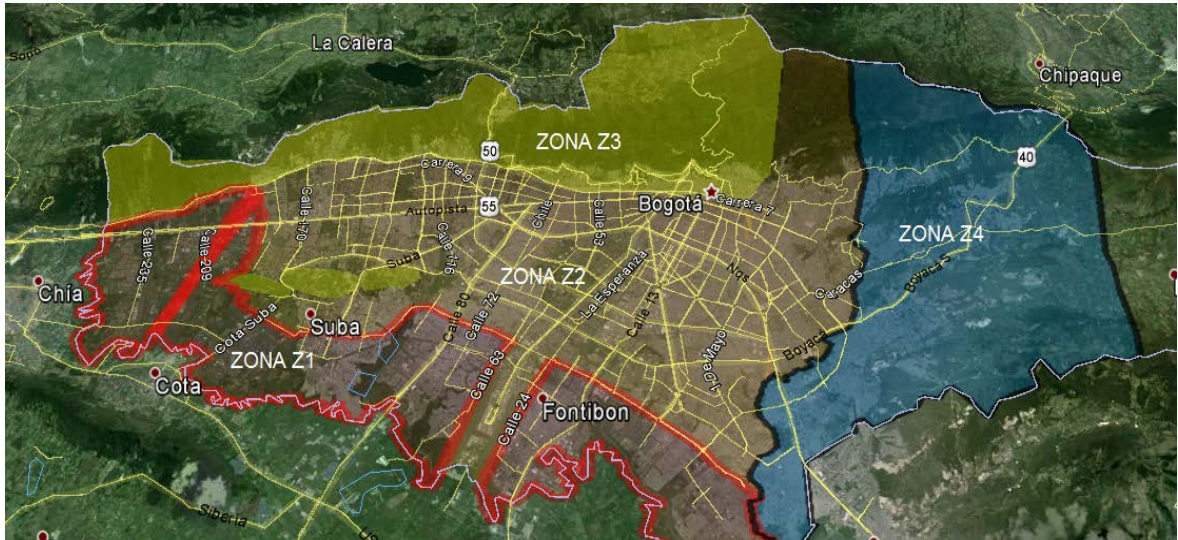


Figura 1-11. Zonificación geotécnica de Bogotá.

Por su parte en la Cartilla-Guía De Diseño De Pavimentos Para Bajos Volúmenes De Tránsito Y Vías Locales Para Bogotá D.C. (Murillo, et al., 2013), se reportan 81 valores de CBR, obtenidos de los informes de urbanizadores en la ciudad, mostrando que el rango de valores de CBR de diseño esta entre 1 y 5 %, en la Figura 1-12 se muestran estos valores. La revisión realizada involucró estudios de pavimentos en toda la ciudad para vías de bajos volúmenes de tráfico. Estos valores permitieron definir los rangos de CBR de diseños implementados en la cartilla.

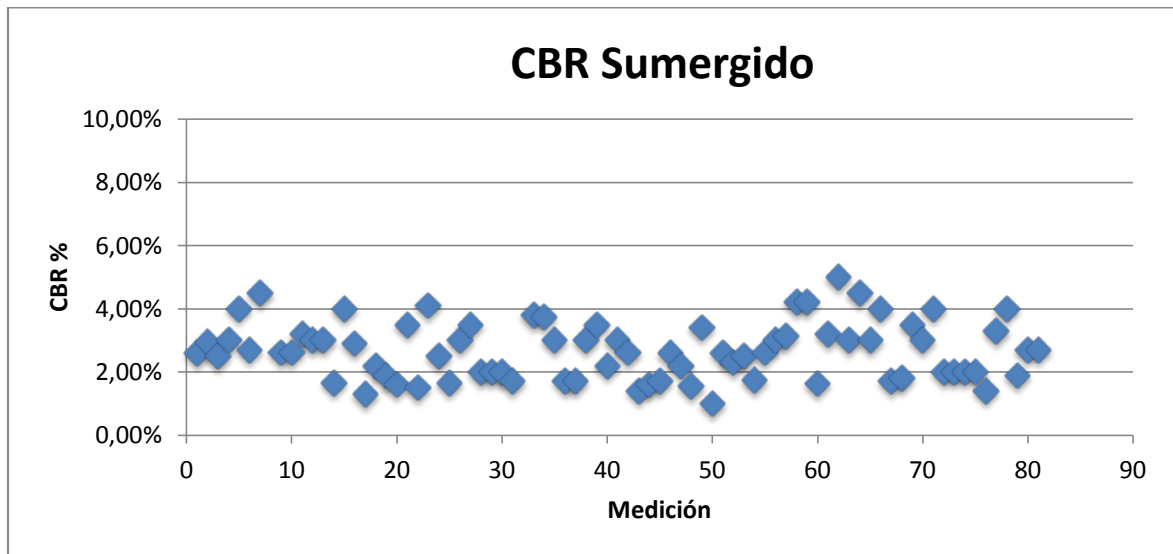


Figura 1-12. CBR de diseño, de los estudios de urbanizadores.

Tomado de Murillo, et al.,(2013)

A partir de los CBR en la ciudad generalmente se utiliza la correlación propuesta por Heukelom and Klomp (1962), donde se establece que el módulo resiliente (MR) en MPa es 10 veces el valor de CBR (%). Sin embargo Van Til et al (1972) estableció que para casos en los que se trabaje con suelos finos el rango de variación del módulo resiliente (MR) es más amplio. Por lo anterior se recomienda en suelos con valores inferiores a 4% de CBR, utilizar una relación de 7,5 veces con el módulo en MPa.

1.2.3 Correlación entre el módulo resiliente y los parámetros geométricos del cuenco de deflexión.

Debido a la relación existente entre los parámetros del cuenco y el comportamiento de las diferentes capas de la estructura, se han realizado investigaciones donde se busca correlacionar dichos parámetros con los módulos retrocalculados para cada capa. Sveindóttir (2011) encontró que las funciones que mejor se ajustan son las de forma de potencia. En la figura 7 se presenta la correlación encontrada entre el módulo resiliente de la subrasante. Vale la pena resaltar que los mejores ajustes se encontraron en mediciones realizadas en primavera. Los procesos de congelamiento de la estructura afectaron de manera importante los parámetros del cuenco y sus correlaciones.

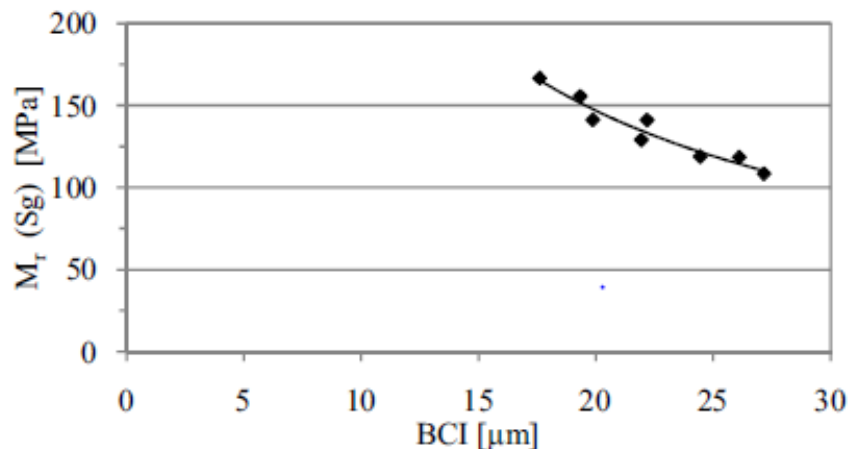


Figura 1-13. Correlación entre el BCI y el módulo resiliente de la subrasante.

Tomado de Sveinsdóttir, (2011)

Kim (2001) correlacionó todos los parámetros geométricos asociados al cuenco (BCI, BDI, SCI) con las características propias de una estructura de pavimento como

son los espesores de cada capa y los módulos de las mismas. Además involucro el módulo resiliente en el punto de rotura que puede definirse como aquel que se presenta en el cambio de pendiente de la curva módulo resiliente contra esfuerzo desviador como se muestra en la Figura 1-14.

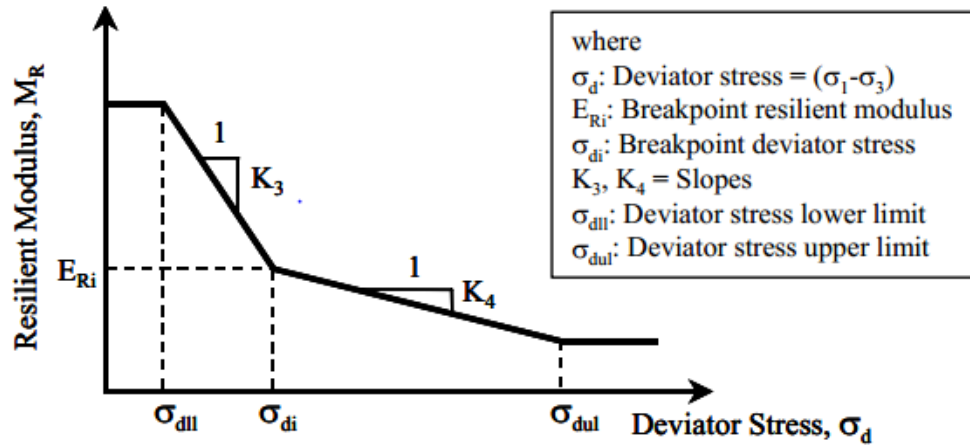


Figura 1-14. Definición del módulo punto de rotura. Tomado de Ceylan & Gopalakrishnan, (2006)

De lo anterior Kim obtuvo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Log}(BDI) = -0.7272 \cdot \log(E_{ac}) - 1.8812 \cdot \log(H_{ac}) - 0.1073 \cdot \log(E_{Ri}) + 4.3299$$

$$\text{Log}(BCI) = 0.5757 \cdot \log(E_{ac}) + 1.7014 \cdot \log(H_{ac}) - 0.1885 \cdot \log(E_{Ri}) + 0.1654 \cdot \log(H_{sg}) + 3.3744$$

Donde:

- Eac: es el módulo del concreto asfáltico
- Hac: espesor del concreto asfáltico
- Hsg: espesor de la subrasante (generalmente infinito)
- Eri: módulo resiliente del punto de rotura (Figura 1-14)

A partir de estas ecuaciones se determinaron correlaciones con características significativas del pavimento como el CBR(%).

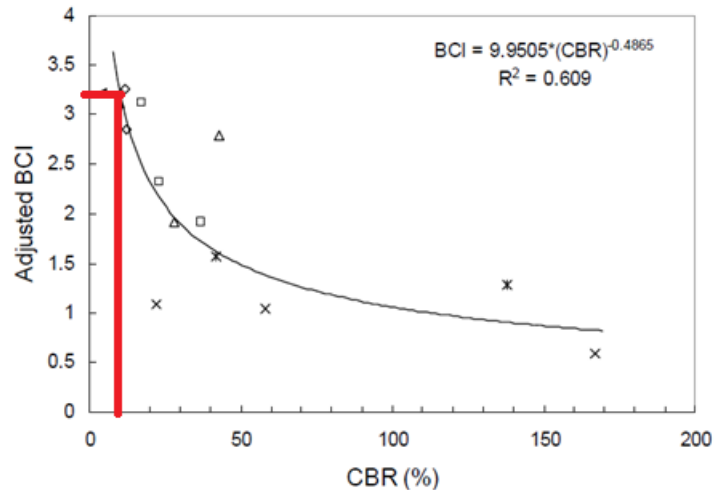


Figura 1-15. Correlación entre el BCI ajustado y el CBR.

Tomado de Kim, (2001)

En la anterior figura se puede observar que la correlación encontrada por el autor presenta valores bajos de R^2 . También es importante resaltar que Kim(2001) propone el valor de BCI ajustado de 3,2 mils como el indicador de una subrasante débil (CBR<10%).

1.2.4 Uso de curvas típicas y parámetros normalizados en la evaluación del pavimento.

Teniendo en cuenta que los cuencos de deflexión de un pavimento, se ven afectados por diferentes características como el espesor de las capas, los módulos de las mismas y el tipo de estructura, se han venido desarrollando técnicas que normalizan los cuencos de deflexiones para estructuras con espesores fijos que pueden ser utilizadas con diferentes valores de módulo de las capas, para predecir los cuencos de deflexión.

En 1985, Mamlouk utilizó un método mecanicista (Chevron N-layer Elastic), donde se consideraron materiales elásticos y se despreció el efecto de la relación de Poisson, para correlacionar el módulo de las capas del pavimento con las deflexiones medidas en campo y con parámetros normalizados.

$$E_i = q * (k/d_o) / \bar{E}_i$$

Donde:

- E_i : es el módulo de la capa i en psi
- i: 1,2,3,4 representa rodadura, base, subbase, subrasante respectivamente
- q: Carga en psi
- k: valor de deflexión máxima normalizada, in
- d_o : deflexión máxima medida, in
- \bar{E}_i : módulo normalizado de la capa en psi

Con lo anterior Mamlouk propone una serie de 24 curvas típicas, que fueron desarrolladas para dos estructuras de 3 capas (rodadura, base, sub-base). Los espesores de las estructuras evaluadas y las curvas obtenidas se presentan en la Figura 1-16.

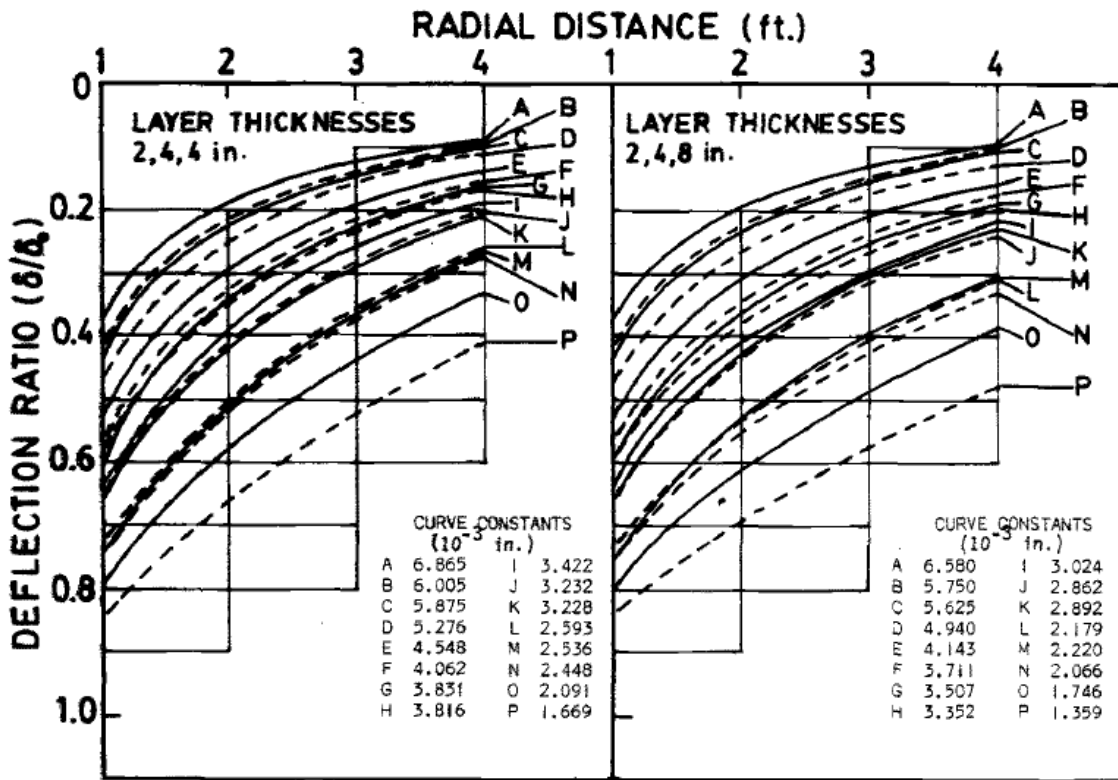


Figura 1-16. Curvas típicas para el cálculo de módulos con diferentes espesores de capa. Tomado de Mamlouk, (1985)

Las curvas presentadas tienen como ventaja la sencillez para ser utilizadas en la evaluación de redes viales sin necesidad de realizar cálculos o modelaciones cada vez, también permiten la interpolación siempre y cuando se tenga en cuenta la variación de la pendiente de las gráficas.

Talvik & Aavik (2009) utilizaron una base de datos de deflexiones medidas con el FWD en Estonia y encontraron una adecuada correlación entre los parámetros del cuenco de deflexión(BCI,SCI) y un módulo mínimo requerido asociado al tráfico esperado .

El módulo de mínimo requerido se puede calcular como:

$$E_{req} = (a * \log(Q) + b) * K_{tt}$$

En donde:

- Q: es el número de ejes equivalentes proyectados
- a,b: son constantes de ajuste relacionadas con la carga.
- K_{tt} : es una constante que depende del tipo de proyecto.

Las correlaciones entre los parámetros del cuenco y el modulo requerido, estuvieron influenciadas por el tipo de pavimento, para estructuras flexibles tradicionales la mejor correlación se presentó para el SCI con un R2 de 0,87.

Una vez se estima el E_{req} para el proyecto, se estiman los parámetros mínimos requeridos, utilizando las ecuaciones desarrolladas por los autores y a través de la comparación entre los parámetros medidos y los requeridos, es posible predecir que capa o capas generan las fallas de la estructura de pavimento, esto teniendo en cuenta que cada parámetro representa una zona del cuenco de deflexiones y por lo tanto una capa del pavimento. Este tipo de herramienta puede ser utilizado para complementar la evaluación de secciones nuevas de pavimentos en redes viales, particularmente en vías de bajos volúmenes de tránsito donde la realización de ensayos de verificación resulta costoso.

1.3 Efecto de las características estructurales en el cuenco de deflexión.

Tam (1987) realizó un análisis de sensibilidad del cuenco de deflexión ante las características estructurales del pavimento (rigidez y espesor) para diferentes tipos de estructuras flexibles. La estructura de 4 capas evaluada por Tam está conformada por 2 capas asfálticas, 1 capa granular y la subrasante como se muestra en la Figura 1-17. Aunque en Bogotá generalmente se utilizan dos capas granulares la influencia de las mismas puede ser representada por una sola capa equivalente.

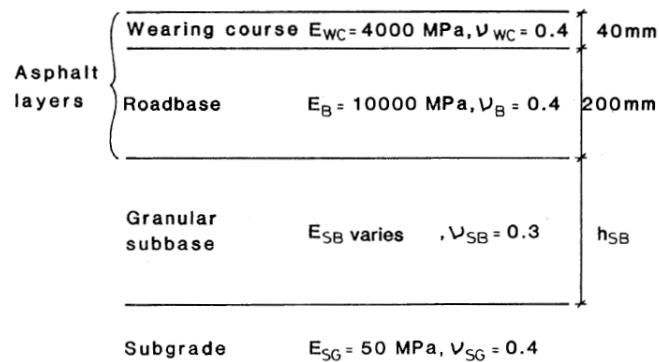


Figura 1-17. Estructura de 4 capas analizada.

Tomado de Tam, (1987)

A continuación se resumen las conclusiones más importantes del estudio de Tam:

- Se necesitan grandes cambios en el módulo de la capa granular para generar pequeñas variaciones en la forma y magnitud del cuenco, por lo tanto se puede esperar que al evaluar un pavimento existente no se pueda determinar con precisión el módulo del material granular. Como se muestra en la Figura 1-18.

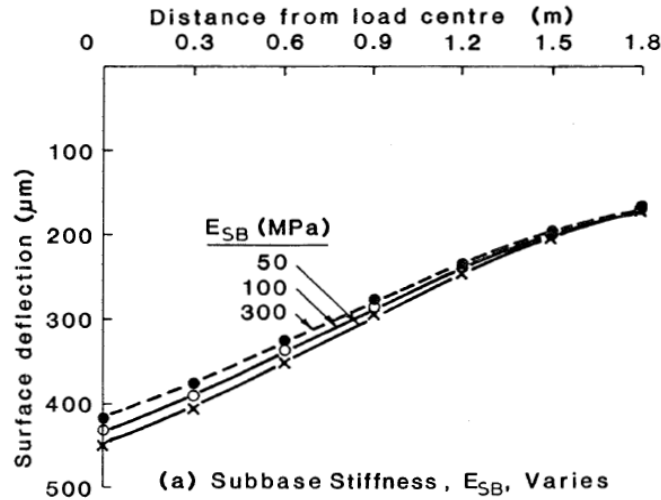


Figura 1-18. Influencia de la capa granular en el cuenco de deflexión.

Tomado de Tam, (1987)

- Teniendo en cuenta lo anterior pequeñas imprecisiones o incertidumbres que se tengan respecto al material granular no impactaran de manera importante la evaluación estructural.
- La influencia de las capas de asfalto y de la capa de subrasante en el cuenco es similar a la obtenida cuando se analiza un pavimento de tres capas (full depth pavement).
- Cambios en la rigidez de la base asfáltica afectan la forma del cuenco de deflexiones alrededor de los primeros 90 cm del mismo. Los cambios en la rigidez de la subrasante afectan en general todo el cuenco. Estos resultados se presentan en la Figura 1-19.
- Se encontró que la relación de Poisson de las diferentes capas no influencia de manera importante a las deflexiones, lo anterior permite asumir valores constantes de esta relación durante el uso de métodos de retro-cálculo y el desarrollo de modelos de pavimentos sin inducir un error significativo. En la Figura 1-20 se puede observar que la relación de Poisson se hace más importante, cuando las capas asfálticas son muy rígidas, en cuanto a la subrasante la relación de Poisson incrementa su influencia cuando la misma presenta una baja rigidez.

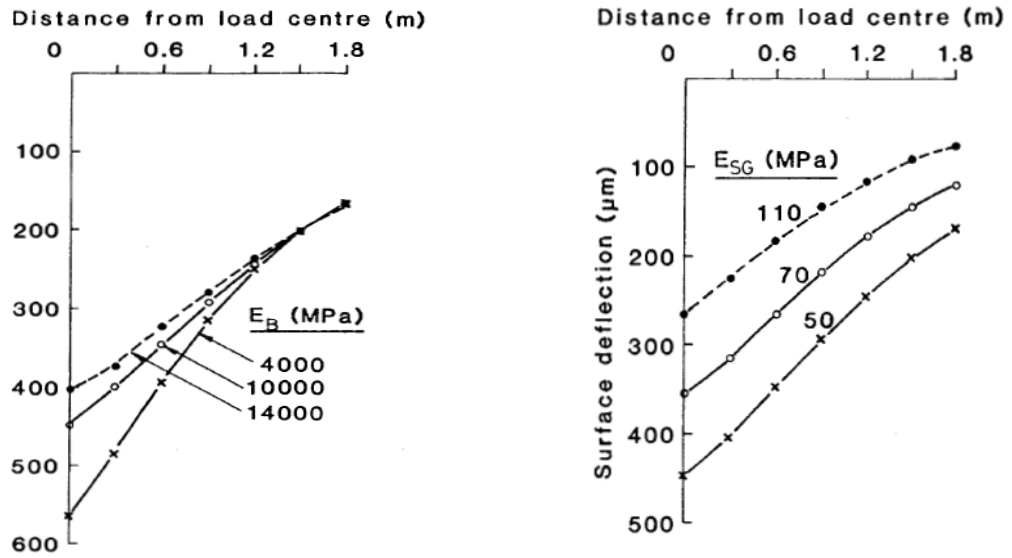


Figura 1-19. Influencia de la rigidez de la base asfáltica (izquierda) y de la subrasante(derecha) en el cuenco de deflexiones.

Tomado de Tam, (1987)

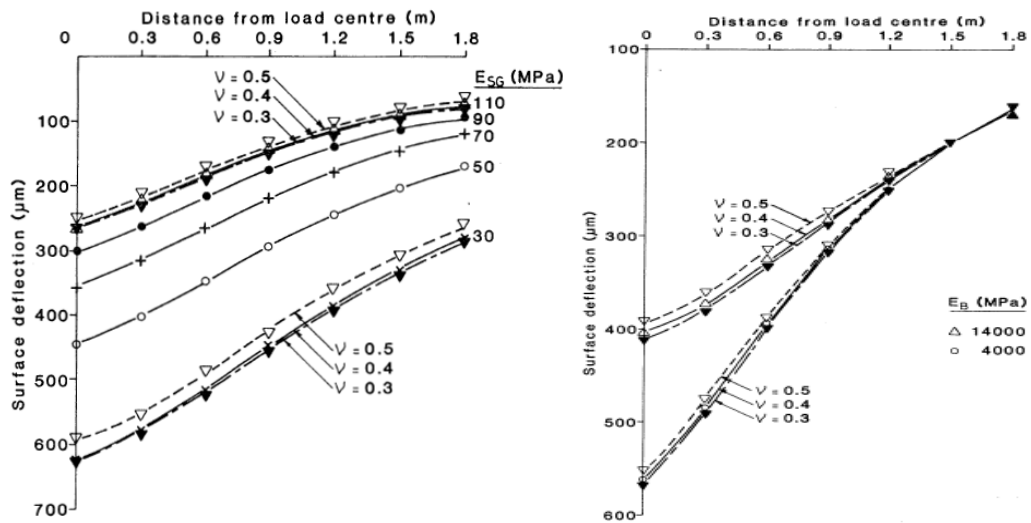


Figura 1-20. Influencia de la relación de Poisson de la base asfáltica (derecha) y de la subrasante (izquierda) en el cuenco de deflexiones.

Tomado de Tam, (1987)

- Tam estudió también la correlación entre las pendientes del cuenco de deflexión, con la variación de la rigidez en las diferentes capas del pavimento. Para observar esta relación generó una base de datos sintética, basado en el software BISTRO.
- En la Figura 1-21 se presenta la influencia de la rigidez de la capa de rodadura en las diferentes pendientes del cuenco. Se puede observar en esta figura que la mayor influencia se produce en la pendiente Δ_{12} (SCI), que equivale a la pendiente en los primeros 30 cm de distancia del punto de aplicación de la carga lo que corresponde con la zona 1 definida anteriormente.

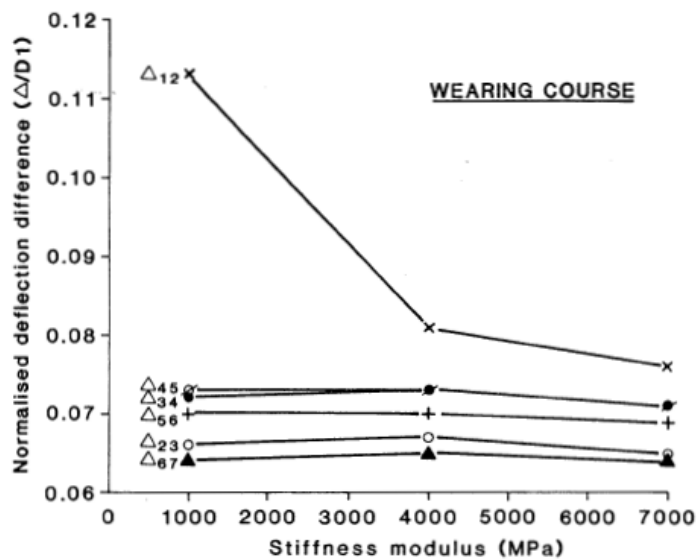


Figura 1-21. Relación entre la rigidez de la capa de rodadura y las pendientes del cuenco de deflexiones.

Tomado de Tam, (1987)

- La investigación realizada por Tam, sustenta teóricamente el uso de los parámetros del cuenco como técnica de evaluación de los diferentes parámetros estructurales del pavimento.

1.4 Métodos para el diseño de sobrecarpetas asfálticas en pavimentos flexibles.

1.4.1 Generalidades.

Las sobrecarpetas asfálticas son utilizadas como técnica de rehabilitación y/o reforzamiento, en casos donde la superficie asfáltica actual se encuentra muy deteriorada y cuando se espera un aumento del tráfico durante la vida útil de la estructura. Para evitar el reflejo de fisuras en la superficie existente que se encuentra en mal estado esta generalmente es fresada. Este procedimiento también permite conservar las pendientes existentes en la vía.

Actualmente las metodologías más utilizadas en el diseño de sobrecarpetas están basadas en el concepto de la deficiencia estructural, según el cual la sobrecarpeta debe compensar la diferencia entre la capacidad necesaria para soportar el tráfico requerido y la capacidad actual del pavimento. La más conocida de estas metodologías es la propuesta por AASHTO (1993). También utilizan este concepto las propuestas hechas por el cuerpo de ingenieros y el instituto del asfalto. (Crovetti , 2005).

Igualmente se han desarrollado metodologías que limitan la deflexión máxima, como la propuesta por el instituto del asfalto. En este método la sobrecarpeta tiene como función disminuir la deflexión de la estructura a niveles adecuados para el tráfico esperado.

1.4.2 Metodología de la AASHTO.

La metodología desarrollada por la AASHTO (1993) utiliza las deflexiones medidas en campo con el FWD, como base para estimar el módulo resiliente de la subrasante, se utilizan deflexiones que estén lo suficientemente alejadas del punto de aplicación de la carga, la ecuación propuesta por este método es derivada del concepto de módulo de superficie que fue discutido en el numeral 1.2.1, asumiendo un valor de relación de Poisson de 0,5 la ecuación derivada de Boussinesq puede escribirse como:

$$M_R = \frac{0.24 * P}{r * D_r}$$

Donde:

- M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi)
- P : carga aplicada por el FWD (lb)
- r : distancia desde el punto de aplicación de la carga (in)
- D_r : la deflexión medida a una distancia r (in)

Para el uso de esta ecuación se debe definir a que distancia se está estimando el módulo de la subrasante. Por lo anterior, Crovetti (2005) recomienda calcular el módulo con todas las mediciones de deflexión y escoger el menor valor obtenido como módulo para el diseño de sobrecarpetas.

Una vez se ha caracterizado la subrasante es necesario obtener un parámetro que represente el conjunto de las capas de la estructura de pavimento, en el procedimiento de la AASHTO esto se logra calculando un módulo equivalente para el pavimento, utilizando un proceso iterativo para resolver la siguiente ecuación:

$$d_0 = 1,5 * p * a * \left\{ \frac{1}{M_R * \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

Donde:

- p : presión aplicada por el FWD (psi).
- a : radio del plato de carga (in).
- d_0 : máxima deflexión medida (in).
- D : espesor total de las capas del pavimento (in).
- E_p : módulo equivalente de la estructura de pavimento (psi)

Con este módulo equivalente se puede calcular el número estructural efectivo del pavimento existente (SN_{eff}):

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

El espesor de la sobrecarpeta asfáltica dependerá del número estructural necesario para el tráfico proyectado (SN_f), que se calculará utilizando las ecuaciones de diseño AASHTO convencionales. Se debe resaltar que el M_R calculado a partir de las deflexiones del FWD debe ser corregido por un factor de 0,33 para utilizarse en la determinación del número estructural requerido.

El espesor de la sobrecarpeta se calcula como:

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - SN_{eff})}{a_{ol}}$$

Donde:

D_{ol} : espesor requerido de sobrecarpeta (in)
 a_{ol} : coeficiente estructural de la sobrecarpeta.

Teniendo en cuenta la importancia de un adecuado diseño para la sobrecarpetas, diferentes investigaciones se han llevado a cabo. En el año 2007 en Lousiana se probaron cuatro métodos de diseño basados en ensayos no destructivos, obteniendo que métodos tradicionales como el propuesto por AASTHO en 1993 sobreestima el numero estructural efectivo del pavimento lo que conduce a un subdimensionamiento de la sobrecarpeta. También esta investigación encontró que métodos particulares desarrollados para otros estados no eran aplicables y que el desarrollo de criterios de diseño particulares era necesario (Wu & Chen, 2008).

1.4.3 Metodología YONAPAVE.

Con lo planteado el numeral 1.2.1 y teniendo en cuenta que se puede obtener el módulo de la subrasante y la longitud característica del cuenco de deflexiones a partir de mediciones realizadas con el FWD, a partir de la solución del modelo de Hogg y comparando con los números estructurales obtenidos por modelaciones y retrocálculo Hoffman (2003) propone la siguiente ecuación para obtener el número estructural efectivo del pavimento existente:

$$SN_{eff} = 2 * \left(0,0182 * l_0 * \sqrt[3]{E_{sg}} \right) - 0,5$$

Si la capa asfáltica tiene más de 10 cm de espesor se recomienda realizar una corrección por temperatura debido a que esta formulación fue desarrollada en Israel para temperaturas de la capa asfáltica de 30°C. La corrección aplica para el rango entre 20 y 45 ° C.

$$\frac{SN_T}{SN_{30^\circ C}} = 1.33 - 0.011 * T$$

Donde:

SN_T : número estructural a una temperatura T

$SN_{30^\circ C}$:número estructural a una temperatura de 30° C.

T: temperatura en °C.

Cuando se están evaluando tramos viales (>1km) se propone utilizar el percentil 30 para los valores del módulo de la subrasante, en el caso de número estructural se recomienda utilizar un percentil entre 10 y 30, seleccionando los percentiles más bajos para los proyectos más importantes. Para los demás cálculos se sigue el procedimiento AASHTO descrito en el numeral 1.4.2 (Hoffman, 2003).

2. Metodología

Este trabajo está conformado por cuatro etapas; primero la recopilación de experiencias y resultados en la medición de deflexiones en la ciudad de Bogotá utilizando el FWD; en la segunda etapa se efectuó el trabajo de campo haciendo ensayos de deflectometría en diferentes tramos viales de la localidad de Teusaquillo; en la tercera etapa se realizaron modelaciones numéricas utilizando el método de los elementos finitos y en la última etapa se realizaron análisis estadísticos para la obtención de funciones multivariables.

- Recopilación de información

Teniendo en cuenta que en la Universidad Nacional de Colombia se han realizado diferentes investigaciones utilizando el FWD y que se tiene información no solo de las deflexiones medidas sino también caracterizaciones de los materiales utilizando ensayos de laboratorio, se construyó una base de datos que permitió ampliar el alcance de la presente investigación a toda la ciudad.

- Campaña experimental.

En la realización de esta investigación se seleccionaron 9 tramos con una longitud total de aproximadamente 2400 m. Estos tramos se dividieron en tres categorías bueno, regular y malo de acuerdo al estado del pavimento. Para la clasificación se realizó una inspección visual y se consideró el porcentaje de área superficial con daños. En total se realizaron 150 mediciones utilizando el equipo FWD. Todos los tramos se localizaron en la localidad de Teusaquillo.

- Modelación numérica.

La modelación se realizó como un sistema 2D, elástico, isotrópico y axisimétrico. Esta fue desarrollada en el software ABAQUS Student Edition 6.12. La carga dinámica aplicada se simuló como una presión distribuida en una placa de 15 cm de radio. La variación de la carga en el tiempo fue tomada de los resultados obtenidos en las mediciones de Velásquez (2006).

- Análisis estadísticos.

A partir de las modelaciones realizadas y de los datos medidos en campo, se utilizó una regresión lineal multivariable donde se incluyeron las funciones F y T para evaluar la significancia de las variables involucradas en los análisis.

2.1 Recopilación de información

Teniendo en cuenta que estudios previos realizados en la Universidad Nacional de Colombia cuenta con el equipo de FWD y que se han realizado investigaciones previas utilizando el mismo para caracterizar estructuras de pavimentos en la ciudad. Se debe resaltar que los tramos T-1 a T-7 fueron recopilados de los siguientes estudios:

- Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio (Leal, 2010).

Este estudio cuyo principal objetivo fue determinar los factores de ajuste que relacionan el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el obtenido a partir de ensayos de laboratorio, se evaluaron dos tramos con una longitud total de 600 m ubicados en la calle 170 con autopista, donde se realizaron en total 8 pruebas de deflectometría utilizando el FWD JILS-20.

Además de las pruebas de deflectometría se realizaron ensayos de caracterización mecánica a los materiales de la estructura, determinando valores de módulos resilientes para la subrasante y las capas granulares. También se obtuvieron módulos dinámicos para los dos tipos de mezcla asfálticas estudiadas.

- Evaluación de estructuras de pavimento flexible usando técnicas no destructivas utilizando el deflectómetro de impacto o FWD (falling weight deflectometer) (Gutiérrez, 2010)

Esta investigación evaluó la capacidad estructural de pavimentos nuevos en la ciudad de Bogotá, en términos del número estructural aplicando la metodología AASHTO y el retrocálculo a partir de mediciones con el FWD.

Para la selección de los tramos de este estudio, se buscó que tuvieran una longitud mínima de 200 m, que fueran tramos nuevos y que estuvieran ubicados en vías arteriales de Bogotá.

Con el fin de evaluar los materiales utilizados en la construcción se realizaron ensayos de laboratorio de módulo dinámico y módulo resiliente.

2.2 Trabajo de campo

Se realizaron ensayos no destructivos con el equipo FWD. Los ensayos de deflectometría se realizaron teniendo en cuenta las normas ASTM D 4694 y INV-E-798 -07 y utilizando un equipo marca JILS (Figura 2-1) que cuenta con 8 geófonos cuyas ubicaciones se resumen en la Tabla 2-1 y en la Figura 2-2 se muestra un detalle de los mismos.



Figura 2-1. Equipo FWD marca JILS.

Tabla 2-1. Ubicación de los geófonos en el equipo utilizado.

| Posición de Geófonos | | | | | | | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Unidad | d ₀ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d ₇ |
| (cm) | 0,0 | 30,0 | 60,0 | 90,0 | 120,0 | 150,0 | 180,0 |



Figura 2-2. Geófonos del equipo FWD.

Para la clasificación de los tramos se seleccionaron tres categorías de condición estructural: bueno, regular y malo. Se realizó una inspección visual y una estimación del porcentaje del área afectada por daños como fisuras y baches. Se consideraron tramos en buen estado los que no presentaban ningún tipo de daños, regulares aquellos donde los daños ocupaban un área menor al 30 % y para áreas de afectación mayores al 30% se consideraron como tramos malos. Los tramos corresponden a vías locales de bajos volúmenes de tráfico, en total se escogieron 9 tramos con longitudes entre 40 y 600 m. En la Tabla 2-2 se presentan las características de los tramos seleccionados.

En la Figura 2-3, se presentan algunos ejemplos de tramos para las tres categorías de clasificación.

Tabla 2-2. Tramos evaluados utilizando deflectometría.

| Tipo de Tramo | Tramo | Longitud | Espaciamiento | Puntos | Dirección |
|----------------|-------|----------|---------------|--------|---|
| Bueno | B-1 | 600 | 1/20m | 30 | Transversal 59A entre la calle 63 y la carrera 60 |
| | B-2 | 500 | 1/20m | 25 | Calle 59 entre carrera 50 y transversal 59 A |
| Regular | R-1 | 240 | 1/20m | 12 | Carrera 56 A entre Calle 59 y Calle 63 |
| | R-2 | 240 | 1/20m | 12 | Carrera 56 entre Calle 59 y Calle 63 |
| | R-3 | 200 | 1/20m | 10 | Calle 51 entre carrera 56 y carrera 53 |
| Malo | M-1 | 140 | 1/10m | 14 | Calle 25 f entre carrera 33 y carrera 34 a |
| | M-2 | 150 | 1/10m | 15 | Calle 25 d entre carrera 37 y carrera 34 a |
| | M-3 | 70 | 1/10m | 7 | Calle 31 entre carrera 33 y carrera 33 a |
| | M-4 | 210 | 1/10m | 21 | Carrera 52 entre calle 44 f y calle 53 |

Figura 2-3. Niveles de daño para la clasificación de los tramos evaluados.



Las medidas de deflexión deben ser ajustadas para tener en cuenta las variaciones leves que se producen al momento de aplicar la carga, por lo que se utiliza una carga patrón de 9000 lbs. La corrección realizada es línea, l ya que el área del plato de aplicación de carga no cambia durante el ensayo. Por lo que la variación en los esfuerzos del pavimento depende solamente de la variación en la carga. La corrección se presenta a continuación:

$$FCC = Q_{norm.}/Q_i$$

Dónde:

FCC: Factor de corrección por carga.

$Q_{norm.}$: Carga normalizada (libras) = 9000 lb

Q_i : Carga aplicada en el ensayo i.

Además teniendo en cuenta la naturaleza viscoelástica de los materiales que conforman las capas de superficiales de los pavimentos flexibles, los cambios en la temperatura tienen un efecto en las características mecánicas de estos. Es por esto que se hace necesario contemplar el efecto de las variaciones de temperatura durante las campañas de medición con el FWD.

En 1993 la guía AASHTO propuso estandarizar las deflexiones a una temperatura de 20 °C (68° F) y plantea ecuaciones empíricas que dependen del espesor de la carpeta asfáltica que se presentan a continuación y en la Figura 2-4 :

$$FCT_{2"} = -0,0039*T + 1,266$$

$$FCT_{4"} = -0,0068*T + 1,468$$

$$FCT_{8"} = -0,0093*T + 1,626$$

$$FCT_{12"} = -0,0112*T + 1,748$$

Dónde:

FCT: Factor de corrección por temperatura.

T: Es la temperatura de realización del ensayo (°F).

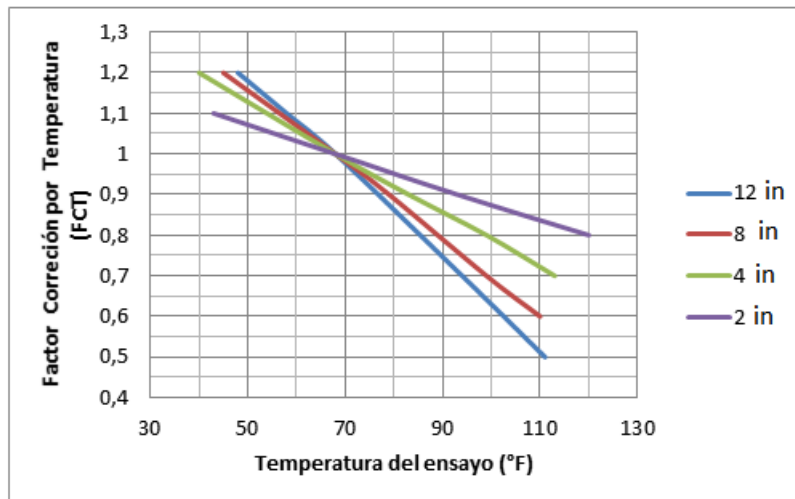


Figura 2-4. Corrección por temperatura.

Tomado de Gutiérrez, (2010)

En el caso en que se presenten espesores de carpeta asfáltica diferentes a los ilustrados de 2, 4, 8 y 12 pulgadas, se deberá realizar la correspondiente interpolación.

Kim et al (1995) encontraron que utilizar la temperatura promedio propuesta por la AASHTO como la temperatura efectiva de las capas asfálticas, produce resultados inadecuados particularmente por que no se pueden incluir las variaciones entre los gradientes de temperatura en ciclos de calentamiento y enfriamiento. También Kim determinó que los factores de corrección tienden a sobrecorregir las deflexiones para temperaturas altas.

Una vez se calculan los factores de corrección por carga (FCC) y por temperatura (FCT), se obtienen las deflexiones corregidas como resultado del producto de las deflexiones iniciales y los factores de corrección.

$$d_{\text{corr.}} = d_{\text{medida}} * \text{FCC} * \text{FCT}$$

Donde:

$d_{\text{corr.}}$: Deflexión corregida por carga y temperatura (pulgadas).

d_{medida} : Deflexión medida con el equipo FWD (pulgadas).

FCC: Factor de corrección por carga.

FCT: Factor de corrección por temperatura.

2.3 Características de las estructuras evaluadas

A continuación se presenta la tabla resumen con las características de los 16 tramos evaluados en esta investigación, se debe resaltar que los tramos del T-1 al T-7 corresponden a tramos recopilados de las investigaciones anteriores, todo estos tramos se entraban en condición buena:

Tabla 2-3. Tramos evaluados en la investigación.

| Código | Localización | Material | Espesores de Estructura, D_i (cm) | Módulo del material ,Esr (MPa) |
|---------------|------------------------------------|-----------------|--|---------------------------------------|
| T-1 | Ak 9 entre calles 165 y 170 | MD-12 | 5 | 6200 |
| | | MD-20 | 11 | 3700 |
| | | BGEA-A | 25 | 5700 |
| | | SBG-A | 36 | 133 |
| | | Subrasante | - | 78,6 |
| T-2 | Ak 9 entre calles 165 y 170 | MD-12 | 5 | 6200 |
| | | MD-20 | 11 | 3700 |
| | | BGEA-A | 25 | 5700 |
| | | SBG-A | 36 | 133 |
| | | Subrasante | - | 93,46 |
| T-3 | Ak 9 entre calles 153 y 159 | MD-12 | 5 | 6200 |
| | | MD-20 | 10 | 5100 |
| | | BGEA-A | 25 | 6500 |
| | | SBG-A | 38 | 133 |
| | | Subrasante | - | 98,25 |
| T-4 | Ak 9 entre calles 153 y 159 | MD-12 | 5 | 6200 |
| | | MD-20 | 10 | 5100 |
| | | BGEA-A | 25 | 6500 |

| | | | | |
|-----|---|-------------------|----|-------|
| | | SBG-A | 38 | 133 |
| | | Subrasante | - | 79 |
| T-5 | AC 170 entre carreras 72 y 77 | MD-12 | 5 | 6200 |
| | | MD-20 | 16 | 4750 |
| | | BG-A | 20 | 273 |
| | | SBG-A | 30 | 133 |
| | | Subrasante | - | 68,98 |
| T-6 | AC 170 entre carreras 72 y 77 | MD-12 | 5 | 6200 |
| | | MD-20 | 16 | 4750 |
| | | BG-A | 20 | 273 |
| | | SBG-A | 30 | 133 |
| | | Subrasante | - | 93,5 |
| T-7 | AC 170 con autopista norte | Carpeta asfáltica | 24 | 4600 |
| | | Capa granular | 30 | 50,19 |
| | | Subrasante | - | 76,9 |
| B1 | Transversal 59A entre la calle 63 y la carrera 60 | MD-12 | 11 | 6200 |
| | | BG | 30 | 273 |
| | | SBG | 30 | 133 |
| | | Subrasante | - | 32,8 |
| B2 | Calle 59 entre carrera 50 y transversal 59 A | MD-12 | 8 | 6200 |
| | | BG | 20 | 273 |
| | | SBG | 30 | 133 |
| | | Subrasante | - | 27 |
| R-1 | Carrera 56 A entre Calle 59 y Calle 63 | Rodadura | 8 | 1200 |
| | | Granular | 50 | 79,4 |
| | | Subrasante | - | 35,9 |
| R-2 | Carrera 56 entre Calle 59 y Calle 63 | Rodadura | 8 | 1025 |

| | | | | |
|-----|--|------------|----|-------|
| | | Granular | 50 | 100,4 |
| | | Subrasante | - | 44,8 |
| R-3 | Calle 51 entre carrera 56 y carrera 53 | Rodadura | 8 | 950 |
| | | Granular | 50 | 76 |
| | | Subrasante | - | 56 |
| M-1 | Calle 25 f entre carrera 33 y carrera 34 a | Rodadura | 10 | 400 |
| | | Granular | 40 | 40 |
| | | Subrasante | - | 15 |
| M-2 | Calle 25 d entre carrera 37 y carrera 34 a | Rodadura | 7 | 350 |
| | | Granular | 40 | 35 |
| | | Subrasante | - | 14 |
| M-3 | Calle 31 entre carrera 33 y carrera 33 a | Rodadura | 7 | 100 |
| | | Granular | 50 | 50 |
| | | Subrasante | - | 9 |
| M-4 | Carrera 52 entre calle 44 f y calle 53 | Rodadura | 11 | 500 |
| | | Granular | 60 | 83 |
| | | Subrasante | - | 25,5 |

2.4 Modelación numérica

Para la modelación numérica de las estructuras evaluadas en este estudio se decidió utilizar el software ABAQUS. Este paquete comercial para el análisis utilizando elementos finitos ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de estructuras de pavimentos.

Las principales ventajas que tiene ABAQUS para solucionar problemas geotécnicos y particularmente los relacionados con pavimentos (Kim, 2000) son :

- Modelos de materiales lineales elásticos y no-lineales elásticos, visco-elásticos y elasto-plásticos.
- Modelaciones 2D y 3D.

- Simulaciones de cargas estáticas, dinámicas armónicas y dinámicas transitorias.
- Se puede incluir en la modelación la fricción entre capas.
- Modelación de la propagación de fisuras.
- Análisis de gradientes térmicos y la posibilidad de modelar la influencia de estos en el comportamiento mecánico de los materiales.
- Posibilidad de crear modelos constitutivos particulares.

Algunas de las investigaciones donde este programa ha sido utilizado se resumen a continuación:

En 1994 Mallela & George plantearon un modelo dinámico 3D, en donde representaron la influencia de la carga dinámica, el desplazamiento de esta carga a través del pavimento y el tipo de malla y su refinamiento. Este modelo fue validado utilizando tramos reales para comparar las deflexiones medidas contra las predichas por el mismo, obteniendo que el desfase entre las deflexiones no excede el 15%. También se encontró que al utilizar una carga estática se tienen deflexiones predichas que duplican las medidas en campo, por lo que los métodos de retrocálculo que suponen cargas estáticas tenderán a predecir de manera errónea los módulos de las capas. Lo anterior demuestra la necesidad de caracterizar de manera correcta las cargas para que reflejen no solo máxima magnitud sino su variación con el tiempo. En la Figura 2-5, se pueden observar las variaciones causadas en la predicción de las deflexiones debido al uso de suposiciones de carga estática.

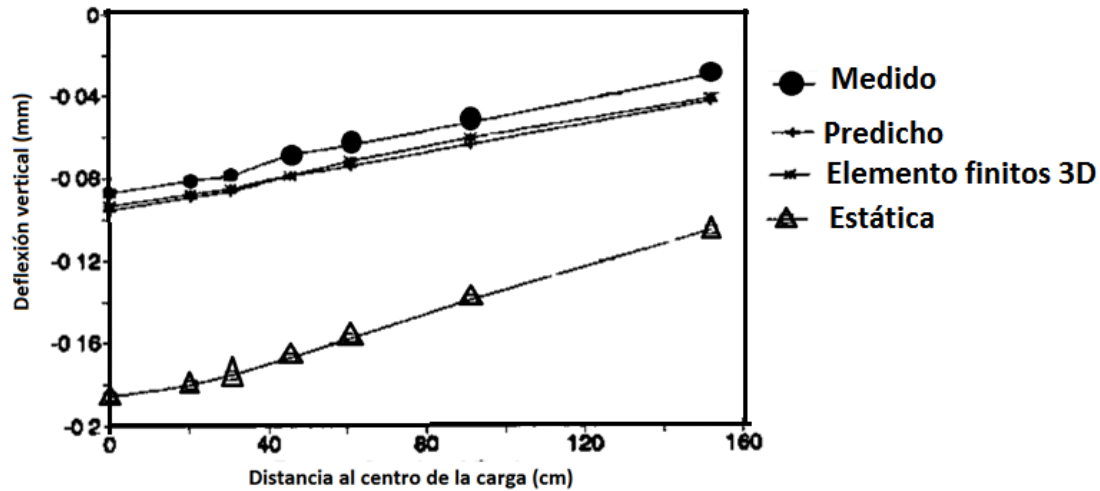


Figura 2-5. Variaciones entre las deflexiones predichas por los diferentes modelos y las medidas in situ.

Tomado de Mallela & George, (1994).

Chen en 1995 realizó un estudio amplio comparando ABAQUS con otros softwares de modelación encontrando que los resultados son comparables con los demás paquetes disponibles.

Kim (2000) planteó un modelo de elementos finitos elástico lineal, donde simuló el ensayo estándar de FWD con una carga de 9000 libras aplicadas en un plato de carga de radio de 15 cm, con un tiempo de contacto cercano a los 30 ms. Las deflexiones fueron registradas a las mismas distancias en que el FWD tiene ubicados los geofonos. Para modelar las fronteras horizontal y vertical se utilizaron elementos infinitos.

Kim encontró que un modelo elástico de los materiales del pavimento puede considerarse suficientemente preciso, lo anterior teniendo en cuenta que al utilizar un modelo como el Drucker-Prager para representar la no linealidad del comportamiento mecánico, solo generó cambios en las deflexiones del orden del 5% como se presenta en la Figura 2-6.

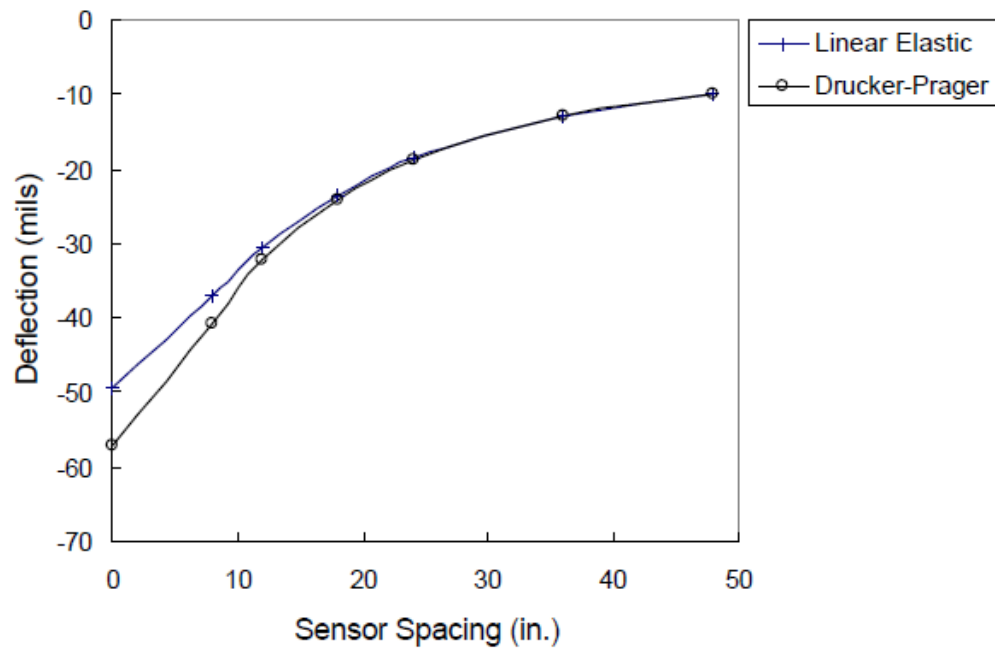


Figura 2-6. Variación en la deflexión causada por el uso de modelos constitutivos no lineales. Tomado de Kim, (2000)

Además en esta investigación se compararon los resultados de las modelaciones con un segmento de pavimento patrón, de este ejercicio se obtuvo que un modelo 2D puede tener resultados significativos y que la generación de un modelo 3D no garantiza una mejor aproximación en la predicción de los datos medidos en campo. Esto se puede observar en la Figura 2-7.

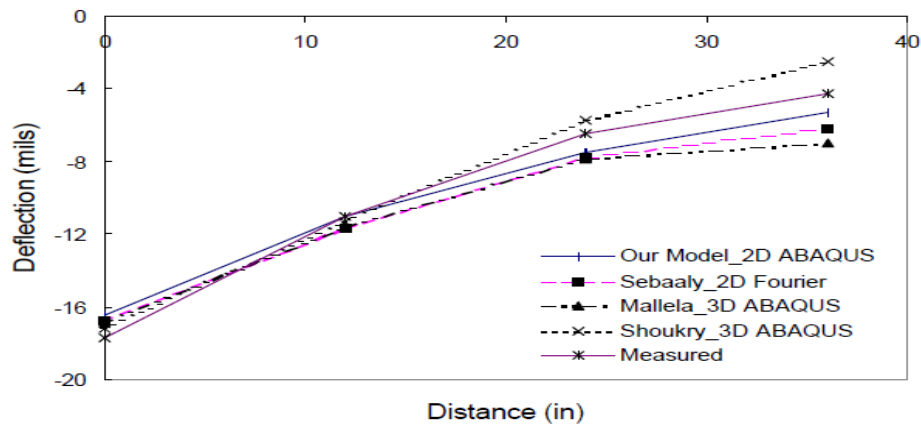


Figura 2-7. Influencia del tipo de modelación en la capacidad de predicción de las deflexiones. Tomado de Kim, (2000)

En el 2010 Hadidi & Gucunski, utilizaron un modelo 2D lineal y axisimétrico generado en ABAQUS, con el objetivo de evaluar el uso de un enfoque probabilístico en los procedimientos de retrocálculo, particularmente se incluyeron en el análisis las incertidumbres generadas por los análisis lineales estáticos de los métodos tradicionales utilizados en el retrocálculo. Encontrado que es necesario incluir en las modelaciones la naturaleza dinámica de la carga impuesta por el FWD al pavimento.

Teniendo en cuenta las investigaciones anteriormente reseñadas, la modelación realizada para esta investigación cumple con los siguientes criterios:

- El modelo será lineal, elástico, isotrópico y axisimétrico. A pesar de estas simplificaciones y de acuerdo con los resultados de Kim (2000), este tipo de modelo puede arrojar resultados lo suficientemente precisos.
- La carga del FWD será simulada en detalle teniendo en cuenta su naturaleza dinámica y transitoria, la distribución de carga utilizada corresponde a la medida por Velásquez (2008) para un FWD marca Jils, como se presenta en la Figura 2-8.

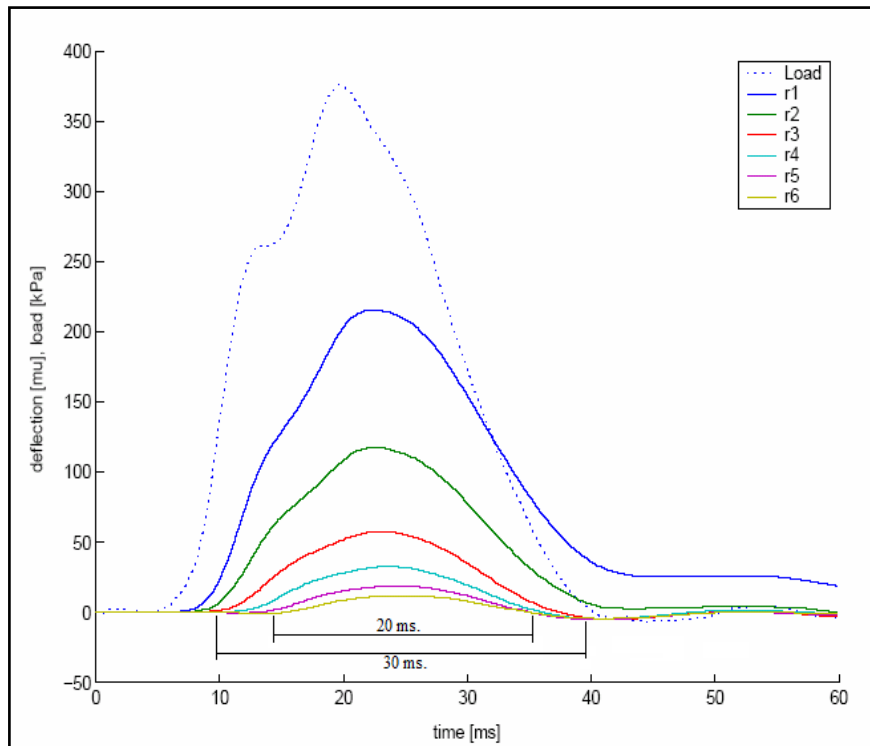


Figura 2-8. Influencia del tipo de modelación en la capacidad de predicción de las deflexiones.

Tomado de Velasquez, (2008)

- La distribución de la malla de elementos finitos fue limitada a 1000 elementos (Limite ABAQUS Student Version) y se concentraron los elementos más pequeños en la zona de carga y en la zona de mayor influencia del cuenco de deflexiones, lo anterior de acuerdo a lo recomendado por Helwany (2007). En la Figura 2-9 se presenta un mallado típico de los modelos realizados.
- El modelo tiene 20 m de profundidad y 20 m de ancho con el objetivo de evitar efectos de frontera en los resultados.
- En la Figura 2-10 se presenta una ampliación de la zona más cercana a la aplicación de la carga donde se utilizó la mayor densidad de elementos.
- De acuerdo a lo recomendado por Hadidi & Gucunski (2010) la tasa de amortiguamiento de Rayleigh se tomó con un valor de 0,001.
- De acuerdo a lo reportado por Tam (1987) se utilizaron en la modelaciones valores de la relación de Poisson de 0,3 para todas las capas de pavimento a excepción de la subrasante donde se asignó un valor de 0,4.
- En el eje de simetría se limitó el desplazamiento y el giro en todas las direcciones, mientras que en la frontera vertical se limitó el movimiento en X y en la frontera horizontal se restringieron los movimientos en X y Y.

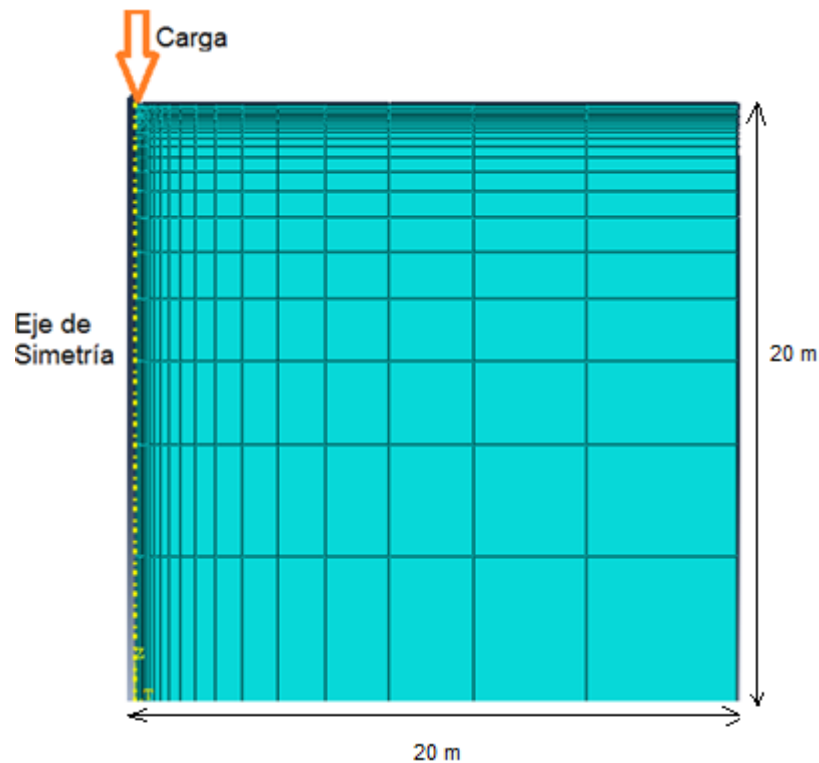


Figura 2-9. Malla de elementos finitos típica.

- La aplicación de la carga se hizo en 20 etapas, lo que permitió obtener resultados cada 2 ms.

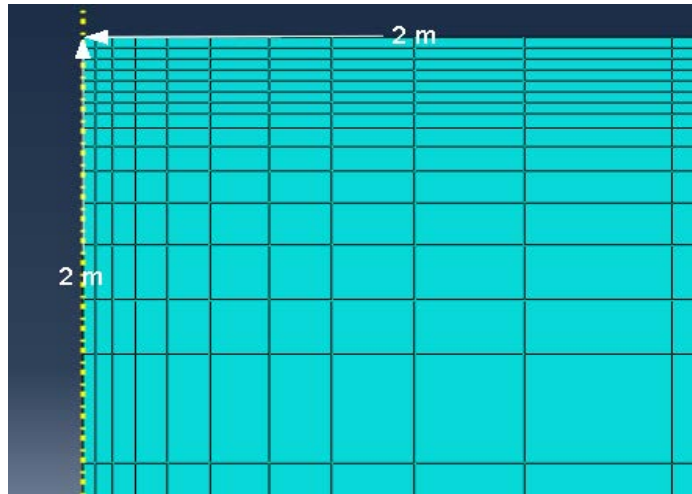


Figura 2-10. Zona de aplicación de la carga.

2.5 Análisis estadísticos

Debido a que el cuenco de deflexiones es la respuesta del sistema estructura de pavimento-subrasante como un todo, se puede suponer que la magnitud de estas deflexiones depende de una serie de variables independientes entre sí entre las cuales se encuentran las características mecánicas y geométricas (espesores) de las capas que conforman el pavimento. Es necesario correlacionar de forma estadística la influencia de cada uno de estas variables con los modelos planteados.

Con el objetivo de correlacionar la deflexión medida con la modelada, se utilizó un análisis de regresión lineal múltiple. Este modelo de regresión puede ser definido por la siguiente ecuación:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_n * X_n$$

En este modelo la variable Y depende de n variables independientes X afectadas por los coeficientes b. Este tipo de regresiones permite evaluar la importancia de diferentes variables en un fenómeno complejo.

Para la implementación de estas regresiones se calcularon los coeficientes de cada variable y una serie de estadísticos para determinar la calidad de la regresión. También se

obtuvieron los residuos de la regresión. A continuación se presentan los parámetros evaluados:

2.5.1 Gráficos de residuales

Esta herramienta permite valorar la existencia de una relación entre los residuales y la variable independiente x . Si esta relación existe implica que el modelo utilizado no es adecuado para describir el fenómeno que se está evaluando ya que se estaría violando la hipótesis de independencia entre las variables. En un modelo lineal múltiple los valores de residuales deberán formar una banda relativamente horizontal y aleatoria como se presenta a continuación:

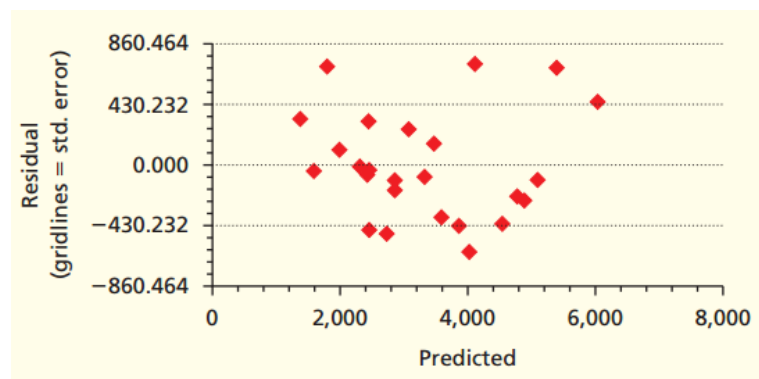


Figura 2-11. Gráfica típica de residuos para un modelo lineal múltiple.

Tomado de Bowerman, et al., (2011)

2.5.2 Coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado)

Este coeficiente que varía entre 0 y 1, tiene una interpretación similar a la del coeficiente de determinación (entre más cercano a uno mejor la correlación), pero es más conservador ya que siempre es menor que R^2 . Lo anterior se debe que este coeficiente solo aumenta de valor cuando las nuevas variables son significativas en el modelo mientras que R^2 siempre aumenta con nuevas variables sin importar su aporte al ajuste de la correlación.

2.5.3 Valor F

Para evaluar la utilidad de la correlación planteada se utiliza una distribución F que permite probar o descartar la siguiente hipótesis:

$$H_0 : b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$$

En caso de ser probada la hipótesis cero se tiene que ninguno de los coeficientes y por lo tanto las variables están linealmente relacionadas con el problema evaluado, en caso contrario al menos una de las variables está relacionada, se debe resaltar que esta prueba no permite determinar cuáles de las variables son significativas o no en el modelo. Si el valor de F calculado es mayor a 4 en casi todos los casos se considera que el modelo es significativo. Excel también calcula la probabilidad asociada a ese valor de F que puede entenderse como la probabilidad de que un modelo con un R^2 determinado sea producto del azar. (Carvalho, 2014).

2.5.4 Valor T

La prueba T permite evaluar la significación individual de cada variable involucrada en el modelo de regresión. Por lo que se prueba o descarta como hipótesis la posibilidad de que el coeficiente b evaluado sea cero:

$$H_0 : b_n = 0$$

En los casos donde la probabilidad asociada al valor de T calculado para cada variable sea mayor a la significancia se puede descartar esta variable del análisis. Todos los análisis estadísticos realizados están asociados a un nivel de confianza del 95%.

3. Análisis de resultados

De las mediciones de campo se obtuvieron cuencos de deflexión como los que se presentan en la Figura 3-1, las demás mediciones se presentan en los anexos. A todos los cuencos de deflexión medidos se les aplicaron las correcciones por carga y temperatura descritas en la metodología.

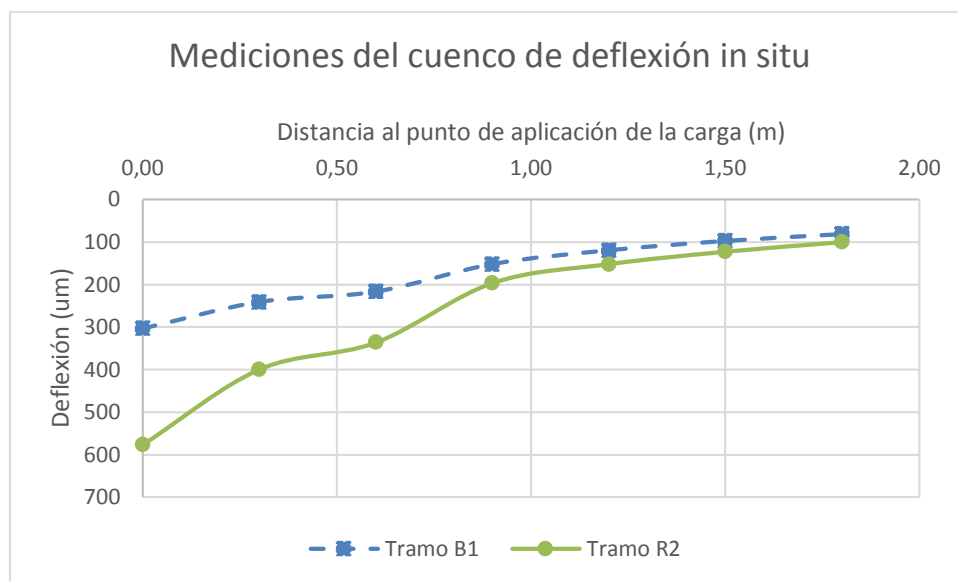


Figura 3-1. Mediciones in situ sin corregir del cuenco de deflexiones.

3.1 Análisis de los cuencos de deflexión medidos.

De todos los cuencos de deflexión medidos en campo y recopilados de la literatura se obtuvo información de los parámetros geométricos (SCI, BDI, BCI) y de la subrasante aplicando la metodología YONAPAVE para la estimación del módulo. Un ejemplo de los cálculos realizados se encuentra en los anexos.

3.1.1 Índice de curvatura en la superficie (SCI)

Para el SCI existe una marcada diferencia entre los pavimentos para vías arteriales y aquellos para vías locales (ver Figura 3-2), aunque los materiales usados son los mismos, los espesores de capa y el tipo de pavimento condicionan la respuesta del cuenco de deflexiones. Por lo tanto se hace necesario discriminar los pavimentos y agruparlos de acuerdo su estado y al tipo de tráfico de diseño. Por lo que se puede afirmar que:

- Cuando se separan los pavimentos nuevos para vías arteriales se puede observar las limitaciones de los rangos propuestos por Horak (2008). Estos fueron propuestos para vías ya existentes y no pavimentos nuevos y aunque son indicador importante del estado del pavimento, estos factores deben ajustarse para la recepción de obra nueva.
- Para vías arteriales los datos indican que $100 \mu\text{m}$ es un valor adecuado de SCI para detectar problemas en las carpetas asfálticas, lo anterior teniendo en cuenta que solo el tramo B-2 sobrepasa este valor y es en este tramo que se han presentado fallas en las capas asfálticas.

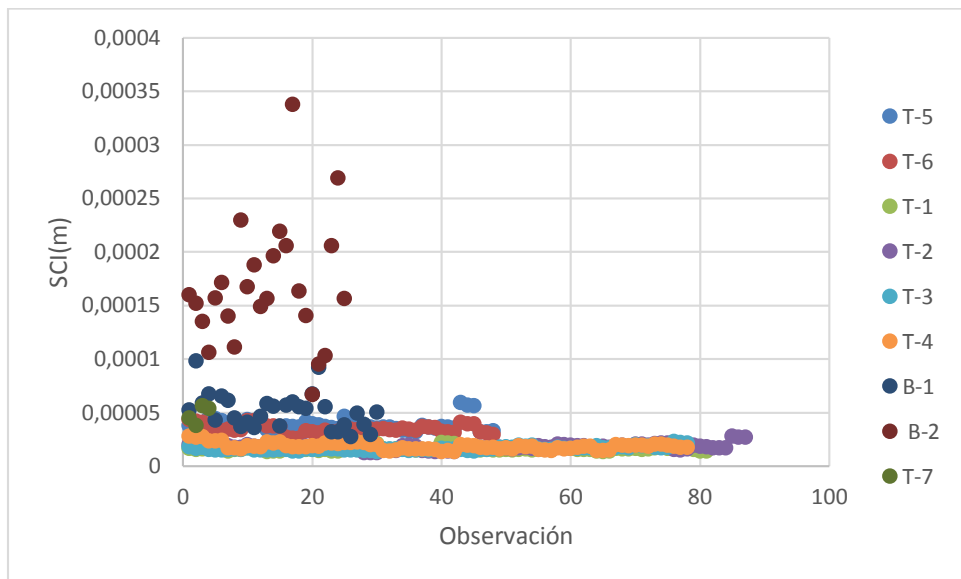


Figura 3-2. Valores de SCI medidos para pavimentos nuevos y en buen estado.

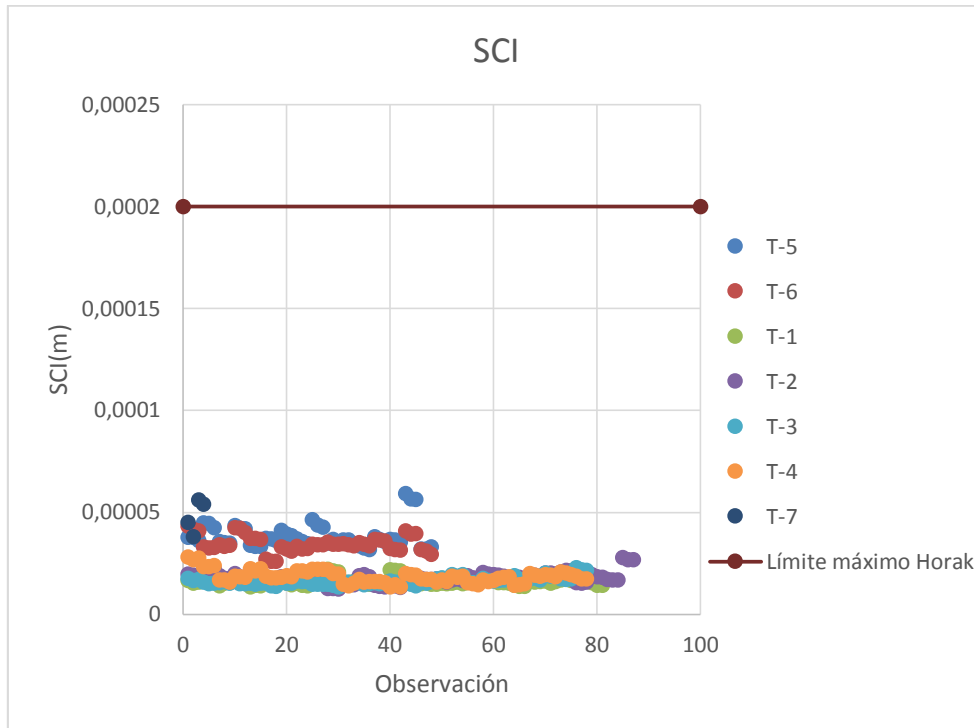


Figura 3-3. Valores de SCI medidos para pavimentos nuevos en vías arteriales vs rangos propuestos por Horak (2008).

c) En el caso de los pavimentos nuevos de vías locales los rangos propuestos por Horak parecen ser más adecuados para predecir problemas estructurales en las capas de la estructura.

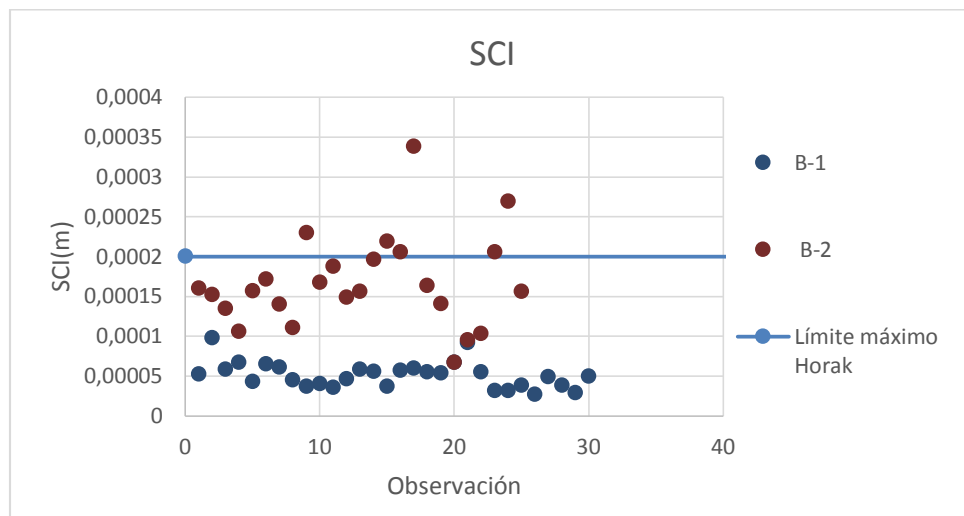


Figura 3-4. Valores de SCI medidos para pavimentos nuevos en vías locales vs rangos propuestos por Horak (2008).

- d) En el tramo B-2 se encontraron zonas donde el SCI supera los valores máximos planteados como límite para los pavimentos en buen estado. Teniendo en cuenta que las mediciones fueron realizadas en noviembre del 2012. Se pudo evaluar la capacidad de predicción de este parámetro para el comportamiento de la carpeta asfáltica. En las Figura 3-5 y Figura 3-6 se observan las reparaciones que fueron realizadas en la carpeta asfáltica. Se evidencia que estas reparaciones son puntuales lo que coincide con los resultados presentados en la Figura 3-4.



Figura 3-5. Reparaciones realizadas en el tramo B2 desde la toma de mediciones.



Figura 3-6. Sellado de juntas alrededor de las reparaciones del tramo B2.

3.1.2 Índice de curvatura en la base (BDI)

En cuanto al BDI se tienen resultados similares a los evidenciados para el SCI, y como se puede observar en la Figura 3-7 que para pavimentos nuevos un valor límite de 60 μm puede ser adecuado para detectar zonas donde las capas de cuerpo del pavimento pueden presentar deficiencias estructurales.

En el caso de pavimentos de vías locales se encontró que las capas granulares, cumplen en general con los rangos planteados y en general en las zonas donde se detectaron daños en estos tramos no parecen estar relacionados con las capas de cuerpo. (Figura 3-8).

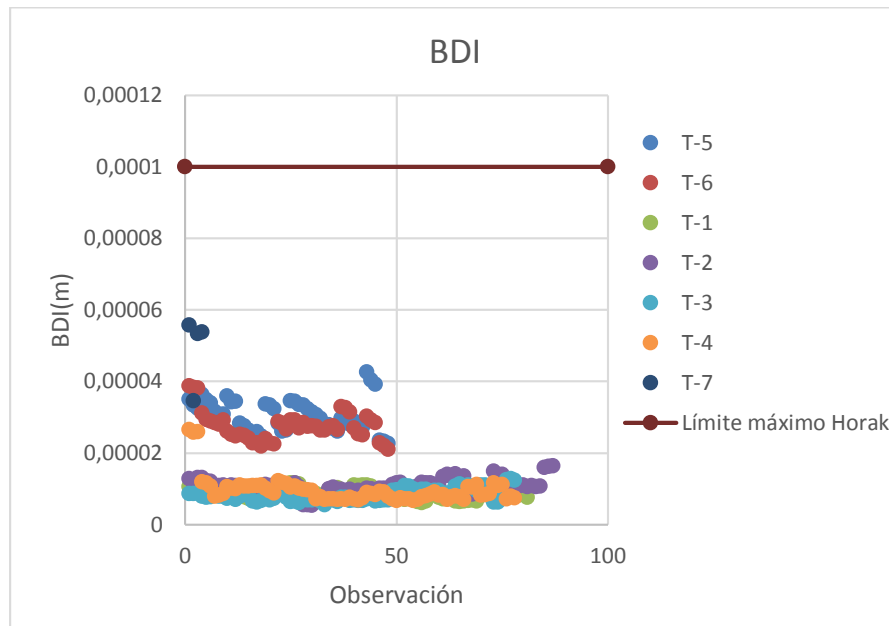


Figura 3-7. Valores de BDI para pavimentos nuevos en vías arteriales.

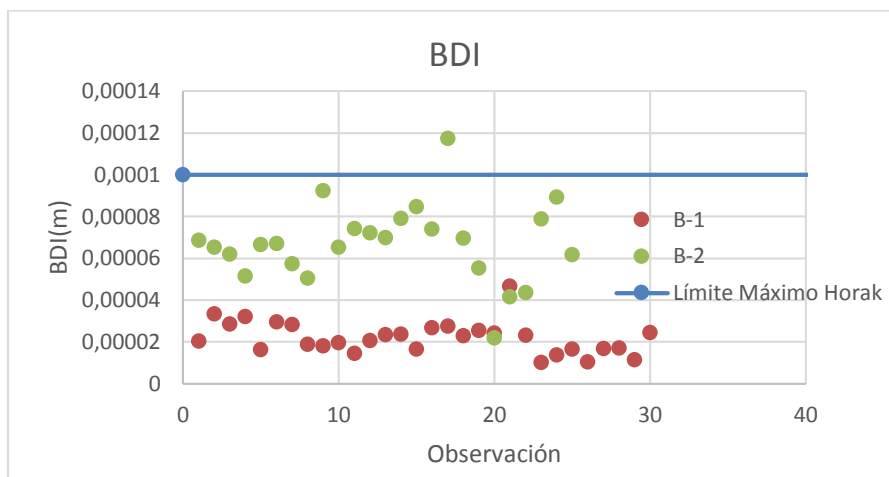


Figura 3-8. Valores de BDI para pavimentos nuevos en vías locales.

3.1.3 Índice de curvatura en la base (BCI)

En el momento de evaluar el BCI en los tramos considerados buenos en la campaña de mediciones en campo (tramo B-1 y B-2), se detectó que en ambos se excedían los límites para este parámetro siendo pavimentos nuevos como se muestra en la Figura 3-9. Pasados cerca de 18 meses desde las mediciones se evidencian daños en los pavimentos asociados a deformaciones excesivas en la subrasante producto de succión de árboles aledaños a la estructura y la presencia de sumideros que posiblemente intensificaron el fenómeno. Se debe resaltar que el tramo B2 es el que ha presentado mayores daños lo anterior está relacionado con una mayor deflexión en la zona 3 del cuenco. Los daños se presentan en las Figura 3-10 y Figura 3-11.

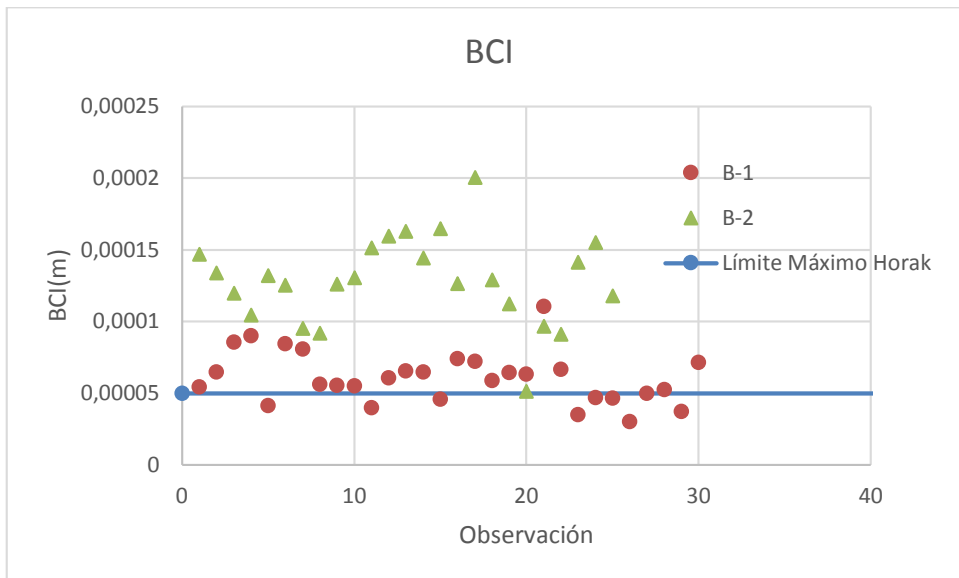


Figura 3-9. Valores de BCI para tramos B-1 y B-2.



Figura 3-10. Hundimientos asociados a succión.



Figura 3-11. Fisuras debido a los hundimientos.

3.2 Modelación de elementos finitos para tramos buenos en condición buena (T-1 a T-7 y B-1 a B-2)

Debido a la mayor información existente respecto a los espesores y las características mecánicas de los materiales en las capas del pavimento se procedió a modelar las nueve estructuras típicas para los tramos buenos,

La modelación de las estructuras permitió evaluar la capacidad de un modelo de elementos finitos para predecir el comportamiento de las estructuras y también se puede evaluar el efecto de la estimación del módulo de la subrasante utilizando el método de YONAPAVE. La primera hipótesis que se evalúa en esta modelación es la influencia de la carga utilizada para simular el efecto del tráfico. Si la carga es dinámica se obtienen variaciones del orden de hasta el 13 % entre el cuenco de deflexiones modelado y el cuenco medido en campo. Cuando la carga modelada tiene la misma magnitud máxima pero es estática la variación en el modelo alcanza el 35%. De lo anterior se confirma las experiencias de otros autores sobre la necesidad de caracterizar la carga de manera precisa y también muestra la ineficacia de los métodos no destructivos estáticos (viga Benkelman) para evaluar el comportamiento del pavimento. En la Figura 3-12 se presenta la comparación del cuenco de deflexiones para los dos casos de carga. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Mallela & George (1994).

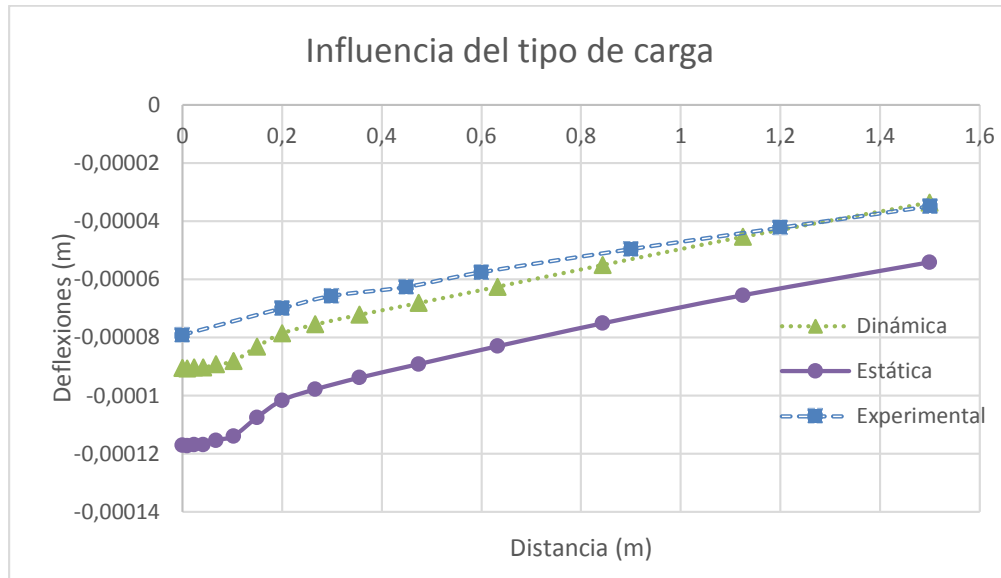


Figura 3-12. Influencia del tipo de carga en la deflexión de la estructura T-1.

Para determinar el error en la estimación de los módulos que causaría el uso de una carga estática, se iteró en el modelo hasta obtener deformaciones similares a las medidas (variación < 5%) y se encontró que se necesitan módulos 44% superiores, lo anterior implica una sobreestimación de la vida útil y de la condición estructural del pavimento.

3.2.1 Ecuación de corrección.

En las modelaciones realizadas se obtuvieron diferencias promedio del 12% entre las deflexiones medidas y las simuladas, teniendo en cuenta lo anterior se planteó una ecuación de corrección basada en las características mecánicas y espesores de la estructura.

En la Tabla 3-1 se puede observar que los valores de coeficientes de determinación son altos para la corrección planteada y en la Tabla 3-2 se tiene que la probabilidad asociada al estadístico F indica que al menos una de las variables incluidas en el análisis es significativa.

Tabla 3-1.coeficientes de determinación para la corrección planteada.

| <i>Estadísticas de la regresión</i> | |
|--|------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0,98911876 |
| Coefficiente de determinación R ² | 0,97835592 |
| R ² ajustado | 0,9742611 |
| Error típico | 14,7965324 |
| Observaciones | 45 |

Tabla 3-2.Prueba F para la corrección.

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | |
|----------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------|---------------------------|
| | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Valor crítico de F</i> |
| Regresión | 7 | 366167,174 | 52309,596 | 238,924 | 8,4169E-29 |
| Residuos | 37 | 8100,68273 | 218,937 | - | - |
| Total | 44 | 374267,857 | - | - | - |

Aunque los anteriores estadísticos parecen indicar que se está ante una regresión significativa al evaluar el estadístico t y las probabilidades asociadas al mismo, se tiene que a excepción de la deflexión simulada todas las variables de la estructura de pavimento tienen probabilidades superiores al nivel de significancia y deben ser descartadas del análisis. (Ver Tabla 3-3).

En principio el anterior resultado pareciera ser contraevidente pero si se tiene en cuenta que las variables como el espesor y los módulos fueron definidas de manera estricta para las estructuras modeladas y que el error ocasionado por las variaciones de carga del equipo y los cambios de temperatura entre mediciones fue considerado, entonces las fuentes de error posibles están relacionadas a la simulación misma particularmente a la malla de utilizada, la condición 2D y la caracterización de los materiales como elásticos isotrópicos .

Tabla 3-3. Prueba T para la corrección.

| Variables | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad |
|---|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Intercepción | 62,044 | 43,026 | 1,442 | 0,158 |
| Deflexión simulada | 0,856 | 0,044 | 19,606 | 3,88E-21 |
| Distancia a la aplicación | 7,677 | 7,279 | 1,055 | 0,298 |
| Espesor capas granulares | -469,068 | 192,308 | -2,439 | 0,020 |
| Módulo ponderado del granular | 0,513 | 0,233 | 2,208 | 0,034 |
| Módulo de la subrasante | -0,136 | 0,187 | -0,726 | 0,472 |
| Espesor capas asfálticas | -234,267 | 91,753 | -2,553 | 0,015 |
| Modulo ponderado de las capas asfálticas. | 0,025 | 0,010 | 2,500 | 0,017 |

Una vez descartadas las variables irrelevantes para la corrección se obtiene una regresión lineal, que se presenta a continuación:

$$dc = d_{simulada} * 0,91433746 + 0,84938586$$

Con un R² ajustado de 0,97 y con residuos que aparentan ser aleatorios se puede calificar como una correlación muy buena. En la Figura 3-13 se presentan los residuos de esta correlación.

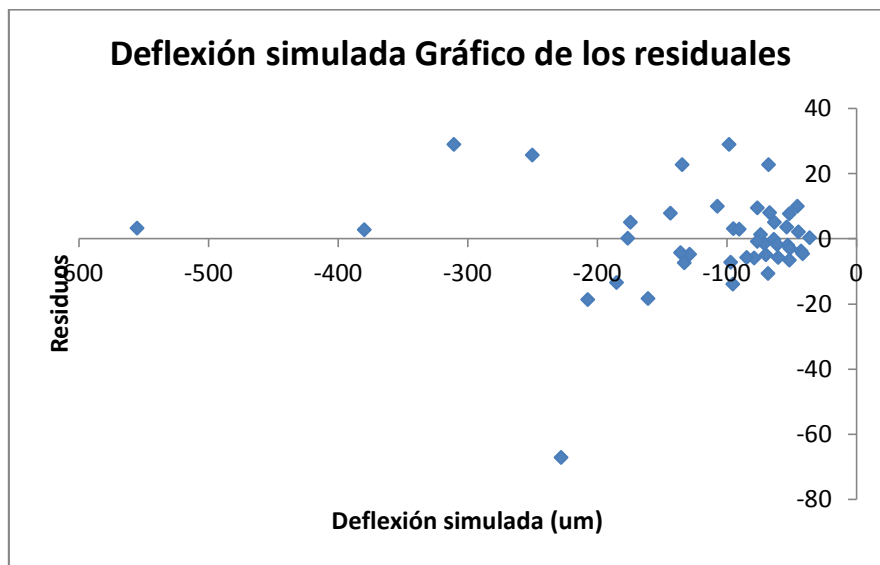


Figura 3-13. Residuales de la corrección propuesta.

La corrección obtenida fue aplicada a los resultados de las 9 estructuras modeladas obteniendo los siguientes ajustes:

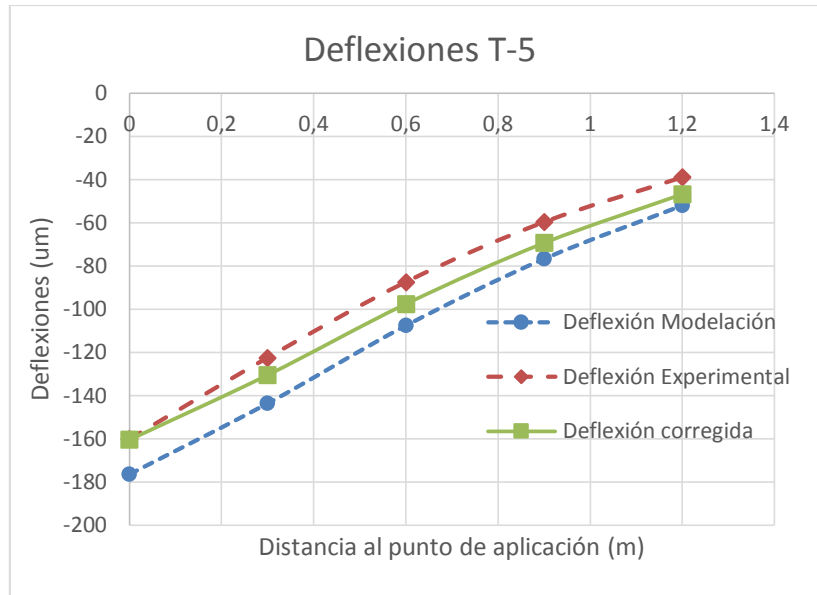


Figura 3-14. Corrección de las deflexiones T-5.

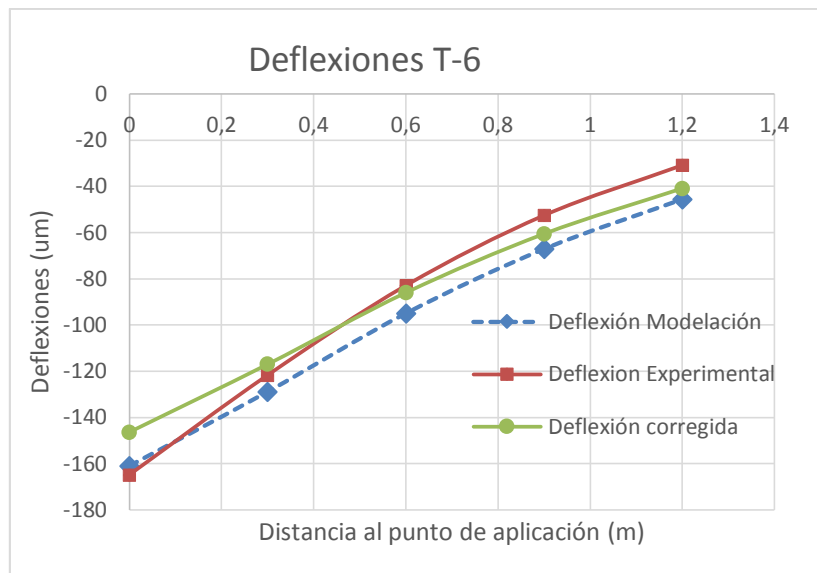


Figura 3-15. Corrección de las deflexiones T-6

De los resultados obtenidos se tiene que:

- a) Existe una mejor correlación cuando los pavimentos presentan un espesor de capas granulares menor al 60% del espesor total de la estructura. Lo anterior puede explicarse por la respuesta anisotrópica de estas capas y la sobre simplificación del modelo empleado para describir las mismas. Lo anterior se manifiesta el mejor ajuste que se puede observar de la Figura 3-16 a la Figura 3-19.

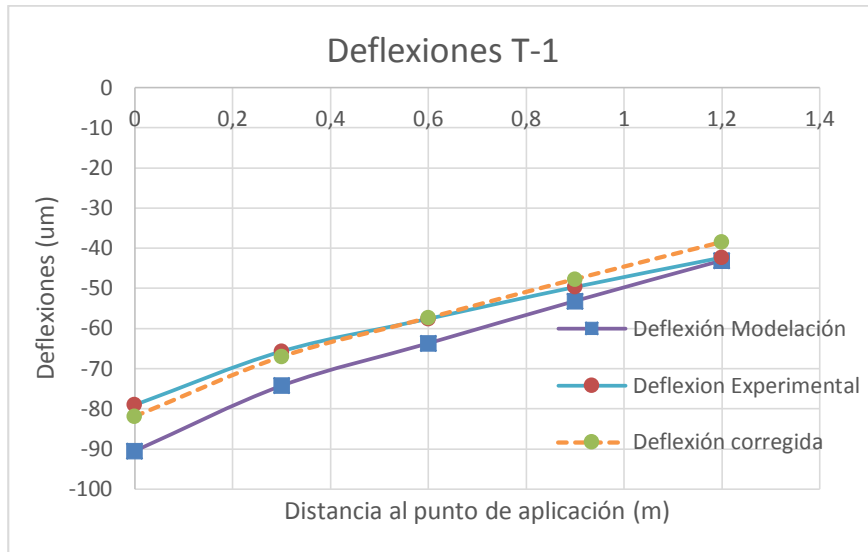


Figura 3-16. Corrección de las deflexiones T-1.

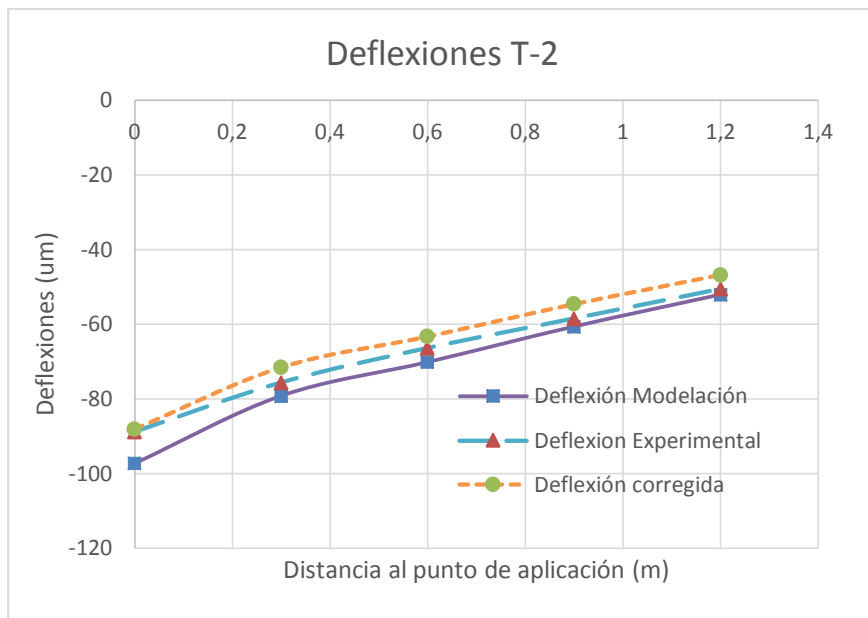


Figura 3-17. Corrección de las deflexiones T-2.

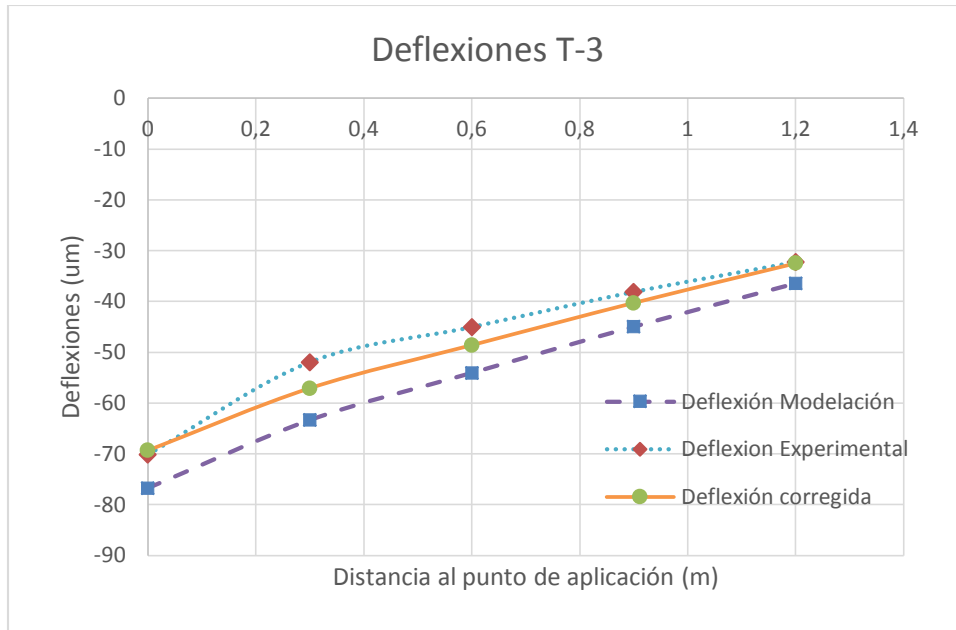


Figura 3-18. Corrección de las deflexiones T-3.

- b) El modelo planteado no representa afectaciones puntuales en el pavimento, como la existencia de estructuras hidráulicas (sumideros) o fallos debido a succión u otros fenómenos. Por lo anterior cualquier evaluación basada en límites de deflexión deberá tener en cuenta la existencia de estos elementos y su efecto deberá ser evaluado con otros criterios.
- c) Sin embargo al comparar las mediciones en campo con las predichas en este modelo y de acuerdo a lo que se discutió en el numeral 3.1.3 se tiene la posibilidad de prever fallas en el pavimento desde el momento de su apertura al tráfico así como las posibles necesidades de intervención. Estas afectaciones anteriormente descritas se pueden observar de la Figura 3-20 a la Figura 3-21.

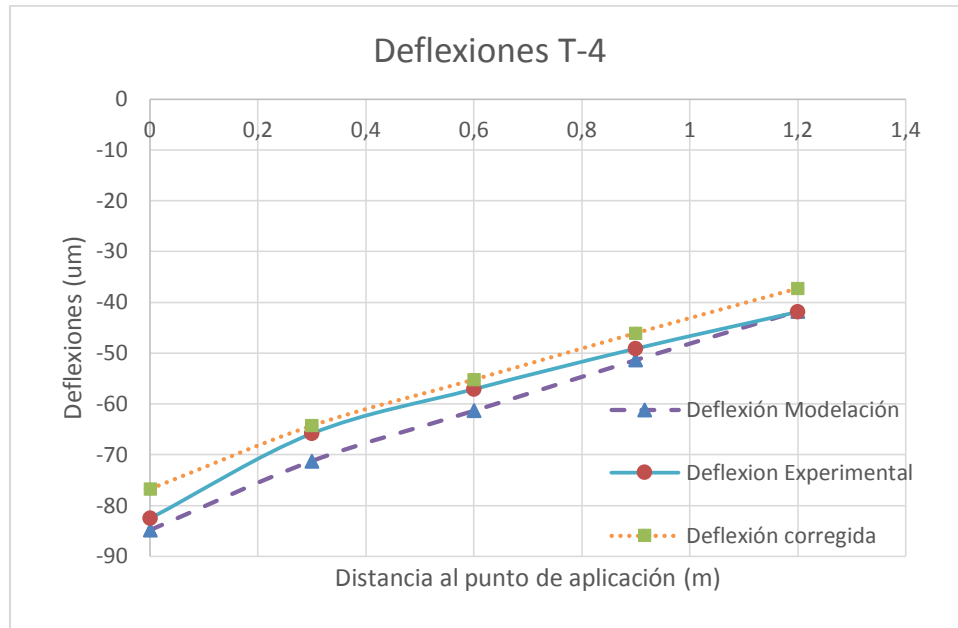


Figura 3-19. Corrección de las deflexiones T-4.

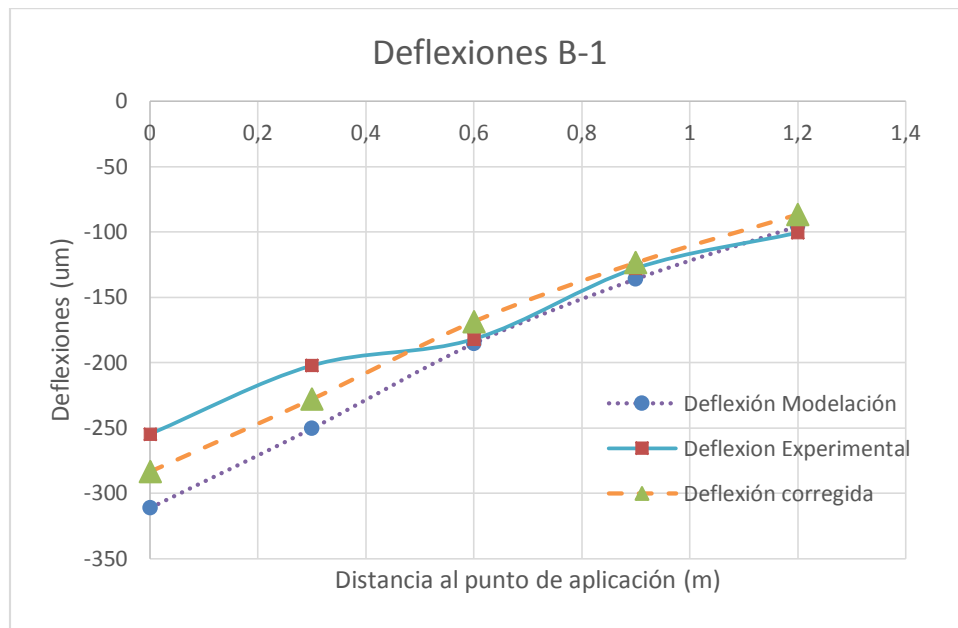


Figura 3-20. Corrección de las deflexiones B-1.

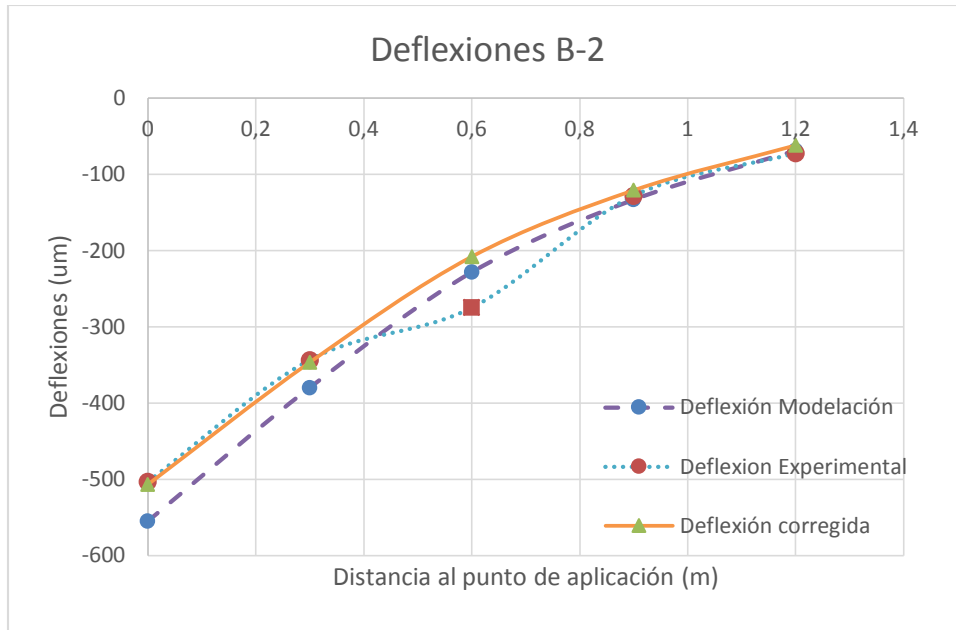


Figura 3-21. Corrección de las deflexiones B-2.

- d) En el tramo T-7 la modelación no pudo representar de manera adecuada el comportamiento de la estructura, lo anterior debido a que se modeló agrupando diferentes capas de acuerdo a lo recomendado en la fuente de donde se obtuvieron los datos. Teniendo en cuenta lo anterior el modelo de elementos finitos para este tramo fue modificado para incluir todas las capas y los resultados de la corrección y la modelación mejoran de manera significativa como se presenta en la Figura 3-22 y en la Figura 3-23.

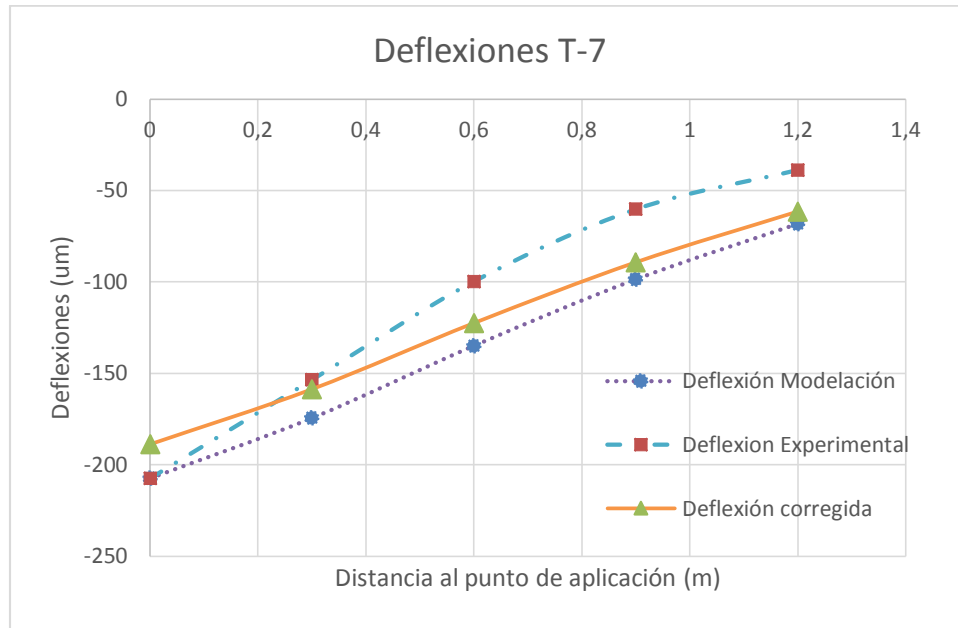


Figura 3-22. Corrección de las deflexiones T-7.

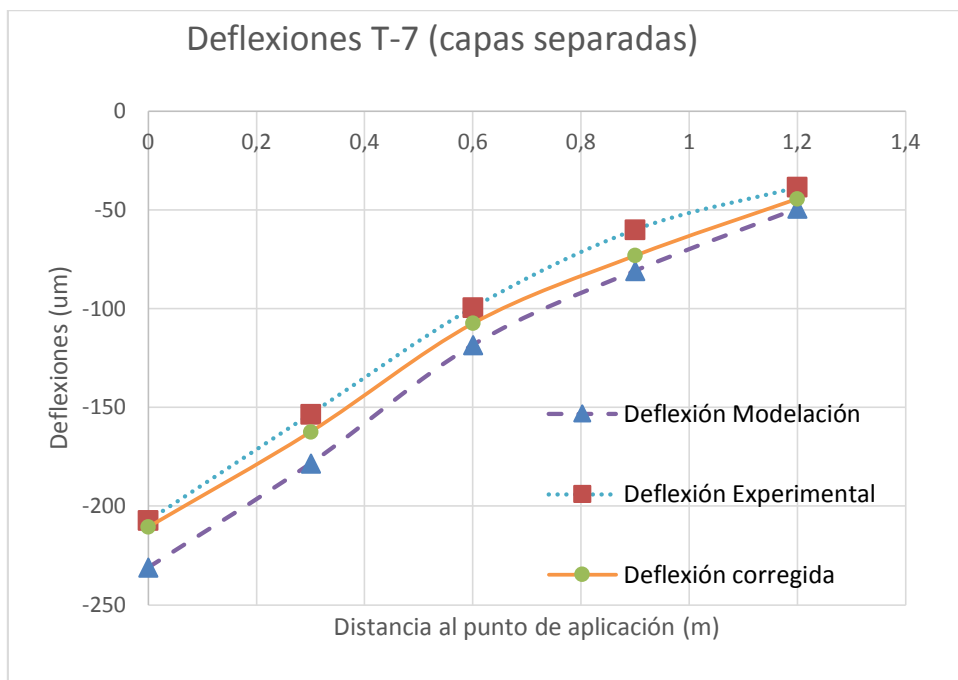


Figura 3-23. Corrección de las deflexiones T-7(capas separadas).

3.3 Caracterización de la subrasante a través de mediciones de deflexión.

Una vez verificada la idoneidad del modelo planteado para simular las estructuras nuevas se tiene que:

- a) El método YONAPAVE es suficientemente preciso en la estimación del módulo resiliente lo anterior se puede afirmar al observar los resultados de la modelación realizada. Después de diferentes pruebas se corroboró que el factor de 0,75 planteado por Leal (2008) es el más adecuado para las subrasantes en Bogotá.
- b) Teniendo en cuenta lo anterior y con todos los módulos resilientes estimados se plantea una correlación con el BCI, obteniendo un $R^2=0,83$ (Figura 3-24), además se puede observar que valores de BCI mayores de 50 implican módulos menores de 40 MPa y cualquier reducción del módulo a partir de este límite genera aumentos importantes de las deflexiones, lo que coincide con los límites propuestos por Horak(2008).
- c) Los resultados obtenidos muestran que es necesario realizar mejoramiento en los suelos de subrasantes con módulo resiliente inferior a 40 Mpa con el fin de evitar deformaciones importantes y de disminuir la probabilidad de falla en la estructuras. Lo anterior coincide con lo exigido en cuanto a mejoramiento en la Cartilla-Guía De Diseño De Pavimentos Para Bajos Volúmenes De Tránsito Y Vías Locales Para Bogotá D.C. (Murillo, et al., 2013) .
- d) Por otra parte los resultados también permiten analizar, que para subrasantes con módulos superiores a 80 MPa la influencia en los valores de deflexión es casi nula lo anterior indica que las estabilizaciones por encima de este valor tendrán un efecto menor en la reducción de espesores y en el comportamiento de la estructura.
- e) Los resultados obtenidos corresponden con la caracterización cualitativa presentada en la Figura 1-2 y se confirma la posibilidad de utilizar las propiedades geométricas del cuco como un indicador del estado estructural del pavimento. El uso de estas propiedades puede implementarse en campañas de medición donde se determine en tiempo real los puntos críticos para tomar ensayos destructivos. Lo anterior permite optimizar los costos de ensayos y laboratorios en redes viales.

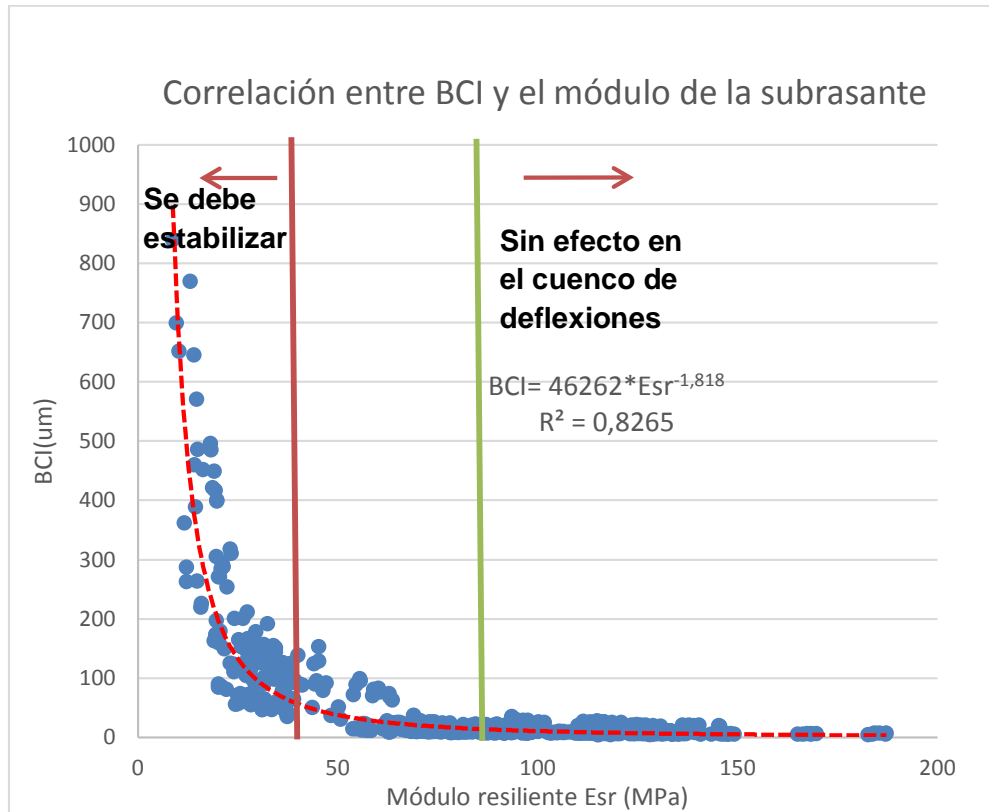


Figura 3-24. Correlación entre el BCI y el módulo de la subrasante.

3.4 Caracterización de las capas granulares en términos del cuenco de deflexiones.

Para determinar una correlación entre las características geométricas del cuenco y los módulos de las capas granulares se realizaron en total 45 modelaciones incluyendo todas las estructuras con material granular.

El módulo de la subbase varió entre 60 y 170 MPa, el de la base granular varió entre 150 y 250 MPa, una vez corregidos los cuencos de deflexión obtenidos se procedió a calcular los parámetros geométricos y utilizando relaciones lineales encontrar una correlación sin embargo los coeficientes de determinación obtenidos fueron muy bajos (<0,35), por lo que se buscó otra manera de evaluar el estado estructural.

Se consideró que en la evaluación preliminar de campo de pavimentos existentes donde no se tienen claros los espesores iniciales construidos puede ser suficiente con evaluar el módulo ponderado (promedio ponderado del módulo de las capas granulares existentes) de estas capas para detectar puntos críticos. Además en pavimentos existentes es

probable que la separación entre las diferentes capas granulares sea menor debido a la mezcla producto del tráfico y la presencia de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantearon correlaciones utilizando espesores combinados y módulos ponderados de los materiales granulares, al realizar este cambio se obtuvo, que BDI y BCI influyen en la correlación. Lo anterior indica que el efecto de la variación de las capas granulares no se ve exclusivamente en la zona 2 del cuenco sino en toda su extensión, este hecho se ilustra en la Figura 3-25

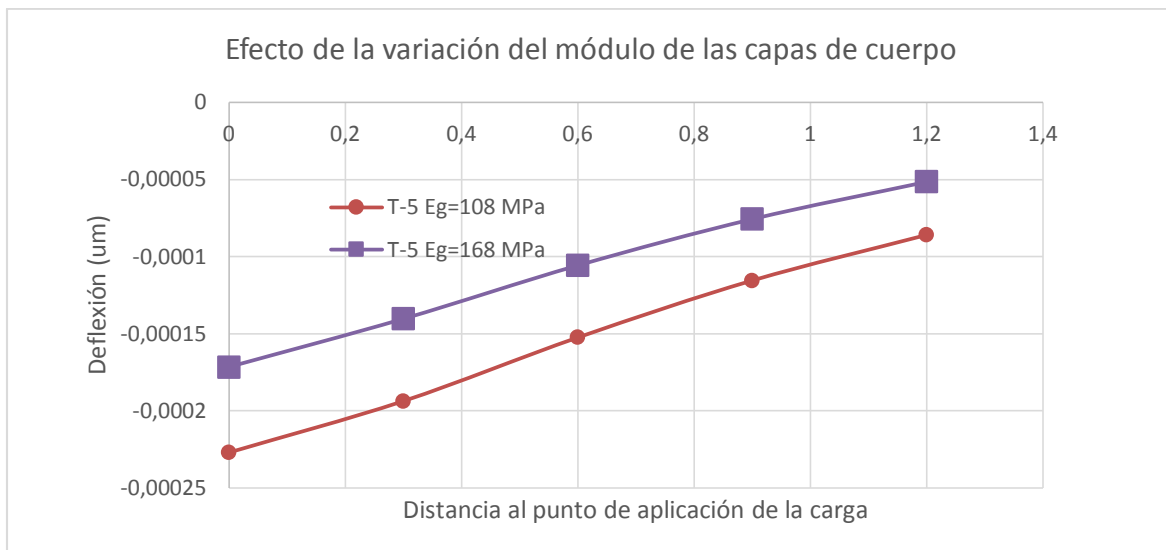


Figura 3-25. Efecto del módulo de las capas granulares en el cuenco de deflexiones.

En la Tabla 3-4 se presentan los valores del estadístico t para la correlación planteada, donde se puede observar que todos los parámetros escogidos son relevantes y con un R^2 de 0,93 se tiene una buena relación entre las variables, a continuación se presenta la ecuación propuesta:

$$Eg = BDI * 18917,9046 - Has * 115,490417 + Hgr * 494,868263 - BCI * 1708193,26$$

Dónde:

Eg: modulo ponderado de las capas granulares (MPa)

Has: espesor de las capas asfálticas (m)

Hgr: espesor de las capas granulares (m)

Tabla 3-4. Prueba T para la correlación entre los parámetros del cuenco y el módulo ponderado de las capas granulares.

| | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>Estadístico t</i> | <i>Probabilidad</i> |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Intercepción | 0 | #N/A | #N/A | #N/A |
| BDI (m) | 18917,91 | 287899,43 | -2,04 | 0,0479 |
| Has (m) | -115,49 | 49,73 | -2,32 | 0,0252 |
| Hgr(m) | 494,89 | 61,77 | 8,01 | 6,41E-10 |
| BCI (m) | -1708193,26 | 701620,58 | -2,43 | 0,0193 |

3.5 Caracterización de las capas asfálticas en términos del cuenco de deflexiones.

Después de analizar las diferentes modelaciones realizadas se tiene que los valores de módulo de las capas asfálticas pueden ser determinados a partir del cuenco de deflexiones, pero es necesaria la caracterización completa del cuenco (BCI,SCI,BDI) y de la estructura (espesores).

La ecuación determinada presenta un R^2 de 0,918 siendo todas las variables involucradas relevantes de acuerdo a la prueba T, como se observa en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Prueba T para la correlación entre los parámetros del cuenco y el módulo ponderado de las capas asfálticas.

| | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>Estadístico t</i> | <i>Probabilidad</i> |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Intercepción | -20580,799 | 3295,84 | -6,24 | 1,31443E-06 |
| BDI(m) | 374136674 | 67651132,9 | 5,53 | 8,33741E-06 |
| Has(m) | 34244,371 | 4080,45 | 8,39 | 7,12521E-09 |
| Hgr(m) | 36832,465 | 3873,87 | 9,51 | 5,9986E-10 |
| BCI(m) | -295336760 | 56755280,8 | -5,20 | 1,96467E-05 |
| SCI(m) | -137357139 | 31934819,5 | -4,30 | 0,00021239 |

Se debe aclarar que esta ecuación se ajusta bien en casos de pavimentos nuevos pero no es significativa para representar el comportamiento de pavimentos existentes en cuyos casos la capa asfáltica ha sufrido deterioro.

3.6 Modelación de estructuras regulares y malas (R-1 a R-3 y M-1 a M-4).

De la recopilación de información secundaria se tuvieron espesores aproximados de las estructuras clasificadas como regulares y malas y teniendo en cuenta los resultados de las modelaciones realizadas se aplicó la ecuación obtenida para materiales granulares. Se debe mencionar que esta ecuación resulto valida en los pavimentos clasificados como regulares en el caso de los tramos clasificados como malos se obtuvieron valores negativos, esto debido a que los valores de modulo son inferiores al error típico de las ecuaciones planteadas. Esto permite inferir que estas capas tienen aportes estructurales muy bajos.

Por lo anterior fue necesario iterar para obtener los módulos de las carpetas asfálticas y de algunas capas granulares, para estas iteraciones se comparó el cuenco de deflexiones medido con el cuenco modelado y el corregido. Aunque la corrección fue desarrollada para los pavimentos en buen estado o nuevos se ajusta bien en este caso como se observa en la Figura 3-26.

Los valores de modulo obtenido reflejan claramente la mala condición estructural y la disminución de la capacidad de las capas granulares que se han visto sometidas al ingreso de agua. En la Tabla 3-6 se resumen los espesores y los módulos de las capas para cada tramo.

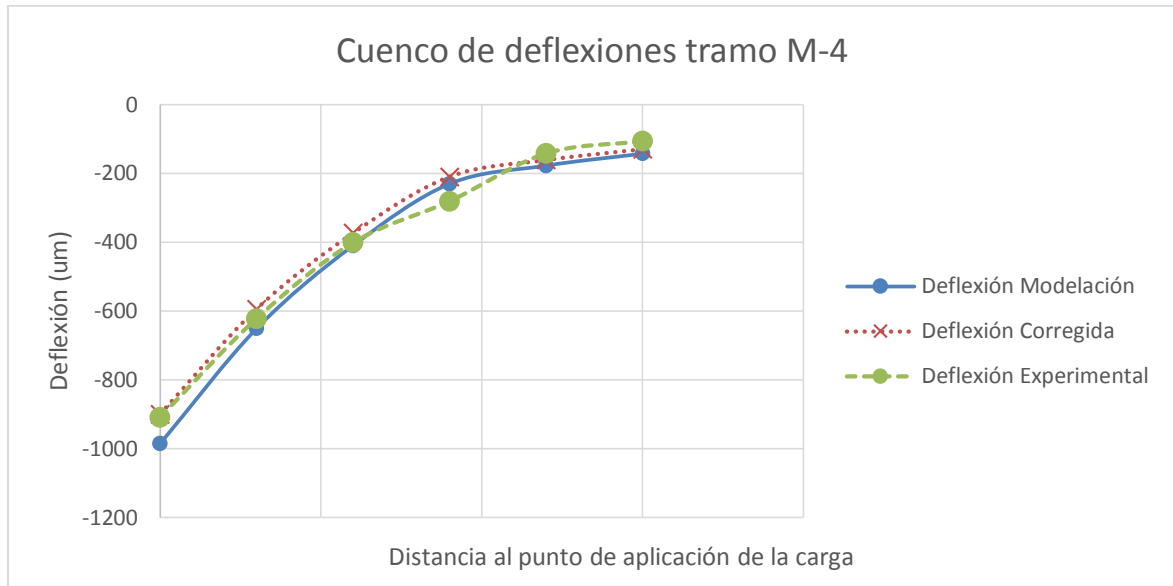


Figura 3-26. Cuenco de deflexiones tramo M-4.

De estos módulos determinados por iteración se puede mencionar que en el caso de los materiales granulares se tiene una reducción de entre el 38 y el 53 % en los tramos y con respecto a los valores promedio recomendados para vías locales. Esta reducción puede explicarse por un aumento en el contenido de humedad producto de fisuras y grietas en la superficie del pavimento o por pérdidas en las redes de acueducto y alcantarillado, según la Federal Highway Administration(2006) la saturación de un material granular puede reducir su módulo hasta en un 50%.

En el caso de los pavimentos considerados malos las reducciones de los módulos en la capas granulares variaron entre el 49 y el 75%, esta reducción adicional puede estar asociada a la pérdida de finos producto de mayores flujos de agua y a deformaciones que hayan desconfinado la capa. El efecto de la pérdida de finos ha sido estudiado ampliamente, encontrando que en materiales granulares no ligados implica un aumento en la susceptibilidad a los cambios en el módulo resiliente, particularmente los causados por el aumento en la humedad (Uthus, et al., 2005) .

En cuanto a las reducciones en el módulo de la capa asfáltica para tramos regulares fueron hasta del 86% y en tramos malos hasta del 96 %, esta disminución está asociada a la fatiga y el envejecimiento del material asfáltico, se debe resaltar que el modelo planteado no incluye estos efectos y por lo tanto el módulo obtenido es un equivalente elástico.

Tabla 3-6. Características mecánicas y geométricas tramos regulares y malos.

| Tramo | Espesor Carpeta (m) | Espesor Granulares (m) | Módulo subrasante (MPa) | Módulo granulares (MPa) | Módulo rodadura (MPa) |
|-------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| R-1 | 0,08 | 0,5 | 35,9 | 79,4 | 1200 |
| R-2 | 0,08 | 0,5 | 44,8 | 100,4 | 1025 |
| R-3 | 0,08 | 0,5 | 56 | 76 | 950 |
| M-1 | 0,1 | 0,4 | 15 | 40 | 400 |
| M-2 | 0,07 | 0,4 | 14 | 35 | 350 |
| M-3 | 0,07 | 0,5 | 9 | 50 | 100 |
| M-4 | 0,11 | 0,6 | 25,5 | 83 | 500 |

3.7 Diseño y validación de sobrecarpetas.

Una vez modeladas las estructuras de pavimentos de los tramos clasificados como regulares y malos se procedió a calcular el espesor de sobrecarpeta requerido para un tráfico de 1 millón de ejes equivalentes de 8,2 toneladas. El número de ejes equivalentes se definió a partir de la clasificación propuesta en Cartilla-Guía De Diseño De Pavimentos Para Bajos Volúmenes De Tránsito Y Vías Locales Para Bogotá D.C. (Murillo, et al., 2013) y que se puede considerar típico para una vida útil de 10 años en vías locales de la ciudad, además se asumió una confiabilidad del 80% con una desviación estándar de 0,45 y una pérdida de servicio de 2,5.

Se evaluaron tres casos en el diseño de la sobrecarpeta, en el primero se siguió la metodología AASHTO, en el segundo caso se utilizaron las ecuaciones propuestas en el método YONAPAVE y por último se utilizó la metodología YONAPAVE afectando el valor de módulo por un factor de corrección local (0,75).

En la Tabla 3-7 se presentan los diseños obtenidos y se puede observar que para pavimentos en estado regular, el método de AASHTO arroja espesores mayores que los obtenidos con los demás métodos, lo anterior concuerda con los resultados de Wu & Chen (2008).

También se puede observar que en los casos donde las vías se encuentran en peor estado la diferencia entre los métodos se reduce, llegando a ser AASHTO el de mayores espesores para la estructura M-2.

Para evaluar el efecto en el cuenco de deflexiones de las sobrecarpetas, se modelaron las 7 estructuras con las tres opciones de sobrecarpetas obteniendo que:

Tabla 3-7. Diseños de sobrecarpetas, para 10 años en vías locales.

| Tramo | Método AASHTO | | | | |
|-------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| | MR(psi) | MR diseño(psi) | S _{Neff} | S _{Nreq} | Espesor Sobrecarpeta (cm) |
| R-1 | 8156,3 | 2718,8 | 3,4 | 4,3 | 5,8 |
| R-2 | 9295,4 | 3098,5 | 3,4 | 4,1 | 4,6 |
| R-3 | 12012,4 | 4004,1 | 3,1 | 3,8 | 4,4 |
| M-1 | 4018,9 | 1339,6 | 2,3 | 5,3 | 19,6 |
| M-2 | 2893,3 | 964,4 | 2,1 | 5,8 | 24,1 |
| M-3 | 2597,0 | 865,7 | 2,7 | 5,8 | 20,0 |
| M-4 | 5521,5 | 1840,5 | 3,4 | 4,8 | 9,2 |

| Tramo | Método YONAPAVE (sin ajustar) | | | |
|-------|-------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| | MR(psi) | S _{Neff} | S _{Nreq} | Espesor Sobrecarpeta (cm) |
| R-1 | 6493,0 | 2,2 | 3,2 | 6,6 |
| R-2 | 8667,5 | 2,0 | 2,9 | 6,2 |
| R-3 | 10761,8 | 1,3 | 2,7 | 9,1 |
| M-1 | 3704,3 | 1,4 | 3,9 | 16,0 |
| M-2 | 2707,9 | 1,4 | 4,3 | 18,4 |
| M-3 | 1856,5 | 2,3 | 4,8 | 16,0 |
| M-4 | 3702,9 | 2,8 | 3,9 | 7,1 |

| Tramo | Método YONAPAVE (ajustado) | | | |
|-------|----------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| | MR(psi) | S _{Neff} | S _{Nreq} | Espesor Sobrecarpeta (cm) |
| R-1 | 5206,9 | 2,0 | 3,5 | 9,8 |
| R-2 | 6500,6 | 1,7 | 3,2 | 9,6 |
| R-3 | 8071,1 | 1,1 | 3,0 | 12,0 |
| M-1 | 2777,5 | 1,2 | 4,2 | 19,5 |
| M-2 | 2030,6 | 1,2 | 4,7 | 22,2 |
| M-3 | 1392,4 | 2,1 | 5,2 | 20,5 |
| M-4 | 2777,5 | 2,5 | 4,2 | 11,5 |

- Para las estructuras en estado regular se tiene que los espesores obtenidos por el método de la AASHTO, no permiten reducir los parámetros del cuenco a niveles similares a los recomendados en el capítulo 3.8.
- En la Figura 3-27 se presentan los resultados de las modelaciones realizadas para el tramo R-1 en donde se observa el cambio en el cuenco de deflexiones con los diferentes espesores de sobre-carpeta. Además en la tabla se presentan los valores de los parámetros del cuenco para esta estructura.

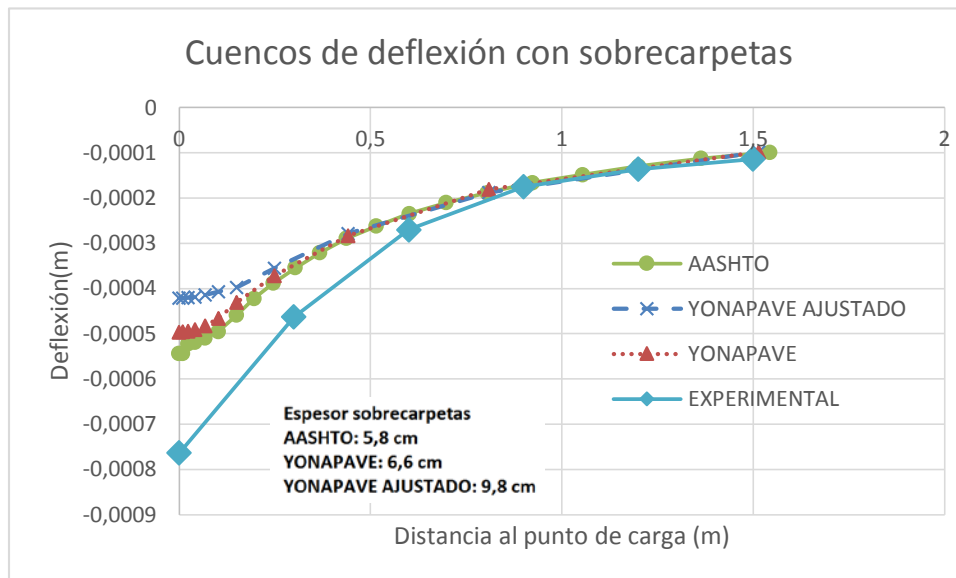


Figura 3-27. Cuenco de deflexiones tramo R-1 con sobrecarpetas.

En el caso de pavimentos en estado malo se encontró que todos los métodos de diseño reducen de manera drástica los parámetros del cuenco lo que indica un posible sobredimensionamiento de la sobrecarpeta. Además los espesores obtenidos de hasta 24 cm para la rehabilitación de las estructuras malas son excesivos para este tipo de intervención tanto por los costos como por las consecuencias en el diseño geométrico de la vía y en las condiciones de drenaje y de pendientes en el tramo a intervenir.

Tabla 3-8. parámetros del cuenco de deflexión tramo R-1

| Parámetro (um) | EXPERIMENTAL | YONAPAVE | AASHTO | YONAPAVE AJUSTADO |
|----------------|--------------|----------|--------|-------------------|
| SCI | 300,73 | 190,64 | 224,73 | 122,10 |
| BDI | 192,79 | 81,36 | 57,73 | 116,86 |
| BCI | 94,89 | 115,73 | 77,24 | 37,83 |

- En los pavimentos en condición mala también se pudo observar que los diseños con el método AASHTO arrojaron los mayores espesores, sin embargo para estos casos el mayor espesor no parece ofrecer ninguna ventaja en el comportamiento del cuenco de deflexiones respecto a los demás métodos como se presenta en la

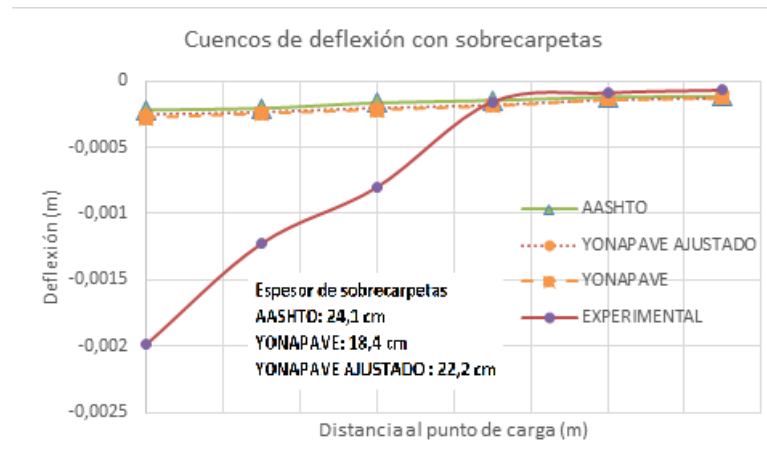


Figura 3-28. Cuenco de deflexiones tramo M-2 con sobrecarpetas.

- De lo anterior se tiene que para los segmentos evaluados el método con mejores resultados es el de YONAPAVE ajustado para la ciudad. Se debe resaltar que la única diferencia fundamental entre los métodos radica en la caracterización mecánica de la subrasante. Debido a las limitaciones inherentes a la obtención de las ecuaciones empíricas de la AASHTO, es de esperar que utilizando ecuaciones propias para la zona de estudio los espesores de diseño sean adecuados para las estructuras detectadas.
- Con el objetivo de simplificar la priorización de tramos a rehabilitar para la ciudad de Bogotá se proponen una correlaciones entre el espesor de la sobrecarpeta y los parámetros del cuenco de deflexiones, como se presenta a continuación, vale la pena resaltar que se plantean dos correlaciones una para un tráfico de 1 millón de ejes equivalente y otra para dos millones, esto valores son típicos en vías locales de la ciudad.

Espesor de sobrecarpeta para 1 millón de ejes equivalentes de 8,2 toneladas

$$e = 13995,667 * BCI + 12158,326 * SCI + 5,187$$

Donde:

e: espesor de la sobrecarpeta en cm.

BCI: parámetro del cuenco de deflexión en m

SCI: parámetro del cuenco de deflexión en m

Para esta correlación se tiene un R^2 ajustado de 0,94

Espesor de sobrecarpeta para 2 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas

$$e = 15252,98 * BCI + 12060,368 * SCI + 7,427$$

Para esta correlación se tiene un R^2 ajustado de 0,927

- De lo evaluado en este estudio y teniendo en cuenta los espesores excesivos que se obtienen en pavimentos en una mala condición estructural se recomienda no utilizar sobrecarpetas como medida de rehabilitación para vías que necesiten más de 10 cm para soportar el nuevo tráfico.
- En caso de utilizar la técnica de sobrecarpeta en la rehabilitación se deberán sellar las fisuras y baches existente en la capa de rodadura, en los casos que dicho operación no sea posible debido al deterioro excesivo se procederá a retirar la carpeta existente y utilizando el método de las componentes (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) calcular el nuevo espesor de sobrecarpeta necesario.

3.8 Criterios de evaluación estructural para estructuras de pavimentos nuevos en vías locales de la ciudad de Bogotá.

Teniendo en cuenta la validación presentada de la modelación numérica, se modelaron las estructuras flexibles propuestas en la Cartilla-Guía De Diseño De Pavimentos Para Bajos Volúmenes De Tránsito Y Vías Locales Para Bogotá D.C. (Murillo, et al., 2013).

Para las estructuras flexibles tradicionales se modelaron las estructuras 12 estructuras flexibles, que se presentan en la Figura 3-29, en esta figura CPE corresponde al tipo de suelo y está caracterizado por el CBR, las modelaciones se realizaron con el CBR mínimo para cada estructura y el módulo de la subrasante se calculó según lo presentado en el numeral 1.2.2.

Las características de las capas se tomaron de los requisitos mínimos de la Cartilla-Guía y se presentan en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9.características mínimas de las capas para las estructuras modeladas,
Tomado de (Murillo, et al., 2013).

| Capa | Tráfico | Módulo (kg/cm ²) |
|---------------------------------------|---------|------------------------------|
| Capa Asfáltica (MDC) | Todos | 28000 |
| Base granular (BG) | T1-1 | 2040 |
| | >T1-1 | 2200 |
| Sub-base granular (SBG) | T1-1 | 1070 |
| | >T1-1 | 1160 |
| Base estabilizada con emulsión (BGEE) | Todos | 13000 |
| Material bituminoso reciclado (MBR) | Todos | 20000 |

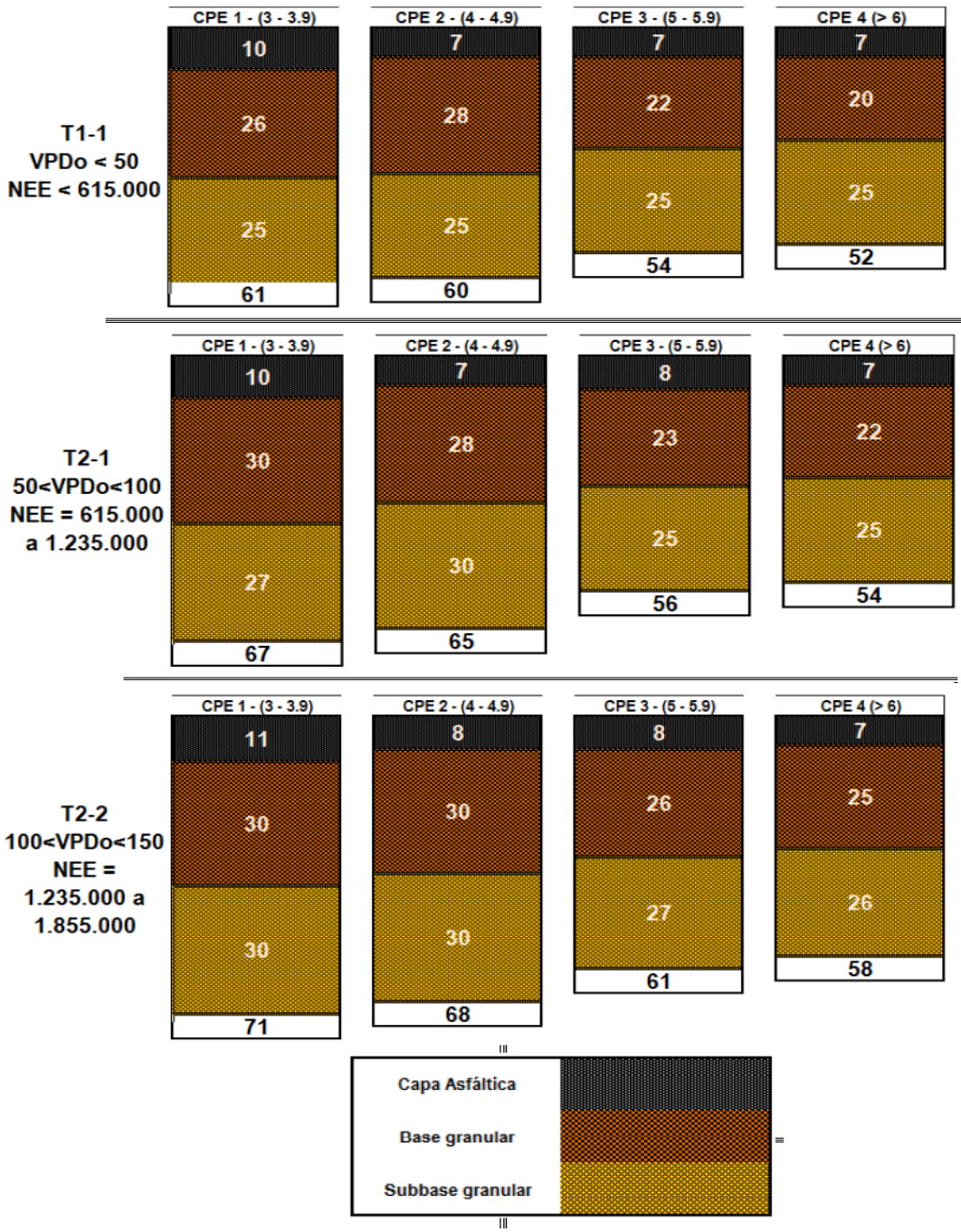


Figura 3-29. Estructuras flexibles tradicionales modeladas (espesores en cm).

Tomado de (Murillo, et al., 2013).

Una vez realizadas las modelaciones de estas 12 estructuras se procedió a analizar los resultados de las deflexiones corregidas obteniendo que:

- a) Las estructuras diseñadas para soportar un tráfico mayor presentaran en general menores deflexiones debido al mayor espesor requerido, además la mayor influencia de una mejor subrasante puede ser observada en la zona 2 y 3 del cuenco. (ver Figura 3-30).

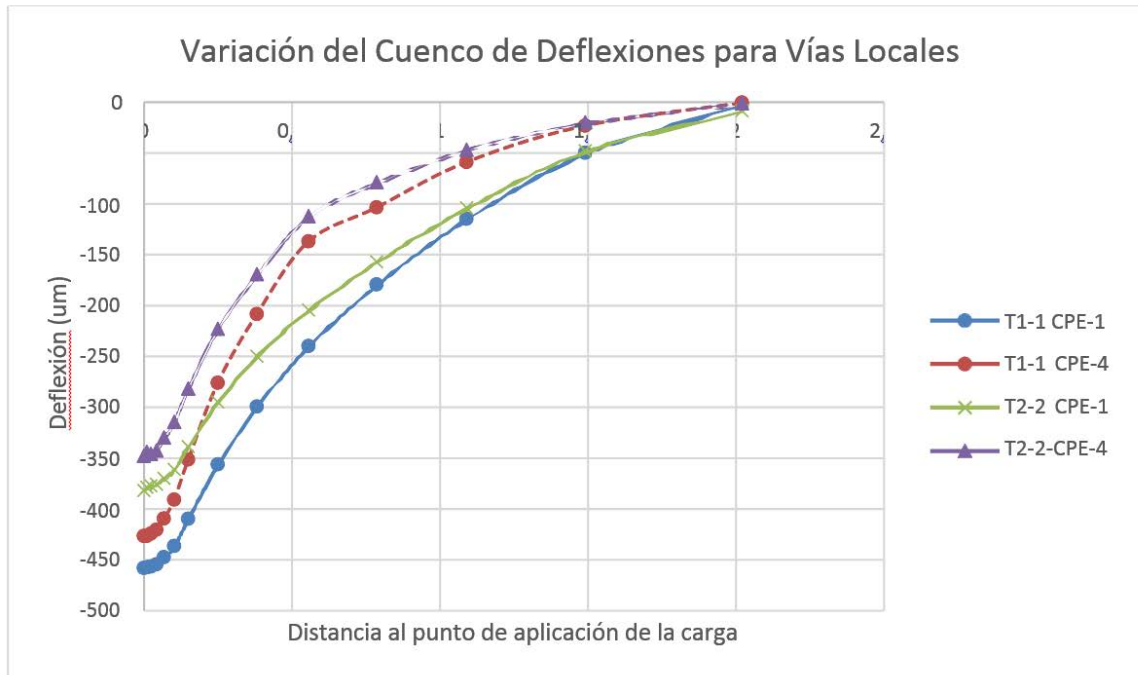


Figura 3-30. Variación del cuenco de deflexiones para vías locales.

- b) Se encontró que la ecuación de correlación planteada entre el BCI y el módulo de la subrasante aplica en las estructuras modeladas por lo que se proponen límites para la evaluación de pavimentos nuevos basados en los CPE (capacidad portante equivalente) propuestos en la Cartilla-Guía. (Ver Tabla 3-10).

Para evaluar el efecto de la presencia de bases estabilizadas y materiales reciclados se modelaron 8 estructuras adicionales que se presentan en la Figura 3-31.

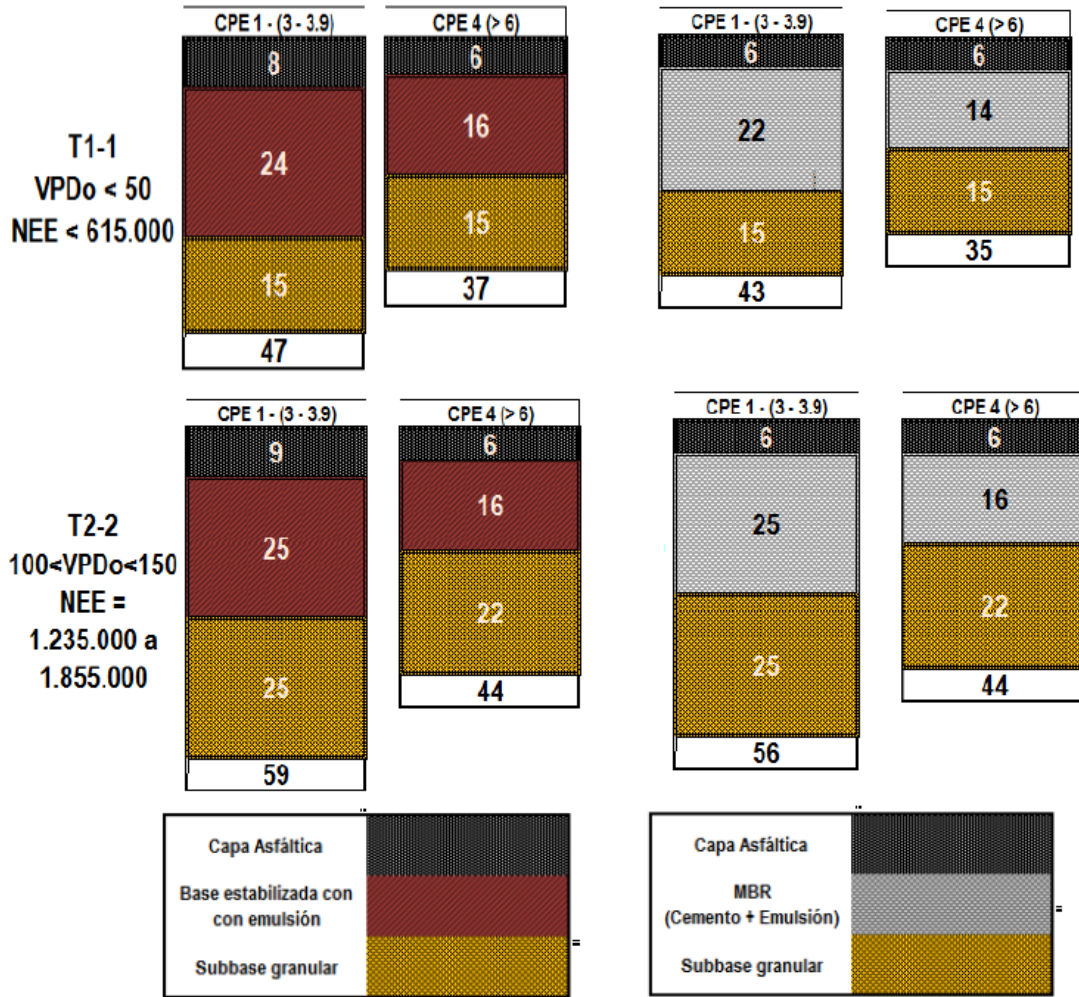


Figura 3-31. Estructuras flexibles adicionales modeladas.
Tomado de (Murillo, et al., 2013)

- c) De los resultados de las modelaciones se tiene que los valores de BDI para estructuras con capas granulares exceden los límites recomendados por Horak (2008) por lo que se recomienda un límite de 130 um para vías locales y un límite de 100 um para estructuras con bases estabilizadas ya sean con emulsión asfáltica o que usen material bituminoso reciclado. En la Figura 3-32 se presentan los resultados obtenidos.
- d) En cuanto al SCI se tiene que para estructuras con bases estabilizadas un límite de 100 um es adecuado para vías nuevas y un límite de 200 um (igual al propuesto por Horak) aplica para pavimentos con bases granulares. (ver Figura 3-33).

- e) También se encontró que para los pavimentos evaluados la deflexión máxima no debe exceder los 450 micrómetros para estructuras con capas granulares y 300 micrómetros para estructuras con capas estabilizadas.
- f) Se debe resaltar que estos límites propuestos tienen como función la detección de zonas críticas y la localización de los puntos para la toma de muestras necesarias en la realización de ensayos de laboratorio. Las correlaciones y los límites presentados deberán ser corroborados en campo en estudios posteriores.

Tabla 3-10.Límites para el BCI para pavimentos nuevos en vías locales de Bogotá.

| CPE | Módulo mínimo de la subrasante (MPa) | BCI Máximo (um) |
|-------|--------------------------------------|-----------------|
| CPE-1 | 30 | 100 |
| CPE-2 | 40 | 60 |
| CPE-3 | 50 | 40 |
| CPE-4 | 60 | 30 |

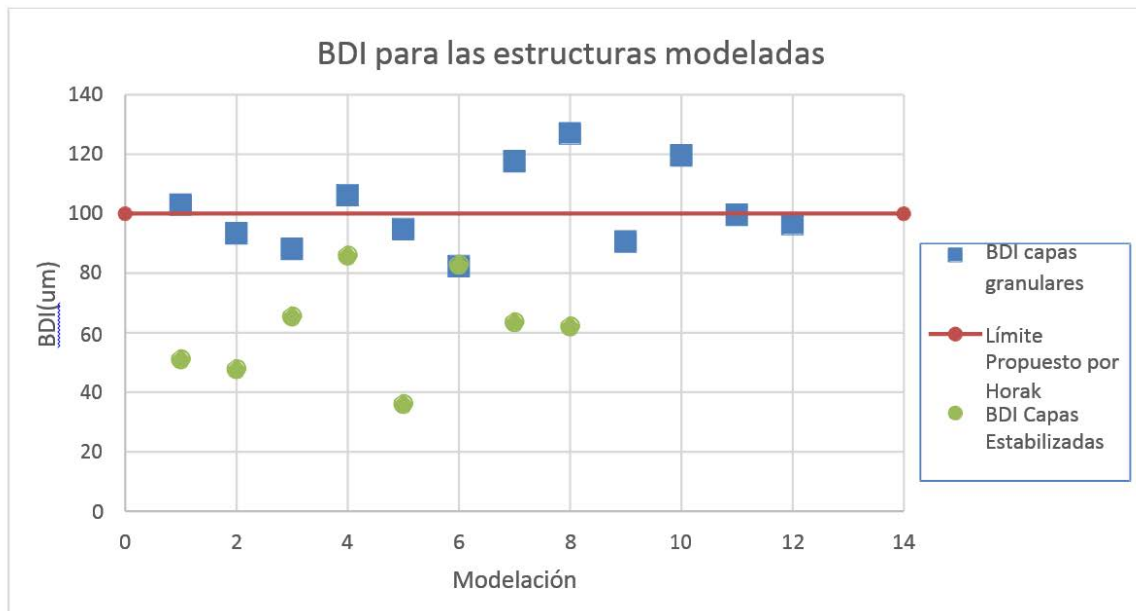


Figura 3-32. Variación del BDI.

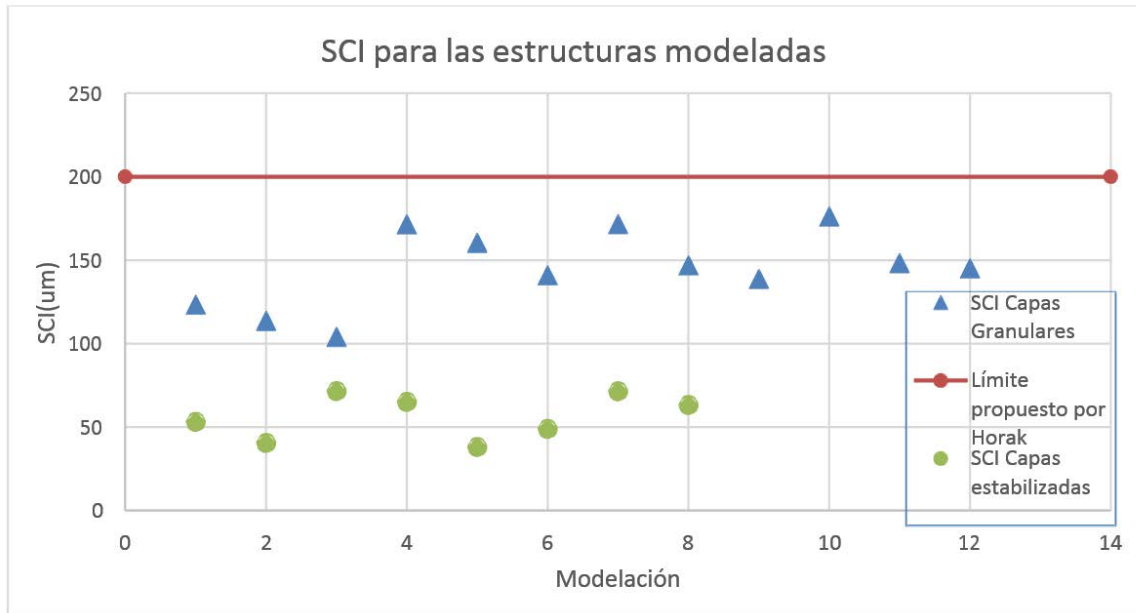


Figura 3-33. Variación del SCI.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se identificaron parámetros geométricos del cuenco de deflexión asociados a las características mecánicas de las capas del pavimento. Estos parámetros son SCI, BDI y BCI.
- Se encontró que para módulos de la subrasante inferiores a 40 MPa se hace necesario realizar mejoramientos de la subrasante.
- Para módulos de subrasante mayores a 80 MPa se observó que los cuencos de deflexión no presentan variaciones importantes.
- Utilizando el programa ABAQUS se logró modelar las deflexiones causadas en la estructura de pavimento por una carga dinámica de impacto.
- Se propuso una ecuación de corrección para los cuencos de deflexión planteados, involucrando las distorsiones causadas por las condiciones de frontera y las limitaciones del modelo planteado.
- Se propusieron tres correlaciones entre los parámetros geométricos del cuenco y los módulos de las capas de la estructura de pavimento. Estas correlaciones no aplican para pavimentos muy deteriorados.
- Se evaluaron tres métodos de diseño de sobrecarpetas y se determinó que YONAPAVE ajustado es el que mejor se adapta para la ciudad de Bogotá.
- Se plantearon dos ecuaciones de diseño de sobrecarpetas en términos del tráfico y de los parámetros geométricos del cuenco de deflexiones.
- Se presentaron límites ajustados a la ciudad, para las características geométricas del cuenco de deflexiones.
- Se determinaron cuencos de deflexiones típicos para las estructuras a construir en vías de bajo tráfico de la ciudad.

4.2 Recomendaciones y aportes

De todo lo anterior y producto de esta investigación se realizan los siguientes aportes para los procesos de evaluación de tramos viales en la ciudad:

- Se modelaron en total 20 estructuras típicas para vías locales de la ciudad contenidas en la Cartilla-Guía De Diseño De Pavimentos Para Bajos Volúmenes De Tránsito Y Vías Locales Para Bogotá D.C. (Murillo, et al., 2013) y teniendo en cuenta las exigencias mínimas para cada capa, de lo anterior se plantearon límites máximos a tres parámetros del cuenco de deflexión, se propone que el control para el recibo de estructuras nuevas en Bogotá se haga combinado métodos destructivos y no destructivos optimizando así los recursos y garantizando una evaluación más completa de los tramos.
- Con el método considerado más adecuado para las condiciones del estudio se plantean dos ecuaciones de diseño para sobrecarpetas en vías locales de la ciudad, se fijaron las condiciones (tráfico, confiabilidad, coeficiente de capa) para que reflejaran los valores típicos de Bogotá.

Para próximas investigaciones se recomienda:

- Evaluar el efecto de la utilización de modelos reológicos más complejos para los materiales evaluados en esta investigación y que permitan incluir efectos de oxidación, succión y viscosidad en los cálculos realizados.
- Realizar un tramo de prueba que incluya sobrecarpetas diseñadas con los tres métodos y comprobar su comportamiento contra la evaluación aquí realizada.
- Realizar un seguimiento a los tramos evaluados recopilando información de las deflexiones para determinar la vida útil remanente para estas estructuras.

Bibliografía

Hadidi, R. & Gucunski, N., 2010. Comparative Study of Static and Dynamic Falling Weight Deflectometer Back-Calculations Using Probabilistic Approach. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING, 136(3), pp. 196-204.

Schwartz, C. W. & Carvalho, R. L., 2007. Implementation of the NCHRP 1-37A Final report, Volume 2: Evaluation of Mechanistic-Empirical Design Procedure, College Park: Department of Civil and Environmental Engineering The University of Maryland College Park.

Al-Qadi, I. L. & Kwasi Appea, A., 2003. Eight-Year of Field Performance of A Secondary Road incorporating Geosynthetics at The Subgrade-Base Interface. Transportation Research Board 82nd Annual Meeting.

American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993. AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures. Washington D.C.: AASHTO.

Behbahani, H. & Sahaf, S. A., 2007. Designing a Mathematical Model for Predicting the Mechanical Characteristics of Asphalt Pavements Using Dynamic Loading. International Journal of Civil Engineering. Vol. 5, No. 3.

Bowerman, B., O'Connell, R., Aitken Schermer, J. & Adcock, J., 2011. Business Statistics in Practice with Connect Access Card. segunda ed. Toronto : McGraw-Hill Ryerson Higher Education; Canadian edition.

Carpenter, S. H., 2006. FATIGUE PERFORMANCE OF IDOT MIXTURES. Urbana-Champaign: Illinois Center for Transportation.

Carvalho, C., 2014. The University Of Texas At Austin McCombs School of Business. [En línea]

Available

t:

http://faculty.mcombs.utexas.edu/carlos.carvalho/teaching/lecture3_Dallas.pdf

[Último acceso: 12 Junio 2014].

Ceylan, H. & Gopalakrishnan, K., 2006. Artificial neural network models incorporating unbound material nonlinearity for rapid prediction of critical pavement responses and layer moduli. Aggregates Foundation for Technology, Research and Education Symposium.

Chen, D. H. Z. M. L. J. A., 1995. Assessment of computer programs for analysis of flexible pavement structure. Transportation Research Record , Issue 1482, pp. 123-133.

Consortio HMV-LG, 2007. IDU. [En línea]
Available at:
<http://webidu.idu.gov.co:9090/jspui/bitstream/123456789/37177/14/60013512-10.pdf>
[Último acceso: 21 Abril 2014].

Crovetti , J. . A., 2005. Development of Rational Overlay Design Procedures for Flexible Pavements. Milwaukee: WISCONSIN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.

Department of Transport, Tourism and Sport of Ireland, 1999. Guidelines for the Depth of Overlay to be used on Rural Non National Roads. Dublin, Ireland: Department of the Environment and Local Government.

Federal Highway Administration, 2006. Seasonal Variations in The Moduli of Unbound Pavement Layers. [En línea]
Available at:
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/04079/chapt2.cfm>
[Último acceso: 11 09 2014].

Garg, N. & Thompson, M., 1998. Mechanistic-Empirical Evaluation Of The Mn/Road Low Volume Road Test Sections. Urbana, Illinois: University of Illinois.

George, K. P., 2003. Falling Weight Deflectometer For Estimating Subgrade Resilient Moduli. University, Mississippi: The University of Mississippi.

Gutiérrez, A. G., 2010. Evaluación de estructuras de pavimento flexible usando técnicas no destructivas empujando el deflectografo de impacto o FWD. Bogotá: Universidad Nacional De Colombia.

Helwany, S., 2007. Applied Soil Mechanics With ABAQUS Applications. Primera ed. Hoboken, New Jersey : JOHN WILEY & SONS, INC..

Hoffman, M. S., 2003. A Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volumen 1860, pp. 41-47.

Hoffman, M. S. & Thompson, M. R., 1981. Mechanistic interpretation of nondestructive pavement testing deflections. Interim Report Illinois Univ., Urbana-Champaign. Dept. of Civil Engineering..

Horak, E., 1987. Aspects of deflection basin parameters used in mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa. Pretoria: University of Pretoria.

Horak, E., 2007. Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as benchmarking tool. The 26th Annual Southern African Transport Conference and Exhibition, pp. 284-293.

Horak, E., 2008. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, pp. 2-9.

Horak, E. & Emery, S., 2009. Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter benchmarking methodology. 2nd European Airport Pavement Workshop, Mayo.

Hubner, D. & Jameson, G., 2008. Technical Basis of the Austroads Design Procedures for Flexible Overlays on Flexible Pavements. Sydney: Austroads Incorporated.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2014. Inventario malla vial. [En línea] Available at: http://www.idu.gov.co/web/guest/malla_inventario [Último acceso: 31 agosto 2014].

Jung, F. W., 1989. Nondestructive Testing: Interpretation of Deflection Bowl for Falling Weight Deflectometer Tests on Flexible Pavements. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 17 No. 6, pp. 333-343.

Kim, R., Hibbs, B. O. & Lee, Y. C., 1995. Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Asphalt Concrete Moduli. TRR 1473 - Strength and Deformation Characteristics of Pavement Sections and Pavement, Issue 1473, pp. 55-62.

Kim, Y. R., 2000. Assessing Pavement Layer Condition Using Deflection Data, NCHRP 10-48, Final Report. Washington, DC.: Transportation Research Board.

Kim, Y. R., 2001. Assessing Pavement Layer Condition Using Deflection Data. Washington : National Cooperative Highway Research Program.

Kim, Y. R. & Park, H., 2002. USE OF FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER MULTI-LOAD DATA FOR PAVEMENT STRENGTH ESTIMATION. Raleigh: North Carolina Department of Transportation.

Leal, M. H., 2010. Relación Entre El Módulo Resiliente Hallado Por Retrocálculo y El Encontrado En Ensayos De Laboratorio. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

L, V., 2008. Análisis elástico de la deflexión de equipos de medición dinámica FWD en la auscultación de pavimentos flexibles. Popayán: Universidad del Cauca.

Mallela, J. & George, K. P., 1994. Three-Dimensional Dynamic Response Model for Rigid Pavements. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1448, pp. 92-99.

Mamlouk, M. S., 1985. Evaluation Of In-Situ Pavement Moduli From Deflection Measurements. Journal Of Testing And Evaluation, Enero, 13(1), pp. 60-68.

Meier, R. W., 1995. Backcalculation of Flexible Pavement Moduli from Falling Weight Deflectometer Data Using Artificial Neural Networks. Vicksburg, MS: U.S. Army Corps of Engineers.

Murillo, C. A., Troncoso, J. R., Gómez, O. E. & Velandia, P. S., 2013. Cartilla guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá D.C. Bogotá: IDU.

Roesset, J. M., 1998. Nondestructive Dynamic Testing of Soils and Pavements. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol.1, No. 2, pp. 61-81.

Salgado, M., Portilla Alvarez, C. P. & Duarte Ballesteros, J. L., 2003. Análisis Comparativo Entre Métodos Para La Medición De Deflexiones En Pavimentos Flexibles. Bogotá: Universidad Javeriana.

Shahin, M., 2005. Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots. NY,USA: Springer Science+Business media.

Sukumaran, B. & Sukumaran, B., 2004. Three dimensional finite element modeling of flexible pavements. FAA WORLDWIDE AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE, p. Atlantic City.

Sveinsdóttir, B. Ö., 2011. Pavement Behavior Evaluation during Spring Thaw based on the Falling Weight Deflectometer Method. Estocolmo: Royal Institute of Technology.

Talvik, O. & Aavik, A., 2009. Determination Of Limit Values For FWD Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) For Pavement Condition Assessment. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Volume: 4, Issue Number:4, pp. 196-202.

Tam, W., 1987. Pavement Evaluation and Overlay Design. Nottingham: University of Nottingham.

Uthus, L., Hoff, I. & Horvli, I., 2005. A study on the influence of water and fines on the deformation properties of unbound aggregates. Trondheim (Norway)., Proceedings, 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields.

Van Til, C. J., McCollough, B. F. & Hicks, R. G., 1972. AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structure. 1972 ed. Washington, D.C.: AASHO.

Velasquez, L., 2008. Análisis elástico de la deflexión de equipos de medición dinámica FWD en la auscultación de pavimentos flexibles. Popayán: Universidad del Cauca.

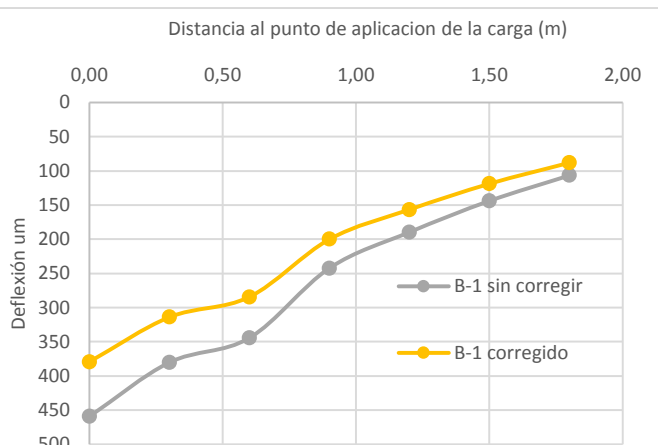
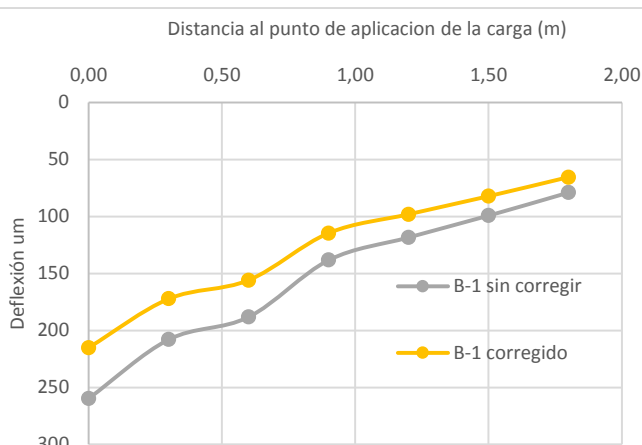
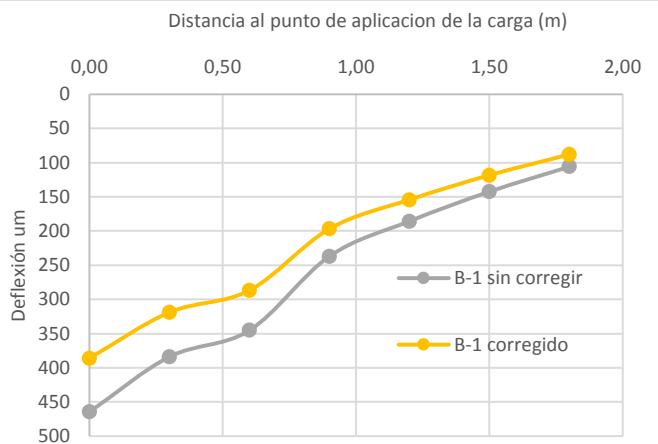
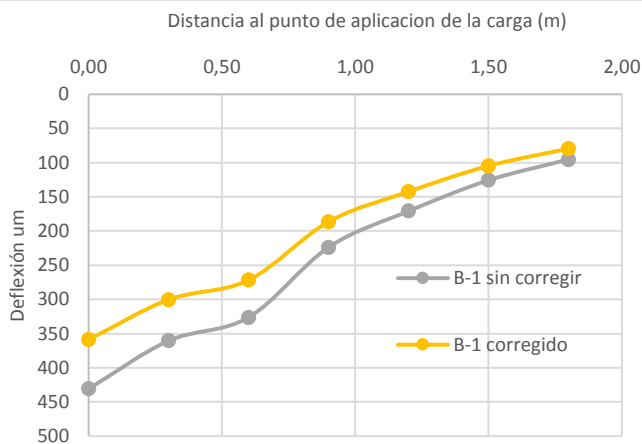
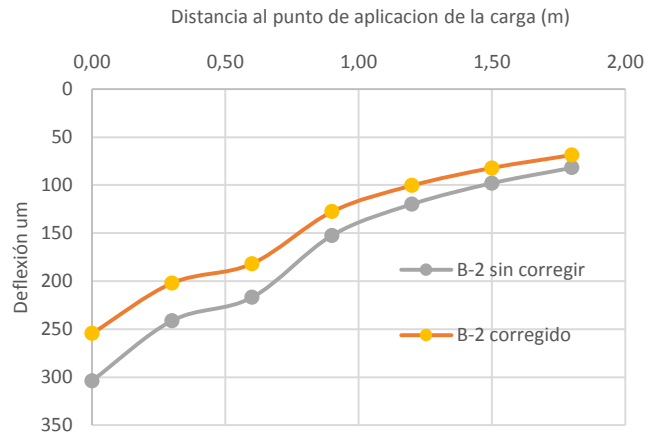
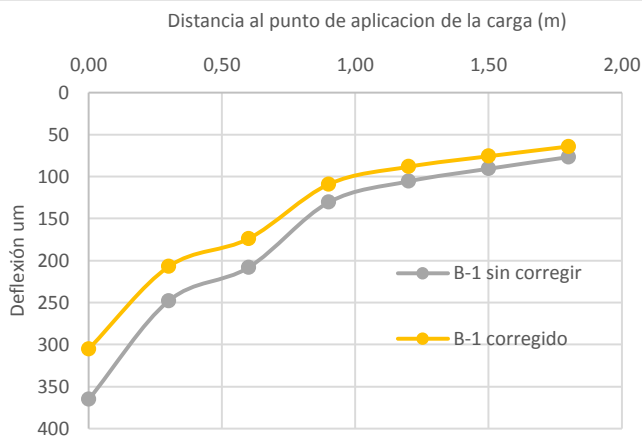
Wu, Z. & Chen, X., 2008. Structural Overlay Design Of Flexible Pavement By Nondestructive Test Methods In Louisiana. Washington, D.C.: s.n.

Anexos

Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo B-1



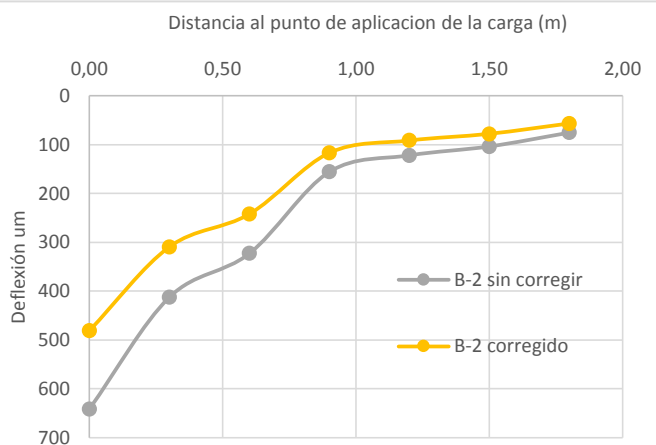
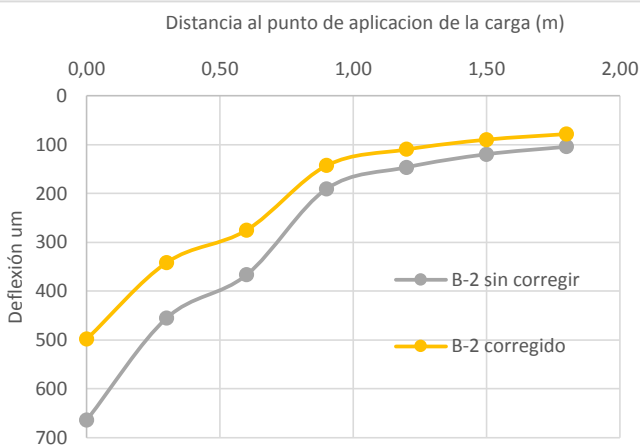
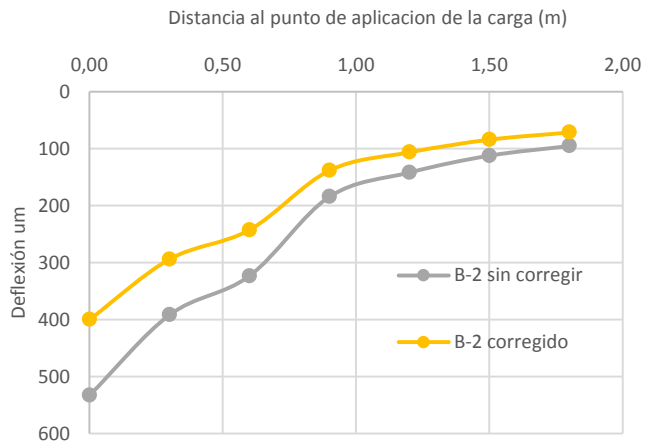
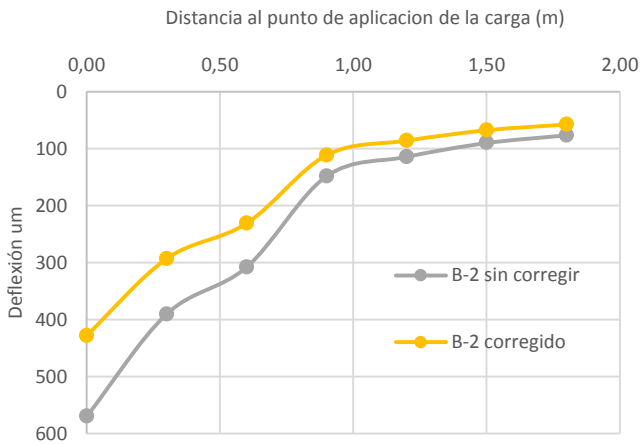
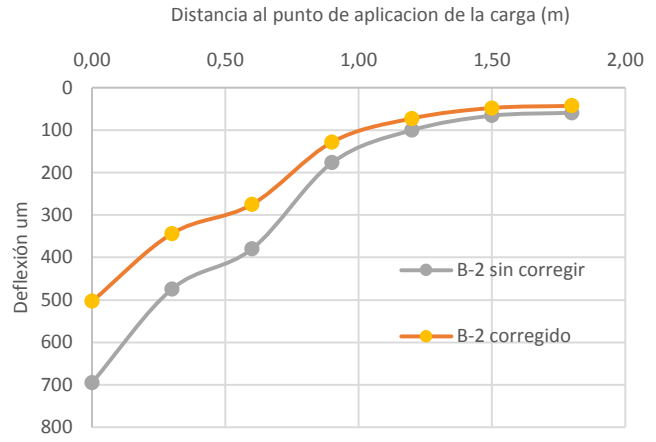
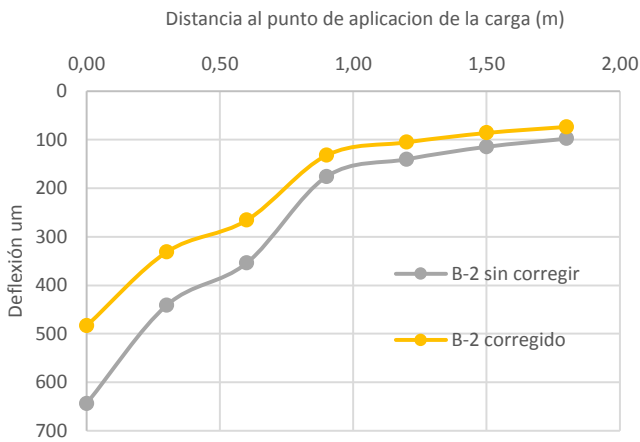
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo B-2



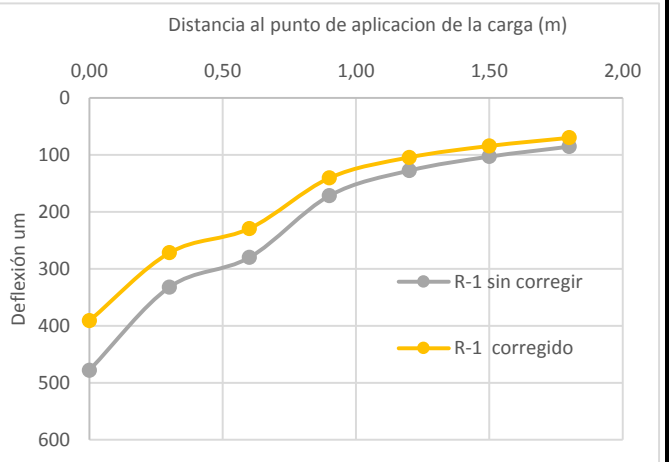
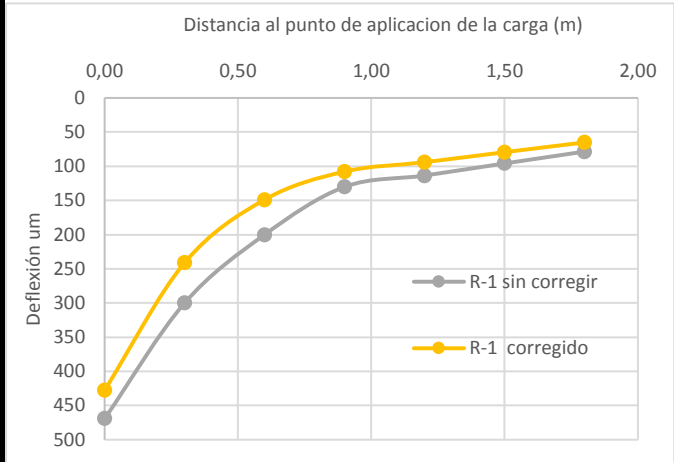
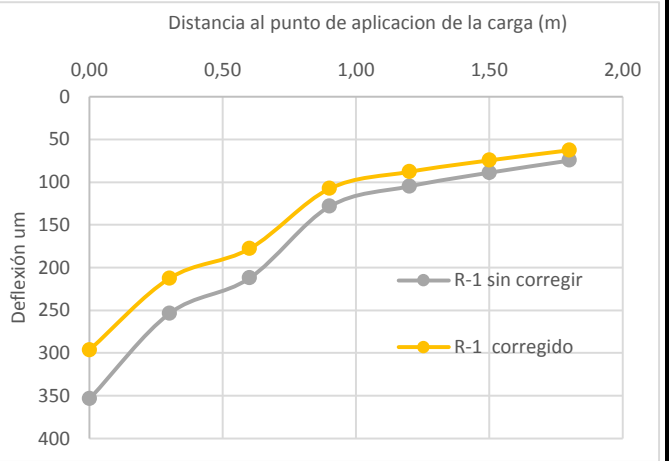
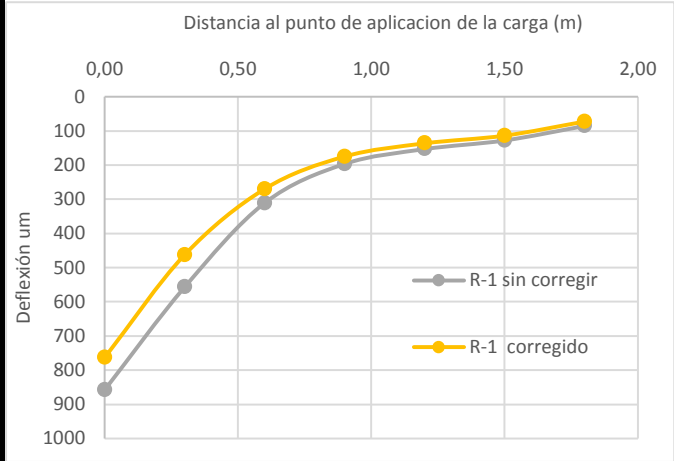
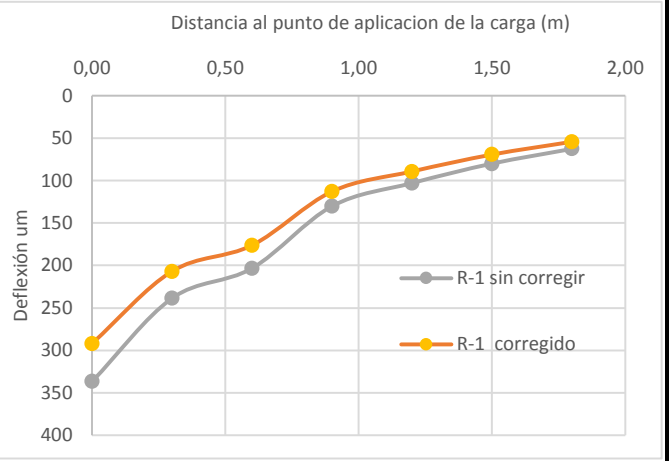
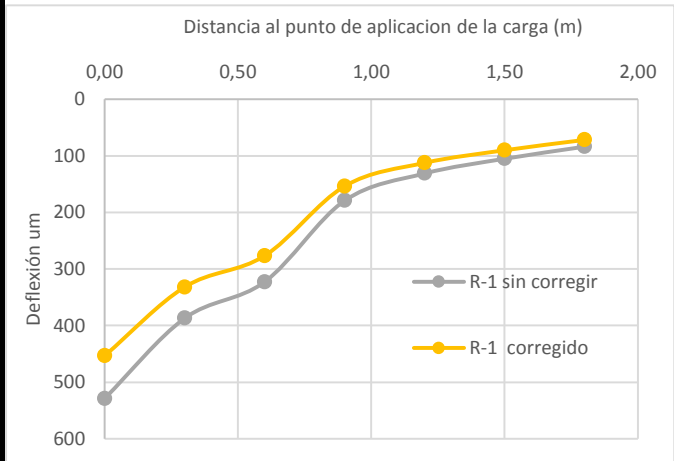
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo R-1



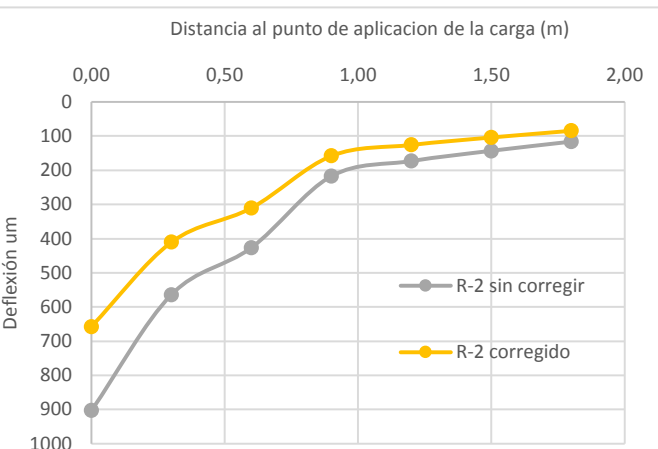
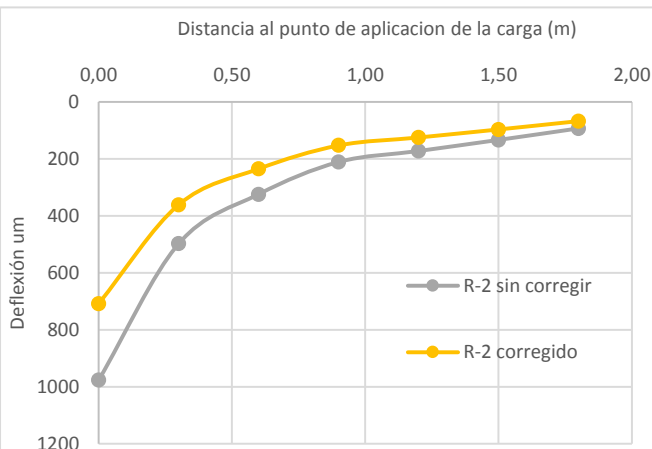
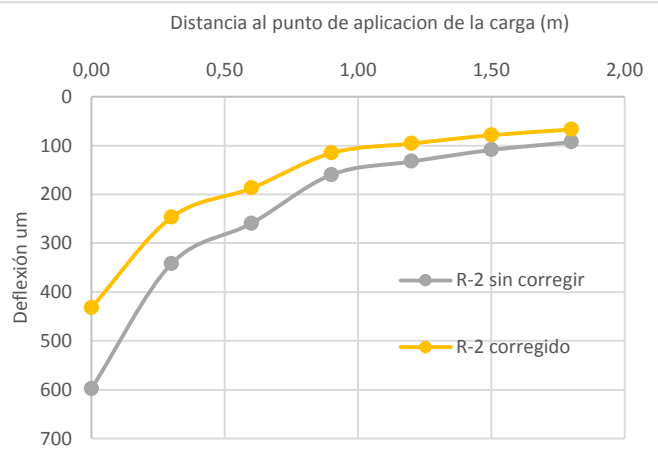
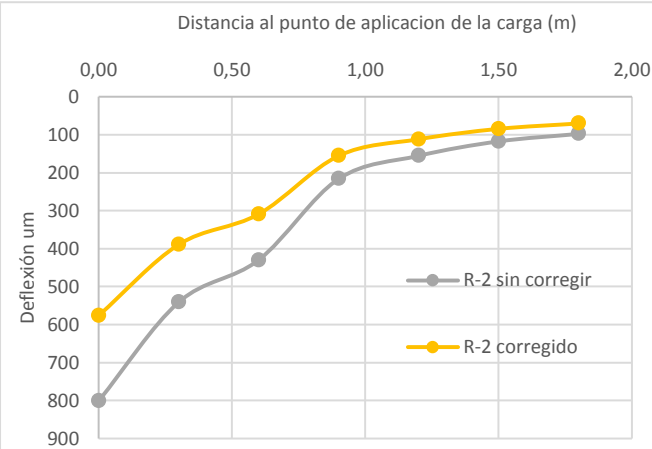
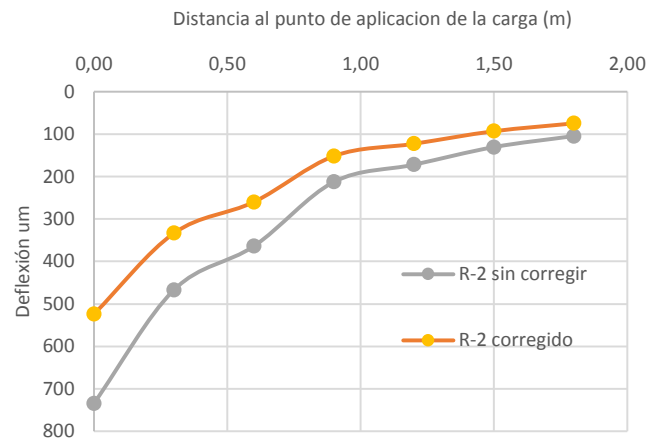
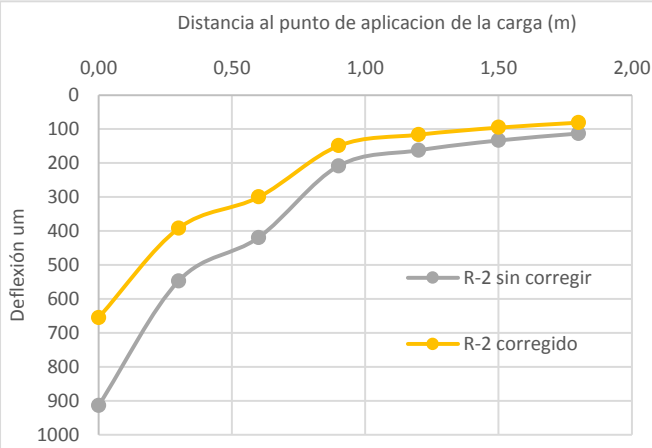
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo R-2



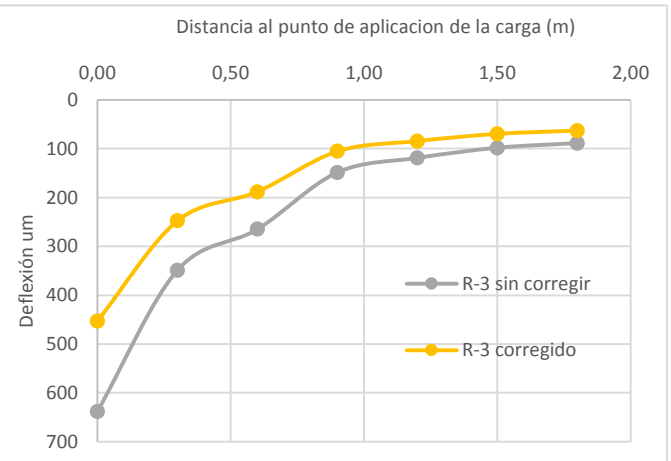
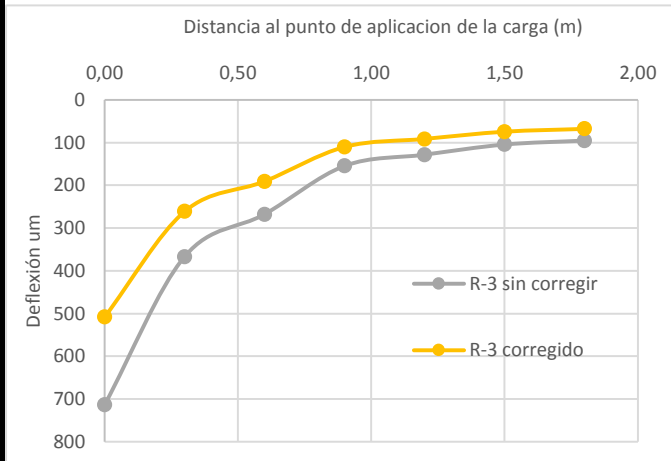
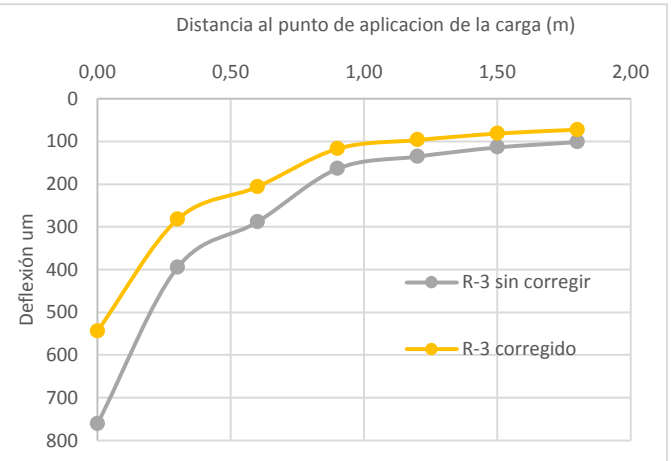
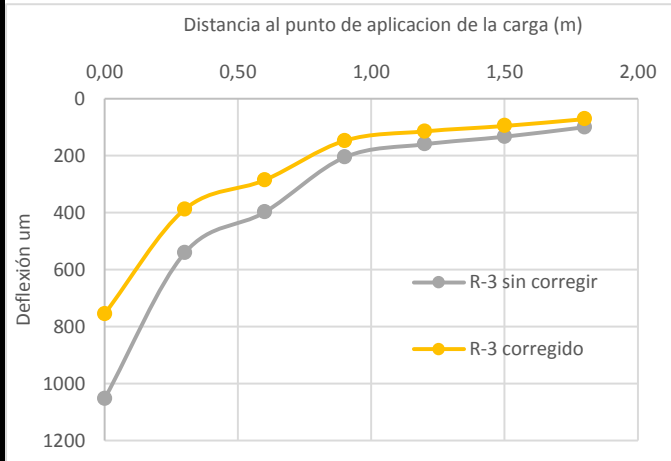
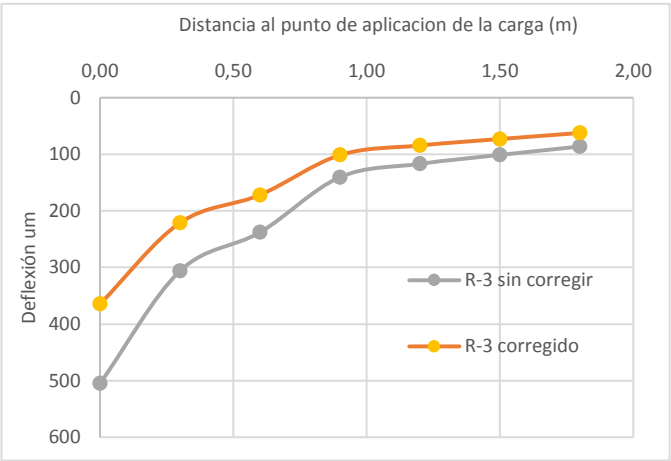
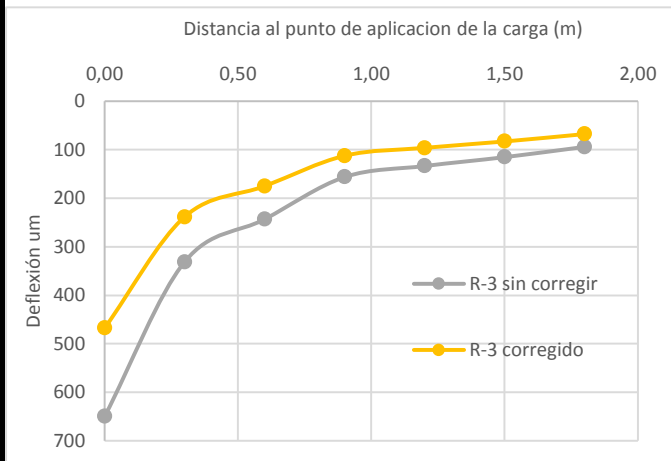
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo R-3



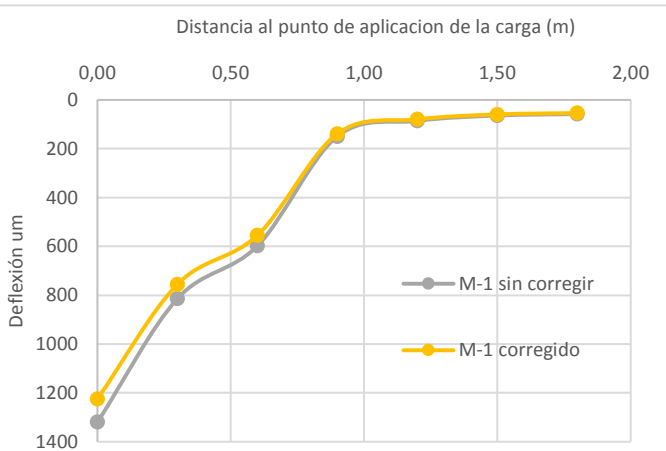
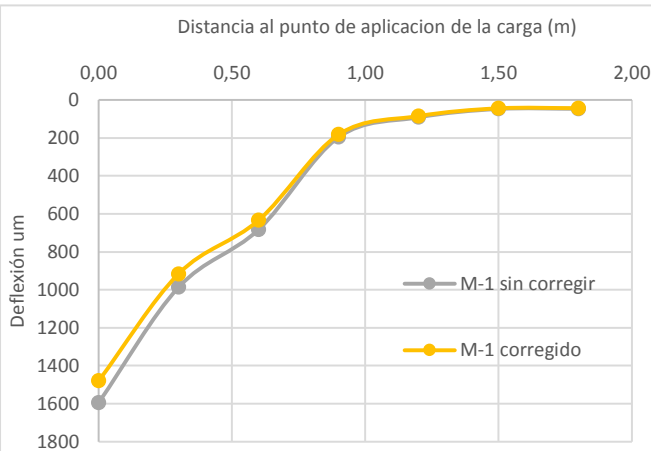
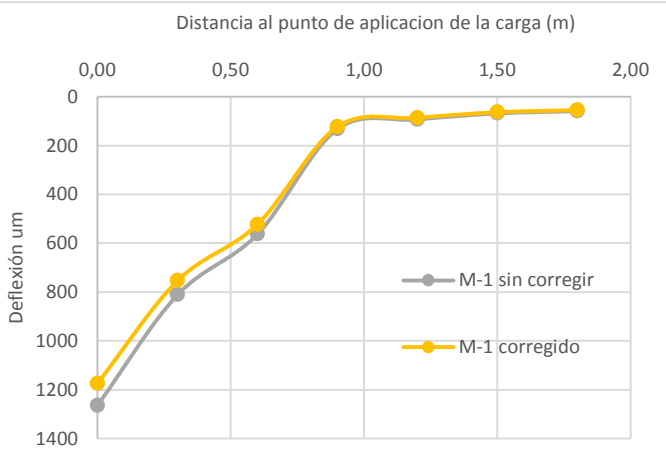
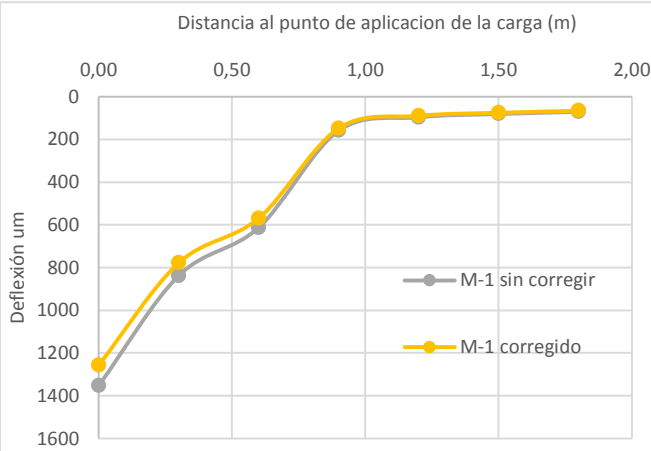
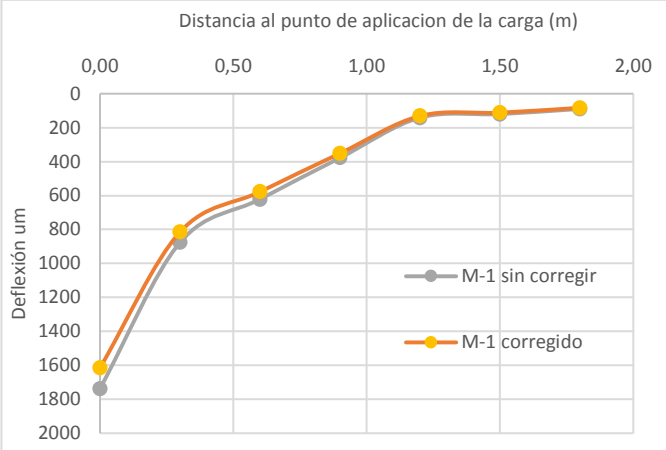
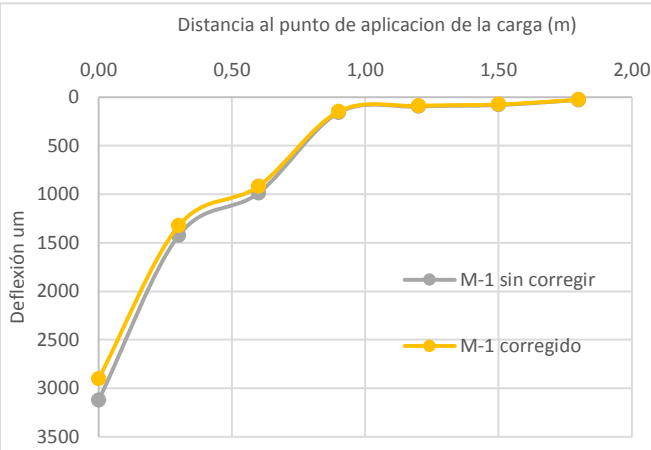
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo M-1



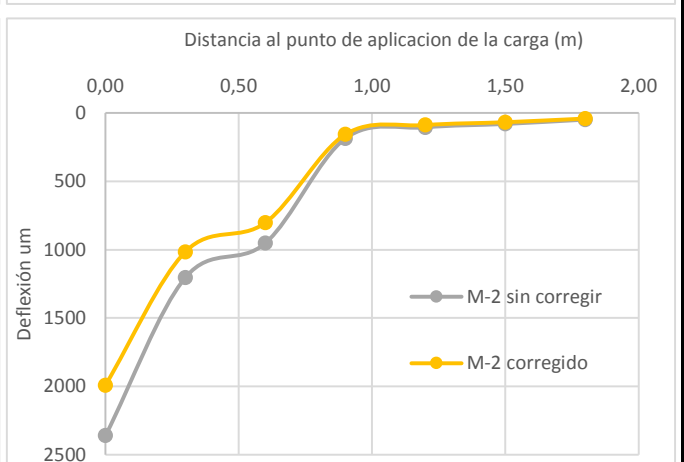
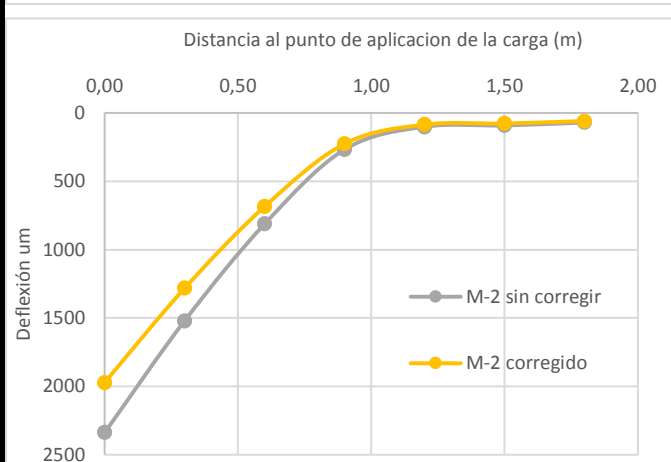
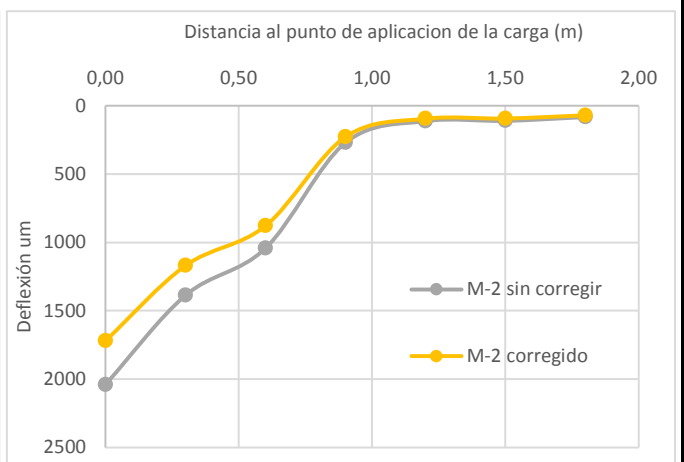
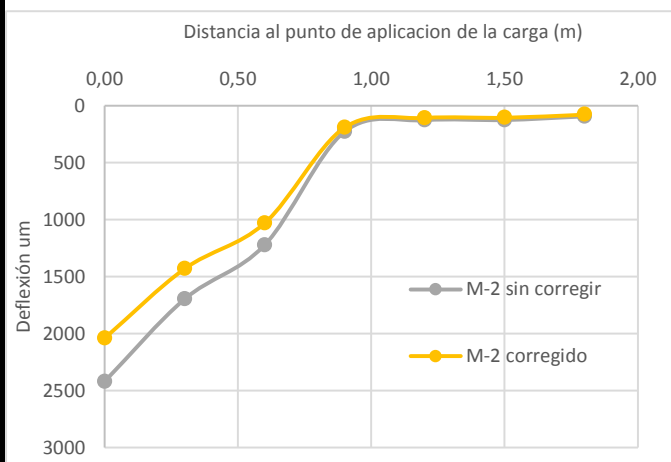
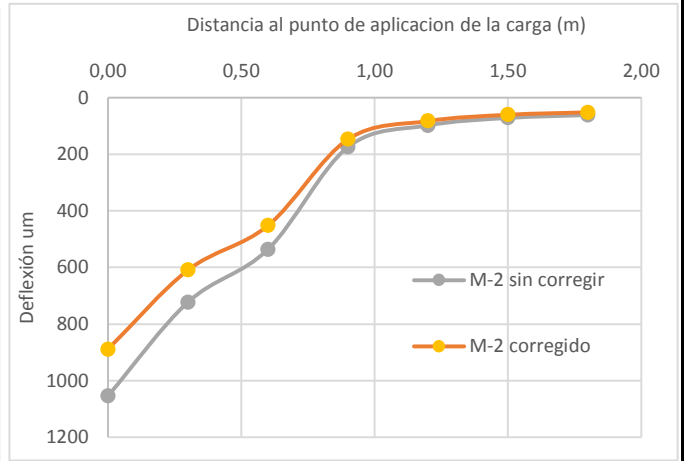
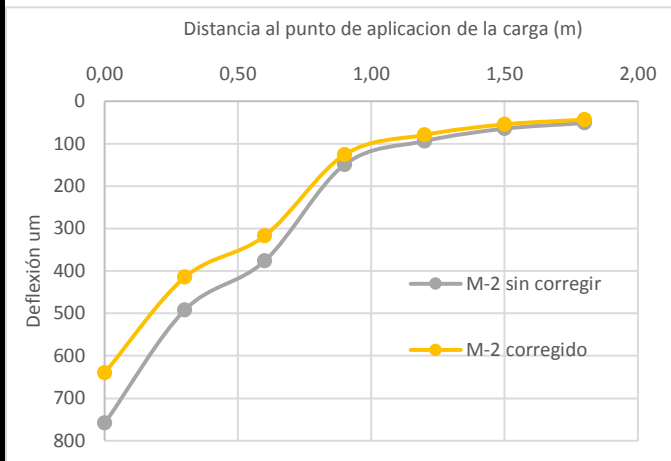
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo M-2



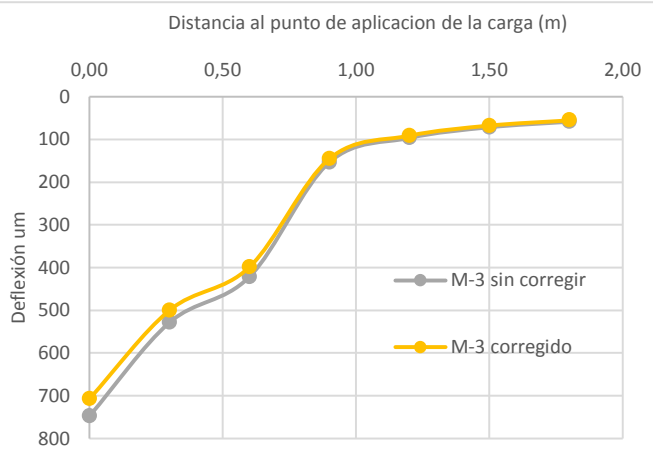
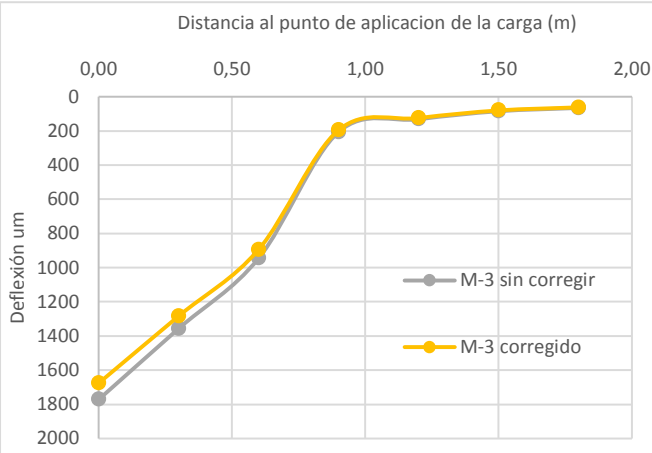
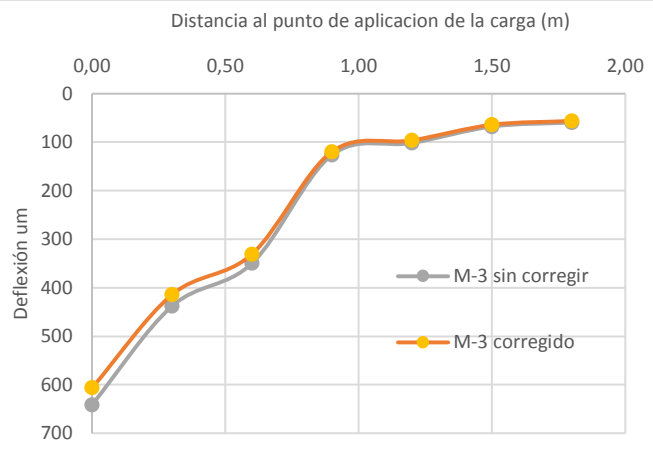
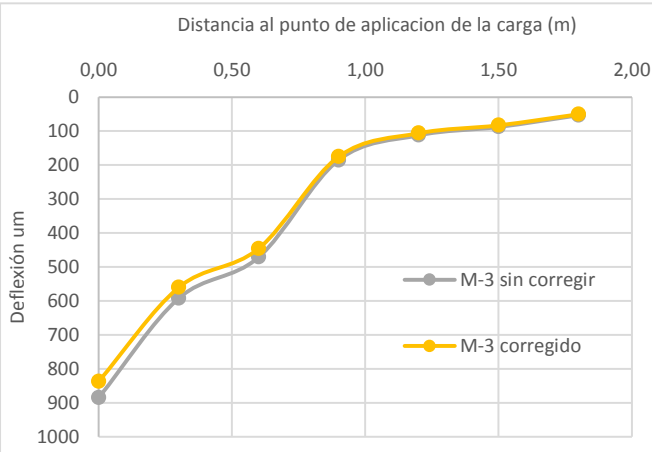
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo M-3



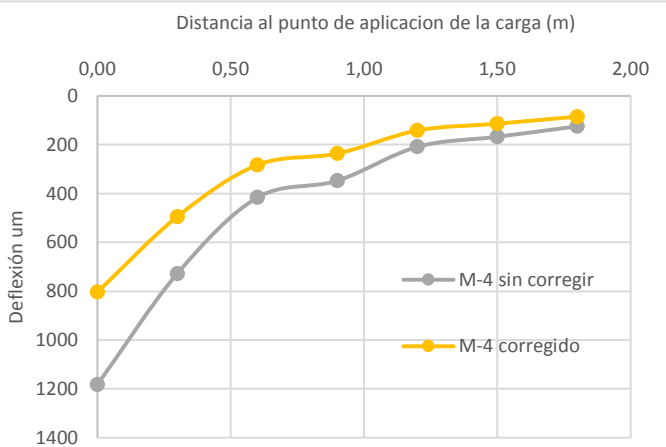
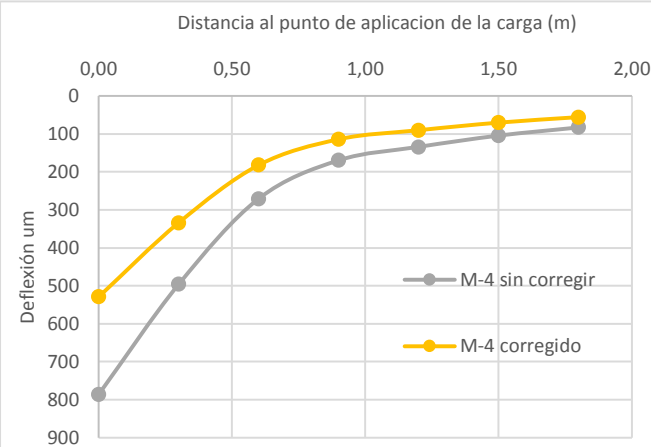
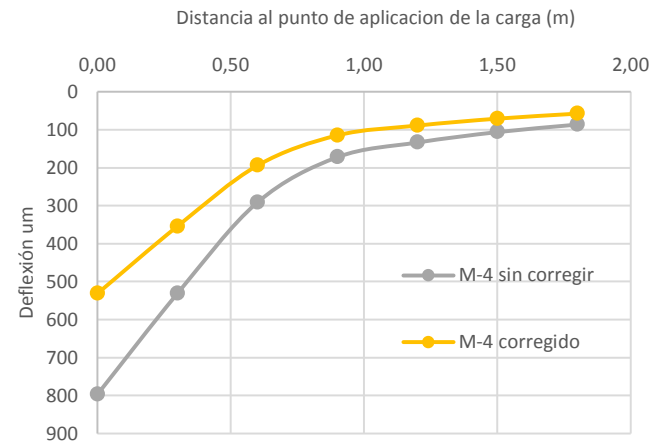
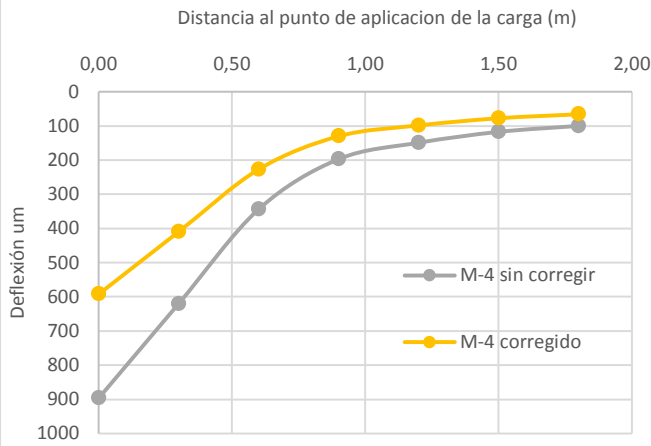
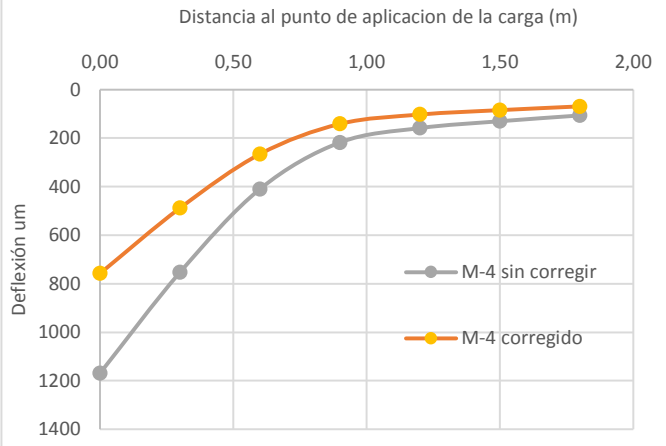
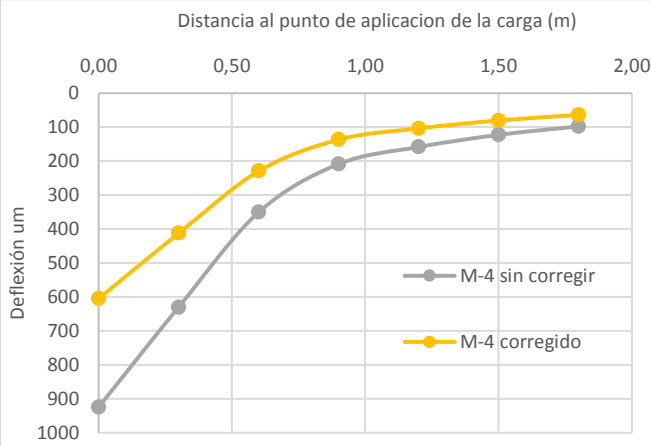
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de cuencos de deflexión medidos en el tramo M-4



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



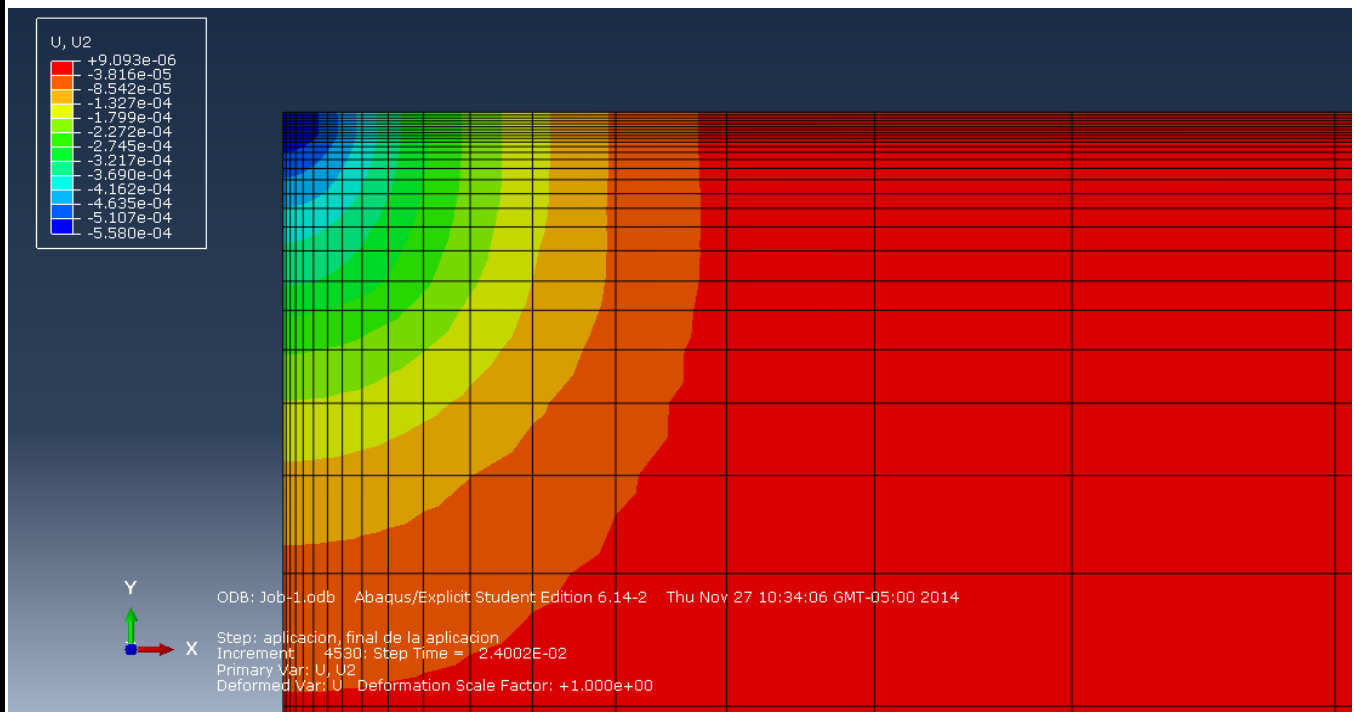
| EJEMPLO CÁLCULOS TRAMO M-4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|----------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Deflexión medida en cada geofono (m) | | | | | | | Parametros del cuenco de deflexión (m) | | | | | Cálculos YONAPAVE | | | | | | | |
| 0 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | Area | SCI | BDI | BCI | D0 | Area (In) | A | B | m | n | lo | Esr (Mpa) | Esr corregido (Mpa) |
| -0,000758 | -0,000488 | -0,000265 | -0,000141 | -0,000103 | -0,000084 | -0,000069 | 476,190670 | 0,000270 | 0,000223 | 0,000124 | 0,000758 | 19,047627 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 20,454270 | 43,520092 | 32,640069 |
| -0,000605 | -0,000412 | -0,000229 | -0,000137 | -0,000104 | -0,000080 | -0,000064 | 502,127987 | 0,000193 | 0,000183 | 0,000093 | 0,000605 | 20,085119 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 22,794195 | 49,511988 | 37,133991 |
| -0,000592 | -0,000410 | -0,000227 | -0,000130 | -0,000099 | -0,000078 | -0,000066 | 505,567486 | 0,000183 | 0,000183 | 0,000097 | 0,000592 | 20,222699 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 23,123958 | 49,920074 | 37,440056 |
| -0,000531 | -0,000354 | -0,000194 | -0,000115 | -0,000089 | -0,000071 | -0,000058 | 492,204106 | 0,000177 | 0,000160 | 0,000079 | 0,000531 | 19,688164 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 21,868861 | 58,468480 | 43,851360 |
| -0,000529 | -0,000334 | -0,000182 | -0,000114 | -0,000090 | -0,000070 | -0,000056 | 475,000312 | 0,000195 | 0,000152 | 0,000068 | 0,000529 | 19,000012 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 20,352845 | 62,578582 | 46,933937 |
| -0,000803 | -0,000494 | -0,000283 | -0,000236 | -0,000142 | -0,000114 | -0,000085 | 484,232314 | 0,000309 | 0,000211 | 0,000047 | 0,000803 | 19,369293 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 21,152827 | 39,845188 | 29,883891 |
| -0,000706 | -0,000522 | -0,000298 | -0,000182 | -0,000137 | -0,000104 | -0,000077 | 537,082977 | 0,000184 | 0,000224 | 0,000116 | 0,000706 | 21,483319 | 3,691000 | 0,094800 | 1152,100000 | -0,878200 | 28,290218 | 32,506185 | 24,379639 |
| -0,000876 | -0,000606 | -0,000341 | -0,000189 | -0,000139 | -0,000106 | -0,000081 | 506,949445 | 0,000270 | 0,000265 | 0,000152 | 0,000876 | 20,277978 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 23,257794 | 33,593921 | 25,195441 |
| -0,000891 | -0,000620 | -0,000343 | -0,000185 | -0,000135 | -0,000106 | -0,000081 | 505,158078 | 0,000271 | 0,000277 | 0,000158 | 0,000891 | 20,206323 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 23,084457 | 33,242803 | 24,932103 |
| -0,000909 | -0,000622 | -0,000401 | -0,000280 | -0,000141 | -0,000106 | -0,000075 | 533,496710 | 0,000288 | 0,000221 | 0,000120 | 0,000909 | 21,339868 | 3,691000 | 0,094800 | 1152,100000 | -0,878200 | 27,908099 | 25,534321 | 19,150741 |
| -0,000717 | -0,000487 | -0,000259 | -0,000107 | -0,000079 | -0,000073 | -0,000055 | 484,761920 | 0,000230 | 0,000228 | 0,000153 | 0,000717 | 19,390477 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 21,199661 | 44,567312 | 33,425484 |
| -0,000845 | -0,000547 | -0,000299 | -0,000174 | -0,000130 | -0,000095 | -0,000072 | 480,983643 | 0,000299 | 0,000247 | 0,000125 | 0,000845 | 19,239346 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 20,867796 | 38,327976 | 28,745982 |
| -0,000673 | -0,000447 | -0,000243 | -0,000146 | -0,000112 | -0,000087 | -0,000062 | 489,736647 | 0,000227 | 0,000203 | 0,000098 | 0,000673 | 19,589466 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 21,644679 | 46,563809 | 34,922857 |
| -0,000823 | -0,000562 | -0,000309 | -0,000167 | -0,000121 | -0,000094 | -0,000068 | 497,825308 | 0,000261 | 0,000254 | 0,000142 | 0,000823 | 19,913012 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 22,388287 | 36,962433 | 27,721824 |
| -0,000645 | -0,000439 | -0,000243 | -0,000146 | -0,000111 | -0,000087 | -0,000066 | 501,084649 | 0,000207 | 0,000195 | 0,000097 | 0,000645 | 20,043386 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 22,695097 | 46,592311 | 34,944233 |
| -0,000641 | -0,000449 | -0,000256 | -0,000158 | -0,000117 | -0,000090 | -0,000073 | 516,621214 | 0,000192 | 0,000193 | 0,000098 | 0,000641 | 20,664849 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 24,216388 | 44,298284 | 33,223713 |
| -0,000611 | -0,000458 | -0,000263 | -0,000162 | -0,000120 | -0,000091 | -0,000071 | 543,772788 | 0,000153 | 0,000195 | 0,000102 | 0,000611 | 21,750912 | 3,691000 | 0,094800 | 1152,100000 | -0,878200 | 29,017057 | 36,700481 | 27,525361 |
| -0,000751 | -0,000515 | -0,000287 | -0,000160 | -0,000118 | -0,000089 | -0,000068 | 502,554326 | 0,000236 | 0,000227 | 0,000127 | 0,000751 | 20,102173 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 22,834814 | 39,845676 | 29,884257 |
| -0,000683 | -0,000466 | -0,000257 | -0,000141 | -0,000103 | -0,000080 | -0,000064 | 498,654428 | 0,000217 | 0,000210 | 0,000116 | 0,000683 | 19,946177 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 22,465938 | 44,406191 | 33,304643 |
| -0,000565 | -0,000343 | -0,000186 | -0,000112 | -0,000085 | -0,000067 | -0,000051 | 459,870610 | 0,000223 | 0,000157 | 0,000074 | 0,000565 | 18,394824 | 2,371000 | 0,109600 | 1344,200000 | -0,894500 | 17,803313 | 67,849239 | 50,886929 |

| EJEMPLO CÁLCULOS TRAMO R-1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|----------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Deflexión medida en cada geofono (m) | | | | | | | Parametros del cuenco de deflexión (m) | | | | | Cálculos YONAPAVE | | | | | | | |
| 0 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | Area | SCI | BDI | BCI | D0 | Area (ln) | A | B | m | n | lo | Esr (Mpa) | Esr corregido (Mpa) |
| -0,000292 | -0,000207 | -0,000176 | -0,000113 | -0,000089 | -0,000069 | -0,000054 | 601,735166 | 0,000085 | 0,000031 | 0,000063 | 0,000292 | 24,069407 | 3,275000 | 0,103900 | 926,900000 | -0,859500 | 39,930052 | 50,053184 | 37,539888 |
| -0,000453 | -0,000332 | -0,000277 | -0,000154 | -0,000112 | -0,000090 | -0,000072 | 603,631088 | 0,000121 | 0,000055 | 0,000123 | 0,000453 | 24,145244 | 3,275000 | 0,103900 | 926,900000 | -0,859500 | 40,245922 | 32,020049 | 24,015037 |
| -0,000763 | -0,000463 | -0,000270 | -0,000175 | -0,000136 | -0,000114 | -0,000073 | 472,275304 | 0,000301 | 0,000193 | 0,000095 | 0,000763 | 18,891012 | 2,371000 | 0,109600 | 1344,200000 | -0,894500 | 18,798306 | 47,866785 | 35,900089 |
| -0,000296 | -0,000213 | -0,000178 | -0,000108 | -0,000088 | -0,000074 | -0,000063 | 599,975470 | 0,000084 | 0,000035 | 0,000070 | 0,000296 | 23,999019 | 3,275000 | 0,103900 | 926,900000 | -0,859500 | 39,639097 | 49,620065 | 37,215049 |
| -0,000427 | -0,000241 | -0,000149 | -0,000108 | -0,000094 | -0,000079 | -0,000065 | 461,472293 | 0,000186 | 0,000092 | 0,000041 | 0,000427 | 18,458892 | 2,371000 | 0,109600 | 1344,200000 | -0,894500 | 17,928764 | 89,184108 | 66,888081 |
| -0,000430 | -0,000272 | -0,000229 | -0,000141 | -0,000104 | -0,000084 | -0,000070 | 548,635698 | 0,000158 | 0,000043 | 0,000089 | 0,000430 | 21,945428 | 3,691000 | 0,094800 | 1152,100000 | -0,878200 | 29,557100 | 51,330124 | 38,497593 |
| -0,000324 | -0,000227 | -0,000186 | -0,000107 | -0,000087 | -0,000072 | -0,000061 | 582,142665 | 0,000097 | 0,000041 | 0,000079 | 0,000324 | 23,285707 | 3,275000 | 0,103900 | 926,900000 | -0,859500 | 36,807543 | 48,303744 | 36,227808 |
| -0,000507 | -0,000356 | -0,000292 | -0,000167 | -0,000125 | -0,000097 | -0,000076 | 582,857802 | 0,000151 | 0,000064 | 0,000125 | 0,000507 | 23,314312 | 3,275000 | 0,103900 | 926,900000 | -0,859500 | 36,917101 | 30,837884 | 23,128413 |
| -0,000485 | -0,000335 | -0,000277 | -0,000156 | -0,000122 | -0,000097 | -0,000080 | 577,288558 | 0,000150 | 0,000058 | 0,000121 | 0,000485 | 23,091542 | 3,275000 | 0,103900 | 926,900000 | -0,859500 | 36,072439 | 32,888750 | 24,666562 |
| -0,000006 | -0,000269 | -0,000212 | -0,000124 | -0,000104 | -0,000086 | -0,000069 | 510,893102 | 0,000183 | 0,000056 | 0,000088 | 0,000452 | 20,435724 | 2,800000 | 0,104400 | 1277,600000 | -0,886700 | 23,643991 | 64,211228 | 48,158421 |
| -0,000460 | -0,000287 | -0,000232 | -0,000137 | -0,000106 | -0,000087 | -0,000075 | 533,023793 | 0,000173 | 0,000056 | 0,000094 | 0,000460 | 21,320952 | 3,691000 | 0,094800 | 1152,100000 | -0,878200 | 27,858097 | 50,540184 | 37,905138 |
| -0,000427 | -0,000289 | -0,000236 | -0,000128 | -0,000102 | -0,000088 | -0,000077 | 563,604637 | 0,000138 | 0,000053 | 0,000108 | 0,000427 | 22,544185 | 3,691000 | 0,094800 | 1152,100000 | -0,878200 | 31,283356 | 49,214305 | 36,910729 |

Ejemplos de Resultados ABAQUS tramo B-2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Ejemplos de Resultados ABAQUS tramo B-2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

