

Universidad Santo Tomás
Maestría en Infraestructura Vial

Ing. Oscar Fabricio cruz rubio

Ing. Freddy Arturo Ocaña Ortiz

**Evaluación estructural de pavimentos flexibles contruidos en la localidad de Usme
utilizando el deflectómetro de impacto o FWD**

Bogotá D.C., Colombia, 24 de abril de 2019

Universidad Santo Tomas
Maestría en Infraestructura Vial

Ing. Oscar Fabricio cruz rubio

Ing. Freddy Arturo Ocaña Ortiz

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magister en
Infraestructura Vial

Director de proyecto: Ing. Juan Miguel Sánchez Duran

Evaluación estructural de pavimentos flexibles construidos en la localidad de Usme
utilizando el deflectómetro de impacto o FWD

Bogotá D.C., Colombia, 24 de abril de 2019

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. abril de 2019

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento

Le agradezco principalmente a mi padre celestial Jesús, el cual confió y dejó todo en su voluntad, por el cual todo mis logros y proyectos van de su mano sagrada.

También a mi familia, mi madre Librada Rubio, mi padre Edgar Cruz, los cuales son mi norte y apoyo, y quienes me han enseñado a soñar y luchar por mis sueños, a mi hijo Juan Diego, quien es mi motor para seguir adelante, el que me ha enseñado amar sin condiciones, por el cual he vivido la mejor etapa de mi vida al lado suyo, a mi hermano Henry porque siempre fue mi guía a y ejemplo.

OSCAR FABRICIO CRUZ RUBIO

En primer lugar, a Dios por guiarme en mi camino, después a mis padres Martha Ortiz y Carlos Ocaña, ya que con sus valores han forjado en mí un gran profesional, a mi esposa; Julieth Martínez, gran apoyo en mi vida y a todas aquellas personas que tuvieron una palabra de aliento cuando más lo necesité infinitas gracias.

FREDDY ARTURO OCAÑA ORTIZ

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

A Itineris Gestión de Infraestructura S.A.S., quien nos brindó todo el apoyo logístico y de equipos para la realización del laboratorio FWD y a quienes compartimos los resultados de nuestra tesis y al Ingeniero Juan Miguel Sánchez quien nos compartió sus conocimientos y experiencia para llevar a buen término nuestro proyecto.

RESUMEN

El análisis de los comportamientos estructurales en pavimentos flexibles para las vías secundarias locales en la ciudad de Bogotá, no ha tenido un control o importancia suficiente por parte de los Entes encargados en su etapa de servicio, es posible notarlo en el estado de la malla vial secundaria de la ciudad de Bogotá, donde actualmente el 62% de la malla vial local se encuentra en mal o regular estado (IDU, 2018¹); de este indicador se puede deducir que estos tipos de pavimentos no han sido intervenidos adecuadamente desde su construcción, presentando diferentes tipos de deterioro. Es así que para este estudio se realizó un análisis a ocho (8) vías de la localidad 5 de Usme, las cuales se construyeron con estructuras de pavimentos convencionales (bases granulares y sub-bases granulares) y otras que se intervinieron con materiales reciclados como lo es el asfalto reciclado – RAP.

Considerando que generalmente la medición de la capacidad estructural de un pavimento existente, requiere de procesos destructivos en la vía, lo que altera el equilibrio del sistema pavimento-subrasante y produce un daño mayor al examinar o analizar los pavimentos; se ha optado últimamente por realizar técnicas para ensayos de alto rendimiento, conocidas como pruebas NO DESTRUCTIVAS (Non Destructive Test, NDT); entre estos ensayos se destaca la utilización del deflectómetro de impacto FWD (Falling Weight Deflectometer)., cuya función es la de analizar la condición estructural de los pavimentos mediante la interpretación de las deflexiones producidas bajo cargas dinámicas que simulan el efecto del tránsito. Por este motivo, agencias dedicadas a la investigación, como la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Washington State Department of Transportation (WSDOT), han establecido modelos matemáticos para correlacionar (retro cálculos o retro

¹ Fuente: Estado de la Malla Vial - 2018 – II (IDU), <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/innovacion/portafolio>

análisis) dichas tecnologías a través de parámetros o indicadores de estado del pavimento, mediante la obtención de módulos y números estructurales y con lo que se pretende analizar estos pavimentos existentes en la localidad 5 de Usme, lo que permitirá establecer y comparar el comportamiento estructural de pavimentos a base de materiales reciclados con pavimentos a base de materiales convencionales.

ABSTRACT

The analysis of the structural behaviors in flexible pavements for the local secondary roads in the city of Bogotá, has not had enough control or importance on the part of the Entities in charge in its service stage, it is possible to notice it in the state of the road network secondary school in the city of Bogotá, where currently 62% of the local road network is in poor or regular state (IDU, 2018); From this indicator it can be deduced that these types of pavements have not been adequately intervened since their construction, presenting different types of deterioration. Thus, for this study an analysis was made to eight (8) roads of the Usme location 5, which were built with conventional pavement structures (granular bases and granular sub-bases) and others that were intervened with recycled materials such as it is the recycled asphalt - RAP.

Considering that generally the measurement of the structural capacity of an existing pavement requires destructive processes on the road, which alters the balance of the pavement-subgrade system and produces greater damage when examining or analyzing the pavements; we have recently chosen to perform techniques for high performance tests, known as NON DESTRUCTIVE tests (Non Destructive Test, NDT); Among these tests, the use of the FWD (Falling Weight Deflectometer) deflectometer is highlighted, whose function is to analyze the

structural condition of the pavements by interpreting the deflections produced under dynamic loads that simulate the effect of traffic. For this reason, research agencies, such as the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) and the Washington State Department of Transportation (WSDOT), have established mathematical models to correlate (retro calculations or retro-analysis) these technologies to through parameters or indicators of pavement status, by obtaining modules and structural numbers and what is intended to analyze these existing pavements in the location 5 of Usme, which will establish and compare the structural behavior of pavements based on materials recycled with pavements based on conventional materials.

Contenido

RESUMEN.....	6
Tabla de Imágenes.....	11
Lista de Tablas	13
Capítulo I: Introducción	16
Capítulo II: Objetivos.....	18
2.1. Objetivo General	18
2.2. Objetivos específicos	18
Capítulo III: Estado del arte	19
Capítulo IV: Marco teórico	34
4.1. Deflexión de un pavimento	34
4.2. Deflectometría.....	34
4.3. Criterios básicos para el retrocálculo de estructuras de pavimento flexible	42
4.4. Retrocálculo	47
Capítulo V: Metodología.....	67
5.1. Recopilación de la información	69
5.2. Trabajo de campo.....	70
5.3. Realización del ensayo IN SITU.....	76
Capítulo VI: Procedimiento	80

6.1.	Cálculos para la implementación de los métodos AASHTO, LUKANEN y YONAPAVE.....	80
6.2.	Aplicación de los métodos seleccionados procedimiento método AASHTO	89
6.3.	Procedimiento método LUKANEN	93
6.4.	Procedimiento método YONAPAVE	99
6.5.	Procedimiento software BAKFAA	101
Capítulo VII: Análisis		105
7.1.	Módulos Resilientes (Mrr).....	105
7.1.1.	Análisis módulo resiliente métodos LUKANEN, AASHTO, YONAPAVE y programa BAKFAA para los CIV medidos.....	105
7.2.	Numero Estructural (SN)	109
7.2.1.	Análisis números estructurales métodos LUKANEN, AASHTO y YONAPAVE para los CIV medidos.....	109
7.3.	Análisis de datos de las deflexiones centrales (d0), SCI, BDI y BCI a partir de los cuencos de deflexiones	112
7.4.	Análisis del cuenco de deflexiones	115
7.5.	Análisis de Costos.....	118
8.	CONCLUSIONES	122
9.	Aportes	126
10.	BIBLIOGRAFIA.....	127

Tabla de Imágenes

Imagen 1 Cuenca de deflexión dinámica.	21
Imagen 2 Estructura de pavimento flexible con geotextil NT.	22
Imagen 3 Variabilidad de espesores entre pavimentos existentes y nuevos.	23
Imagen 4 Variabilidad de deflexiones medida en metros.	23
Imagen 5 Prueba FWD para pavimentos flexibles.....	24
Imagen 6 Variabilidad de deflexiones medida en metros.	25
Imagen 7 Secuencias de estructuras de pavimentos seleccionadas.....	26
Imagen 8 Pista de prueba.	27
Imagen 9 Deflexiones prueba FWD.....	28
Imagen 10 Perfil de desplazamientos FWD.....	29
Imagen 11 Estructuras de pavimentos seleccionadas.....	30
Imagen 12 Retrocálculo del módulo de capa.	31
Imagen 13 Comparación de variables capas de pavimento flexible halladas con FWD.	32
Imagen 14 <i>Equipo FWD</i>	36
Imagen 15 Zona del cuenco de deflexión.....	38
Imagen 16 deflexión por geófono.	39
Imagen 17 Evaluación de pavimentos con base granular y materiales bituminosos.	40
Imagen 18 Mecanismo de deformación permanente.....	44
Imagen 19 Geometría de modelo de Hogg.	49
Imagen 20 comparación entre los módulos resilientes calculados.....	52
Imagen 21 deflexión en R50.	57
Imagen 22 Determinación de L0.....	59

Imagen 23 Deflectómetro de impacto (FWD) del modelo KUAB 150	70
Imagen 24 Geófono o sensores del equipo	71
Imagen 25 Estructura Pavimento con RAP estabilizado.....	72
Imagen 26 Vías evaluadas con estructura de RAP estabilizado.	73
Imagen 27 Estructura Pavimento con materiales pétreos. Estructura 1	74
Imagen 28 Vías evaluadas con estructura de materiales pétreos.	74
Imagen 30 Vías evaluadas con estructura de materiales pétreos y mejoramiento con piedra rajón.	75
Imagen 31 Estructuras evaluadas.	76
Imagen 32 Localización toma de deflexiones Pavimentos reciclados	77
Imagen 33 Localización toma de deflexiones Pavimentos Granulares.....	77
Imagen 34 Vías evaluadas con deflectómetro de impacto FWD – Usme.....	79
Imagen 35 Cuenco de deflexión CIV5007879.....	81
Imagen 36 Cuenco de deflexiones para PG1	82
Imagen 37 Cuenco de deflexiones para PR3.....	83
Imagen 38 Cuenco de deflexiones para PR2.....	84
Imagen 39 Cuenco de deflexiones para PR1.....	85
Imagen 40 Cuenco de deflexiones para PG2	86
Imagen 41 Cuenco de deflexiones para PGr2	87
Imagen 42 Cuenco de deflexiones para PGr1	88
Imagen 43 Cuenco de deflexiones para PGr3	89
Imagen 44 ingreso de datos crudos al programa.	102
Imagen 45 Ingreso de relación de Poisson materiales del pavimento.....	102

Imagen 46 ingreso de Características de las capas del pavimento.....	102
Imagen 47 Ingreso de datos del equipo FWD.....	103
Imagen 48 Ingreso de espesores de las capas del pavimento.....	103
Imagen 49 Retrocálculo por medio de programa Bakfaa.....	104
Imagen 50. Comparación estructuras seleccionadas parámetro AREA.....	117
Imagen 51 comparación costos estructuras evaluadas.	120
Imagen 52 Porcentaje de costo de construcción.....	121

Lista de Tablas

Tabla 1 Análisis de retrocálculo.....	48
Tabla 2 Factor de corrección a las capas de pavimentos evaluados.	55
Tabla 3 coeficientes para el modelo de Hogg $Dr/D0$, A, B, y C.....	58
Tabla 4 coeficientes para el modelo de Hogg Variables X y Y.	60
Tabla 5 Coeficientes para el modelo de Hogg parámetro M.	61
Tabla 6 coeficientes para el modelo de Hogg, Parámetros I y K.	62
Tabla 7 Rangos del área para la relación $h/10$	65
Tabla 8 Coeficientes de ajuste de curvas para determinar la longitud característica.	65
Tabla 9 Coeficientes de ajuste de curvas para determinar el módulo equivalente de la subrasante.....	66
Tabla 10 Distribución de los geófonos o sensores del equipo FDW.	70
Tabla 11 CIV'S RAP Estabilizado evaluados con deflectometría.....	71
Tabla 12 CIV'S a base de agregados pétreos evaluados con deflectometría.	73
Tabla 13 Datos crudos abscisa k 0+ 00, CIV 5007879, PG1.....	80

Tabla 14 Datos con carga estandarizada a 40 KN.....	80
Tabla 15 Promedio de deflexiones	81
Tabla 16 Promedio de deflexiones en la abscisa k0 + 00 en sistema ingles CIV 5007879	89
Tabla 17 Promedio de deflexiones en la abscisa k0 + 00 en sistema ingles	90
Tabla 18 Módulo resiliente por Retrocálculo en la abscisa k0+00 en cada punto r medido....	90
Tabla 19 Modulo elástico del pavimento en la abscisa k0+00 en cada punto r medido.	91
Tabla 20 Numero estructural del pavimento en la abscisa k0+00 en cada punto r medido.	92
Tabla 21 Módulo resiliente corregido en la abscisa k0+00 en cada distancia (r) medido	92
Tabla 22 Bulbo de tensión en la interface subrasante-pavimento en la abscisa k0+00.	93
Tabla 23 70% del bulbo de tensión en la interface subrasante-pavimento en la abscisa k0+00.	93
Tabla 24 Coeficiente de Hogg.....	93
Tabla 25 Datos crudos CIV 50007879 - Código PG1.....	94
Tabla 26 Datos crudos deflexiones en cm y carga en Kg CIV 5007879 - Código PG1.	94
Tabla 27 resultados relación Dr/Do para PG1	94
Tabla 28 Datos calculados r50 CIV 5007879 - código PG1.....	95
Tabla 29 Datos calculados D30 - CIV 5007879 - código PG1.	96
Tabla 30 Datos calculados S0/S CIV 5007879 - código PG1.....	97
Tabla 31 Datos calculados Mrr CIV 5007879 - código PG1.	98
Tabla 32 Datos calculados SNeF CIV 5007879 - Código PG1.	99
Tabla 33 Coeficientes de ajuste de curvas para determinar la longitud característica.....	99
Tabla 34 Calculo área del cuenco de deflexiones CIV 5007879 Abscisa k0+00	100
Tabla 35Calculo longitud característica CIV 5007879 Abscisa k0+00.	100

Tabla 36 Calculo Modulo resiliente por retrocálculo CIV 5007879 Abscisa k0+00.....	101
Tabla 37 número estructural efectivo CIV 5007879 Abscisa k0+00.....	101
Tabla 38. Módulos resilientes teóricos de diseño de la estructura Granular, Rap y Granulares con Rajón.	105
Tabla 39 Análisis comparativo de módulos resilientes.....	106
Tabla 40 Comparación de módulos en las capas de los pavimentos evaluados.....	108
Tabla 41. Calculo Número estructural teórico estructura Granulares.....	109
Tabla 42. Calculo Número estructural teórico estructura RAP.....	109
Tabla 43. Calculo Número estructural teórico estructura Granulares con Rajón.....	110
Tabla 44 Comparación Números Estructurales.....	110
Tabla 45 Parámetro de cotejo para determinar el estado de las estructuras.	113
Tabla 46 Evaluación de parámetros D0, SCI, BDI y BCI.	113
Tabla 47. Parámetros de evaluación indicador AREA en cuenco de deflexiones.	116
Tabla 48. Selección de estructuras para evaluación de parámetro AREA.....	116
Tabla 49 Comparación de áreas en pavimentos reciclados vs convencionales.....	118
Tabla 50 Costos estructuras PG, PGr y PR.	118

Capítulo I: Introducción

Durante los últimos años en la ciudad de Bogotá, se ha venido implementando para la construcción y rehabilitación de vías secundarias, materiales alternativos y/o reciclados tales como asfaltos reciclados (RAP), losas de concreto entre otros, que al final terminan haciendo un papel importante al sustituir los conocidos materiales convencionales tales como los agregados pétreos Bases y Sub-bases granulares, producto de la explotación de canteras. Este trabajo buscó realizar una comparación en tres (3) tipos de vías de pavimento flexible rehabilitadas con las mismas condiciones de tráfico y sector, las cuales fueron construidas con materiales convencionales (Bases granulares, Sub-bases granulares y piedra rajón) y otras con materiales reciclados (pavimentos de asfaltos reciclados); esta comparación se hizo realizando un ensayo in situ no destructivo FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER), en donde se determinó el comportamiento de las estructuras hallando los módulos resilientes de cada pavimento y números estructurales efectivos de la subrasante, realizando un muestreo de las deflexiones que generó una carga de 40 kN halladas por distintos sensores dispuestos en el deflectómetro de impacto.

Para la determinación de los módulos resilientes (M_r) y números estructurales (S_n) fue necesario la utilización de metodologías de retrocálculo y software especializados. En este documento se ejecutaron retrocálculos por los métodos AASHTO, YONAPAVE Y LUKANEN de forma analítica y mediante el programa de retrocálculo BAKFFA de U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION / FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, los cuales se compararon con módulos y números estructurales hallados con parámetros teóricos.

Se seleccionaron ocho (8) vías ubicadas en Bogotá exactamente en la localidad de Usme, identificadas cada una con un Código de Identificación vial (CIV); dos CIV diseñados por capas de Base y Sub-base granular (PG1 y PG2), tres CIV diseñados con material de RAP (PR1, PR2 y

PR3) y tres CIV diseñados con base y sub-base granular con un mejoramiento de rajón (PGr1, PGr2 y PGr3); en estas vías se analizaron las deflexiones obtenidas realizando los cuencos generados en cada uno de los 35 puntos tomados; además se realizó un análisis del costo aproximado por metro cuadrado (m²) de los tres tipos de estructuras.

Con lo anterior, se determinó la viabilidad de utilizar materiales reciclados con menores espesores en las estructuras de pavimentos, los cuales influyen de manera concluyente en el comportamiento estructural e implementación para su uso en la rehabilitación y construcción de vías secundarias en Bogotá.

Capítulo II: Objetivos

2.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de los comportamientos estructurales de pavimentos flexibles a base de agregados pétreos (bases granulares, sub bases granulares) y RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) para ocho vías secundarias ubicadas en la Localidad de Usme, UPZ Alfonso López, basado en un estudio de deflexiones obtenidas con el deflectómetro de carga dinámica de impacto (FWD) con el fin de determinar los impactos en términos constructivos y económicos de las estructuras.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los cuencos de deflexiones generados a través del análisis de los parámetros de área y deflexiones centrales estableciendo el comportamiento de la estructura.
- Determinar los módulos resilientes y números estructurales de las vías seleccionadas mediante las metodologías de retrocálculo AASHTO, YONAPAVE, LUKANEN y el software BAKFFA, con el fin de determinar el estado actual de la subrasante.
- Realizar una comparación económica por metro cuadrado de las estructuras estudiadas para así determinar cuál de ellas genera menor costo constructivo.

Capítulo III: Estado del arte

La deflexión es el valor del desplazamiento en la superficie del pavimento al aplicarle una carga. El valor de la deflexión depende de una serie de factores, entre los que se destacan: la rigidez y espesor del pavimento, su temperatura, además del soporte del suelo de fundación. Los ensayos de deflectometría se pueden realizar ya sean estáticos o dinámicos con el fin de obtener nuevamente el número estructural de cada una de las capas que componen un pavimento flexible.

En Colombia, en la Universidad Nacional el Ingeniero Octavio Coronado García (2010) realizó una investigación en donde utilizaba la técnica de retro calculo con el fin de conseguir nuevamente el módulo resiliente para poderlo comparar con el hallado en laboratorio. Aquí, él utilizó el deflectómetro, el cual es un equipo que simula mediante un impacto sobre la superficie del pavimento las condiciones de esfuerzo generadas por los vehículos y dentro de su sistema de medición posee una serie de geófonos que le permiten obtener los valores de deflexión superficiales de la estructura por efecto del impacto a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga.

En esta investigación se llegó a la conclusión que el módulo resiliente encontrado en campo y el efectuado mediante retrocálculo no discrepaban mucho. Sin embargo para capas como la subrasante se incrementa en gran proporción. Para la obtención de los módulos se realizaron ensayos FWD (Falling Weight Deflectometer) en diferentes horas con el fin de poder comparar los resultados de los ensayos.

Otro estudio de la Universidad Nacional realizado por el Ingeniero Andrés Giovanni Gutiérrez (2012) en el cual se hizo una evaluación de las estructuras de pavimento flexible de Bogotá utilizando el deflectómetro de Impacto determinó que los valores obtenidos mediante el ensayo

FWD de las mezclas asfálticas y materiales granulares eran mayores a los solicitados en las especificaciones del IDU, además que los materiales granulares de material de base y subbase no se diferenciaban mucho el uno del otro. De acuerdo con lo anterior se observó entonces que en la etapa de diseño no se están optimizando los materiales ya que existe un sobre diseño de los pavimentos. Sucede lo mismo en cuanto al número estructural ya que difiere el valor del ensayo contra el del diseño en más de un 30%.

Las deflexiones como se mencionaba anteriormente se pueden medir mediante un ensayo estático o dinámico y esto fue lo que Bejarano (2013) hizo en las vías adyacentes a la Universidad Nacional en Bogotá con el fin de comparar los resultados que se obtienen en las dos modalidades. Aunque los resultados no se compararon mediante la misma metodología (una con el método de Hogg y otra con la AASHTO) si influyen bastante en las conclusiones a que se llegan. Aquí se observó que los resultados obtenidos mediante la Viga de Benkelman tienden a ser más altos que aquellos que se realizan mediante el FWD pero esto se debe a la diferencia de la ejecución de cada ensayo. Se vio que es de vital importancia tener todos los datos, pero cuando no se cuenta con algunos de ellos como el espesor de las capas existentes el método de HOOG resulta más beneficioso ya que no lo necesita y de acuerdo a los resultados arrojados se debe hacer una corrección por temperatura para que los parámetros puedan ser comparados de mejor manera.

En Australia Ainalem Nega, Hamid Nikraz e Imad L. Al-Qadi (2016) elaboraron un estudio de deflectometría en seis vías de Australia Occidental con el fin de determinar la capacidad estructural de los pavimentos. Aquí algunos de los módulos obtenidos en el ensayo diferían de los que se encontraban en el ensayo en el mismo tramo estudiado y esto se debe a la variación de temperatura, es por ello que se recomendó estudiar los valores obtenidos por medio de un

método estadístico obviamente tomando valores en diferentes secciones de un tramo de vía. A continuación, se muestran algunos parámetros obtenidos:

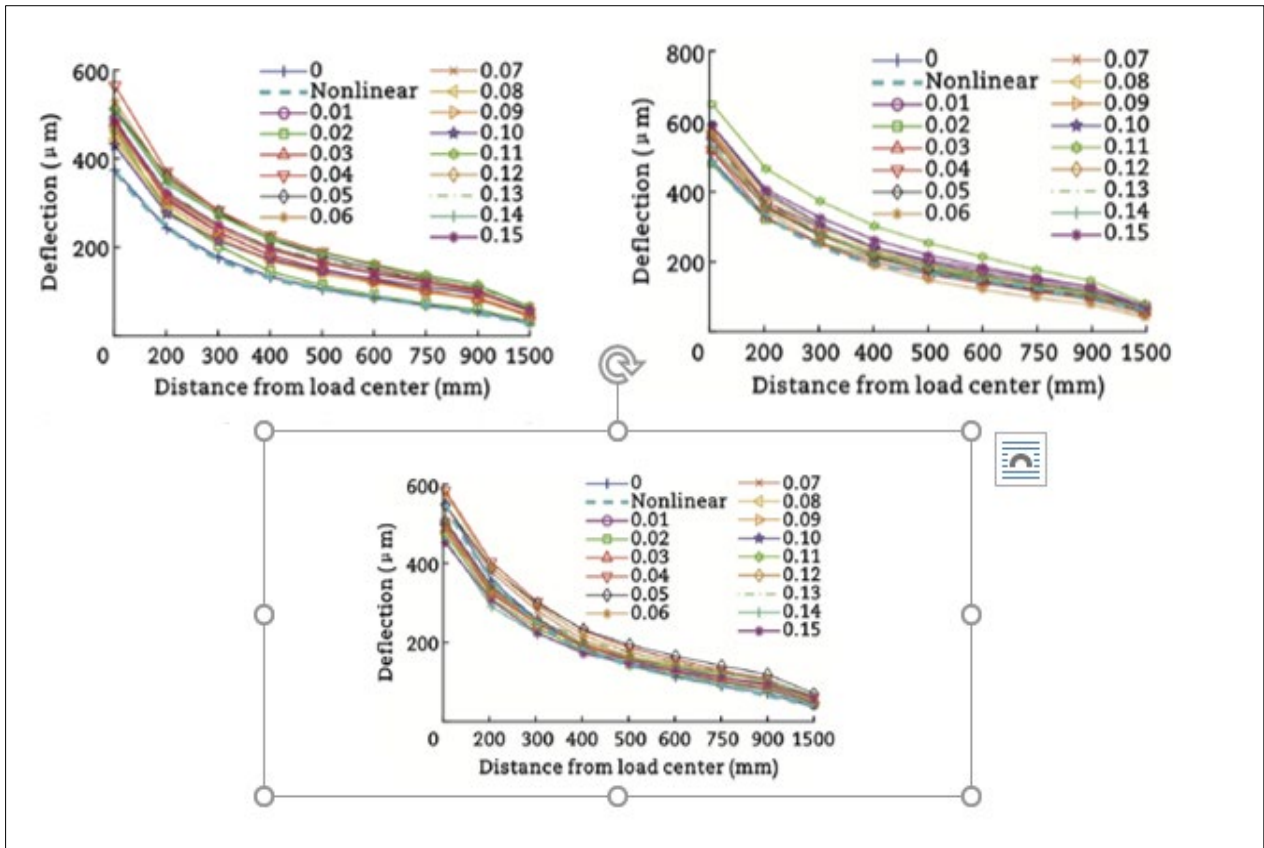


Imagen 1 Cuenca de deflexión dinámica.
Autor: Ainalem Nega, Hamid Nikraz e Imad L. Al-Qadi (2016)

Un estudio más hecho en Rusia por Maria J. Sulewskaa y Grzegorz Bartnikb (2017) mediante la metodología FWD se realizó en pavimentos flexibles en donde su estructura la conformaban capas granulares y un geotextil no tejido que servía como mejorador de la subrasante. Cabe resaltar que aquí se modeló simplemente la estructura anteriormente mencionada así:

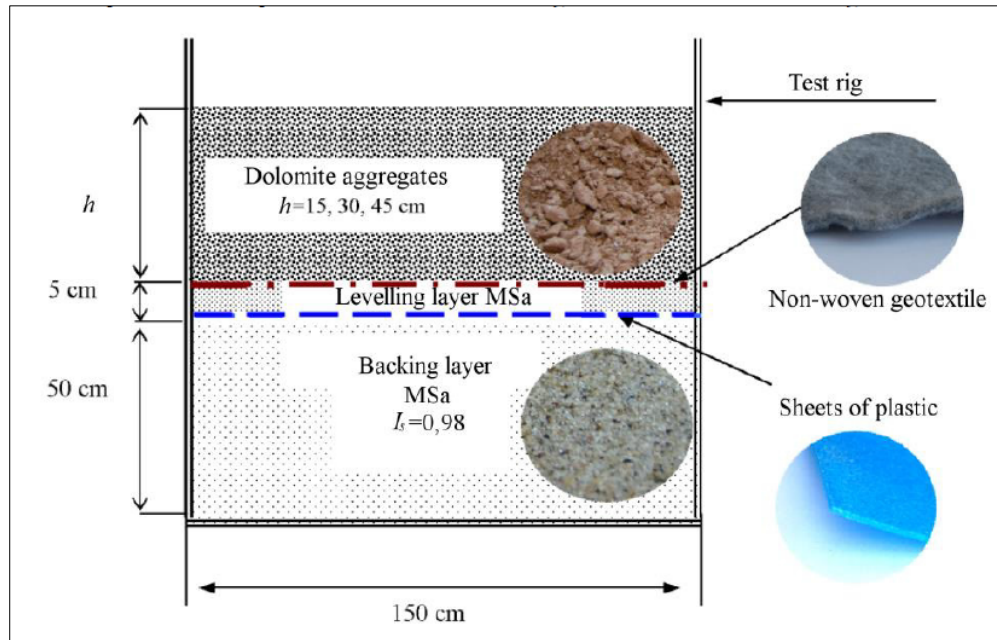


Imagen 2 Estructura de pavimento flexible con geotextil NT.
 Autor: Maria J. Sulewskaa y Grzegorz Bartnikb (2017)

Se intentó modelar lo anterior, sin embargo, las deflexiones generadas fueron altas y los resultados no trascendieron ya que las diferencias entre las pruebas de carga generadas discrepaban hasta de un 25%.

En España se hicieron dos tipos de pruebas no destructivas (NDT) en un estudio de caso de un pavimento de carretera flexible rehabilitado, en el que el agrietamiento superficial se produjo solo un año después del refuerzo puntual; la de deflectómetro de caída de peso (FWD) y la de radar de penetración subterránea (GPR) para evaluar la capacidad de carga de un pavimento flexible. Los modelos estructurales se establecieron con base en las deflexiones del FWD y se utilizó el espesor del diseño y el espesor medido de GPR. Los resultados mostraron que la variabilidad de los espesores de las capas era alta y, por lo tanto, el foco principal estaba en la sensibilidad de los módulos elásticos estimados a los espesores de las capas tal cual se muestra a continuación (*Vânia Marecos, Simona Fontul, Maria de Lurdes Antunes, Mercedes Solla; 2016*):

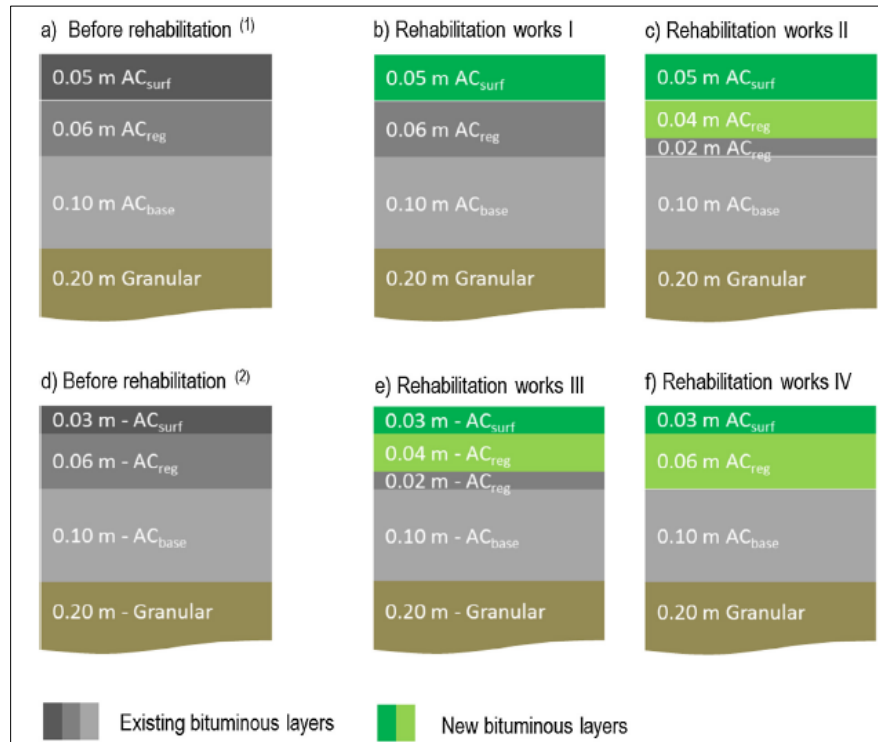


Imagen 3 Variabilidad de espesores entre pavimentos existentes y nuevos.
Autor: Mercedes Solla (2016).

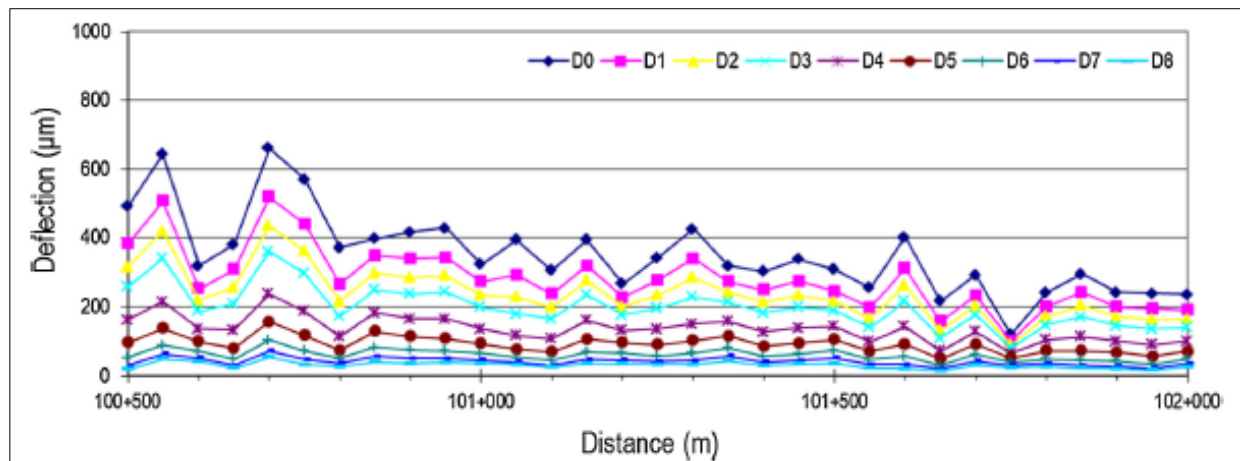


Imagen 4 Variabilidad de deflexiones medida en metros.
Autor: Mercedes Solla (2016).

Se concluyó que el espesor de las capas unidas tenía una gran influencia en los módulos de capas bituminosas estimadas y, en consecuencia, en los modelos de respuesta al pavimento. En cuanto a las capas bituminosas se dieron diferencias de 5% en espesor lo que condujo a cambios de alrededor del 10% en el módulo de capa, mientras que el 30% de las diferencias en espesor dieron variaciones de hasta tres veces sobre el módulo de capa bituminosa estimado.

Otro estudio efectuado en Francia presentó los modelos semi-analíticos y de elementos finitos implementados para estudiar una prueba de deflectómetro de peso descendente conducido a un pavimento flexible. Estos modelos dinámicos tuvieron en cuenta los efectos de la amortiguación de Rayleigh en el suelo y la amortiguación viscosa en materiales bituminosos, con respecto a la temperatura, en la deflexión estructural.

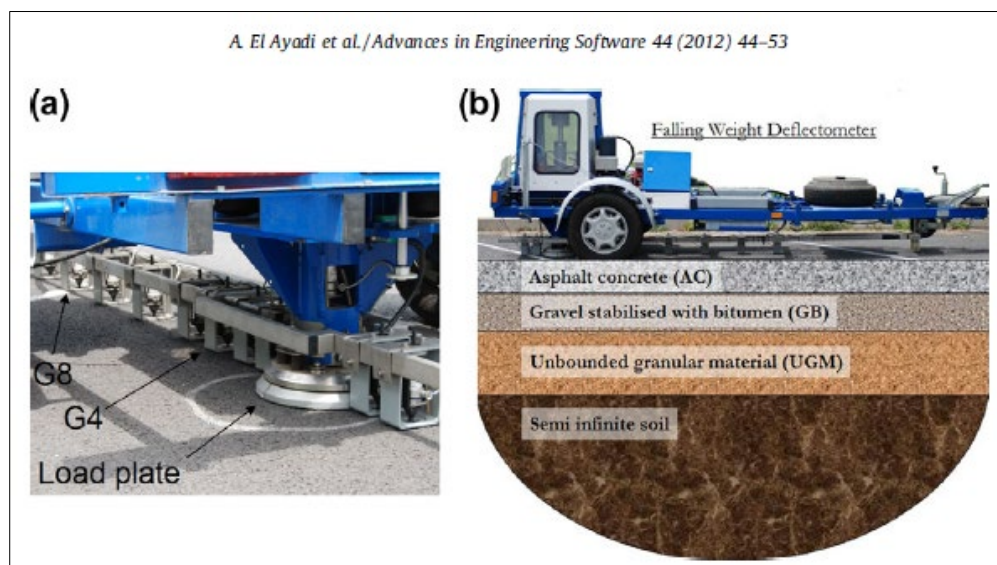


Imagen 5 Prueba FWD para pavimentos flexibles.
Autor: Mercedes Solla (2016).

Los resultados de los modelos numéricos mostraron la importancia de tener en cuenta el efecto de la amortiguación (histéresis o viscoelástica) de todas las capas del pavimento contra la temperatura, la carga y los parámetros mecánicos. El análisis paramétrico se introdujo como base

para el desarrollo futuro de un programa de retroceso dinámico (*El Ayadi, Picoux, Lefeuve-Mesgouez, Mesgouez, y Petit; 2011*).

Los resultados de la comparación de estos métodos numéricos con el ensayo FWD realizado al pavimento se muestran a continuación:

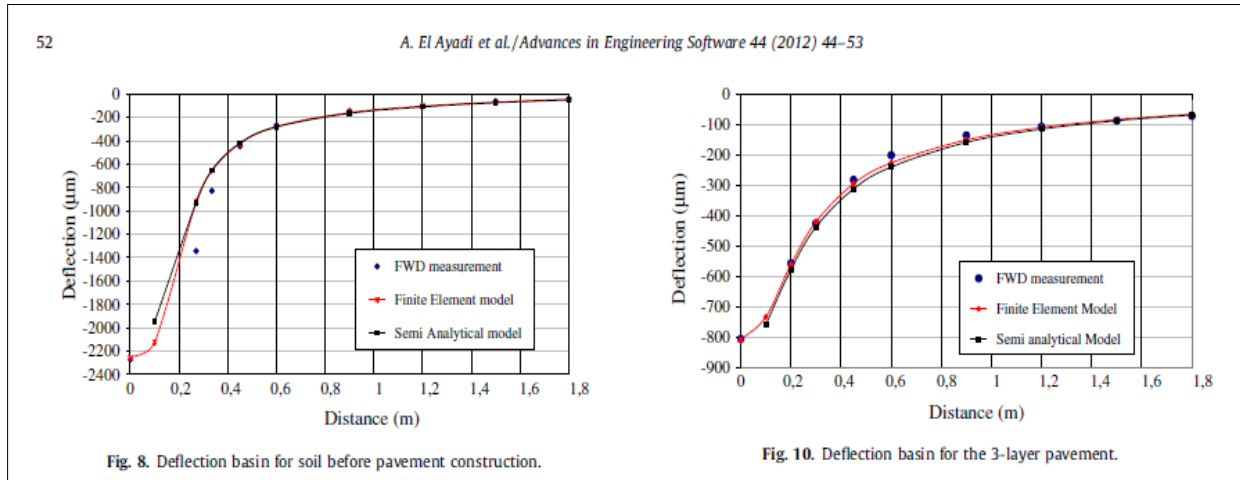


Imagen 6 Variabilidad de deflexiones medida en metros.
 Autor: Ayadi, Picoux, Lefeuve-Mesgouez, Mesgouez, y Petit (2011)

Las gráficas anteriores mostraron que los dos métodos implementados; el semi-analítico, basado en transformadas de Fourier y Hankel y el método de elementos finitos basado en el algoritmo de Newmark, permitieron un estudio preciso y eficiente de la propagación de ondas en la estructura, junto con la posibilidad de incorporar tanto la poro-elasticidad de una capa como la visco elasticidad simulando la carga de impulso FWD más varios tipos de amortiguación, a fin de tener en cuenta en el suelo la disipación de energía y visco elasticidad de material bituminoso.

En Grecia, una investigación centró la evaluación de un pavimento que se sometió a una recuperación de profundidad completa mediante la aplicación de asfalto espumado (FDR-FA). La estructura del pavimento examinado fue reconstruida y operada por un total de cinco años, llevando a cabo un monitoreo programado. La monitorización de la sección investigada se llevó a

cabo in situ mediante mediciones de Deflectómetro de Peso en Caída (FWD) y Radar Penetrante en Tierra (GPR) y se calcularon los módulos de capas de pavimento asfáltico utilizando algoritmos genéticos.

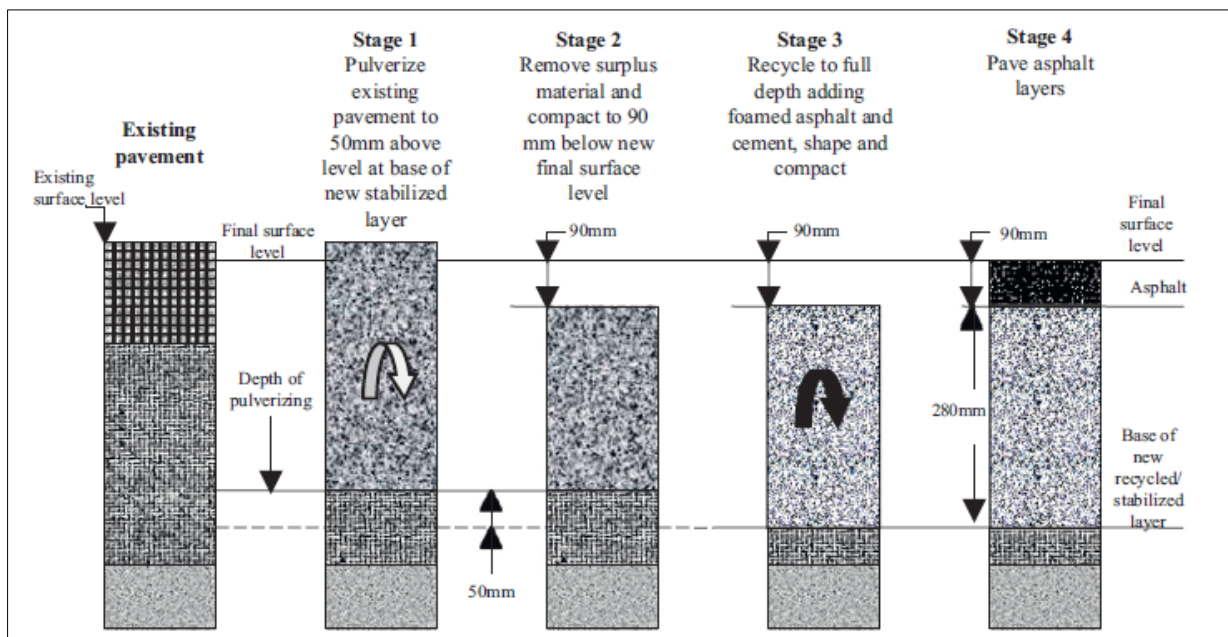


Imagen 7 Secuencias de estructuras de pavimentos seleccionadas.
Autor: Plati, Georgouli ,Cliatt y Loizos (2016).

En conclusión, la investigación de GPR y FWD y los consiguientes resultados de la evaluación parecieron corroborar la adecuación del rendimiento de la técnica FDRFA en relación con su inclusión en estrategias de diseño de pavimentos sostenibles de larga duración (*Plati, Georgouli ,Cliatt y Loizos;2016*).

En otro país de Europa, exactamente en Italia, surgió la opción de mezclar pavimento asfáltico recuperado (RAP) con agregados naturales para construir la capa de subbase en una pista de prueba construida específicamente con el objetivo de analizar el efecto sobre el rendimiento del pavimento de una mezcla de capa base con 50% de agregados naturales y 50% de RAP. La investigación se

basa en el análisis LWD y FWD, comparando los resultados, con los obtenidos en la sección posterior de la pista de prueba hecha de solo agregados naturales.

Figure 2 Vertical layout of the test track.



Imagen 8 Pista de prueba.
Autor: Montepara, Tebaldi, Marradi y Betti; 2012

Las pruebas de FWD llevadas a cabo en diferentes períodos y la aplicación de un nivel de cargas diferentes evidenciaron valores similares de módulos elásticos para la sub-base con RAP y con solo agregados naturales. Además, se pudo reconocer un comportamiento de bajo esfuerzo de endurecimiento realizando pruebas al aplicar diferentes niveles de carga (*Montepara, Tebaldi, Marradi y Betti; 2012*).

Los resultados informados permitieron concluir que, en este caso, la sub-base hizo que la mezcla de RAP con agregados naturales evidenciara los mismos rendimientos a corto y largo plazo, aparentando ser ligeramente más altos aquellas que contenían RAP.

La mayoría de los programas de retrocálculo utilizados para evaluar las propiedades de la capa de pavimento asumen deflexiones estáticas a pesar de que las deflexiones dinámicas se generan a partir del Deflectómetro de Peso en Caída (FWD). Es por ello que en Korea se hizo un estudio que

tuvo como objetivo tener en cuenta los efectos dinámicos de la cuenca de deflexión de la FWD en el procedimiento de retroceso. Se desarrolló un procedimiento de retro cálculo pseudoestático, denominado DYN-BAL (Dynamic BALMAT), para calcular los módulos de capa después de convertir las deflexiones dinámicas en deflexiones estáticas. Se llevaron a cabo pruebas in situ para evaluar la aplicabilidad y fiabilidad del procedimiento de retrocálculo, que acomodaran el efecto dinámico. Las pruebas in situ incluyeron pruebas de FWD en el sitio de instalación de un Deflectómetro de Múltiples Profundidades (MDD) obteniendo los siguientes resultados:

SITE	Time		FWD deflection basin (μm)							Backcalculated modulus (MPa)			
			D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	E1	E2	E3	E4
<i>Tongwha</i>													
1	4/30	Converted	142.8	100.7	77.4	57.6	43.1	32.1	24.3				
	12:00	Calculated	142.8	100.7	77.2	57.8	43.1	32.1	24.2	2505	9396	394	177
		Error (%)	0	0	0.26	-0.35	0	0	0.41				
2	9/5	Converted	158.5	93.4	64.5	44.3	31.1	20.8	13.7				
	14:00	Calculated	158.5	93.1	65.3	44.1	29.8	20.7	14.9	1483	11703	207	277
		Error (%)	0	0.32	-1.23	0.45	4.36	0.48	-8.05				
3	11/27	Converted	95.3	80.5	65.9	52.7	42	33.1	26.2				
	12:30	Calculated	95.3	80.5	65.8	52.9	42	33.2	26.1	11565	11237	564	173
		Error (%)	0	-0.06	0.28	-0.35	0.02	-0.21	0.47				
<i>Kimpo</i>													
4	11/20	Converted	74.5	56.8	46.8	37.1	29	22.7	17.8				
	15:30	Calculated	74.5	56.9	46.6	37.1	29.1	22.7	17.7	4716	18104	335	280
		Error (%)	0	-0.08	0.29	-0.14	-0.29	-0.13	0.51				
5	11/20	Converted	76.5	55.8	44.6	34.7	26.9	20.7	15.7				
	16:00	Calculated	76.5	55.8	44.6	34.8	26.8	20.6	15.9	4034	14693	398	300
		Error (%)	0	0.03	-0.05	-0.3	0.53	0.43	-0.88				
6		Converted	67.9	47.6	39	31.4	25	19.7	15.4				
	11/20	Calculated	67.9	47.6	39.1	31.4	24.9	19.7	15.6	3360	22141	627	308
	16:30	Error (%)	0	0.1	-0.31	-0.04	0.61	0.28	-0.93				

Imagen 9 Deflexiones prueba FWD.
Autor: Seo, Kim, Choi y Park (2009).

A partir de la anterior tabla, se encontró que DYN-BAL brinda los resultados más confiables en comparación con otros métodos de retro cálculo utilizados frecuentemente (Seo, Kim, Choi y Park; 2009).

En Tailandia se empleó un modelo dinámico de semiespacio para el cálculo retroactivo de las propiedades del suelo de ingeniería a partir de los datos de FWD. Las ventajas, limitaciones y confiabilidad de los módulos elásticos de retro cálculos a partir del modelo de suelo dinámico se discutieron en donde, los resultados numéricos seleccionados mostraron la influencia de los parámetros que rigen, por ejemplo, la presencia de una capa rígida poco profunda y la densidad másica del material del suelo en el retroceso dinámico del módulo elástico del suelo (Sirithemmontreea y Sapsathiarna; 2017).

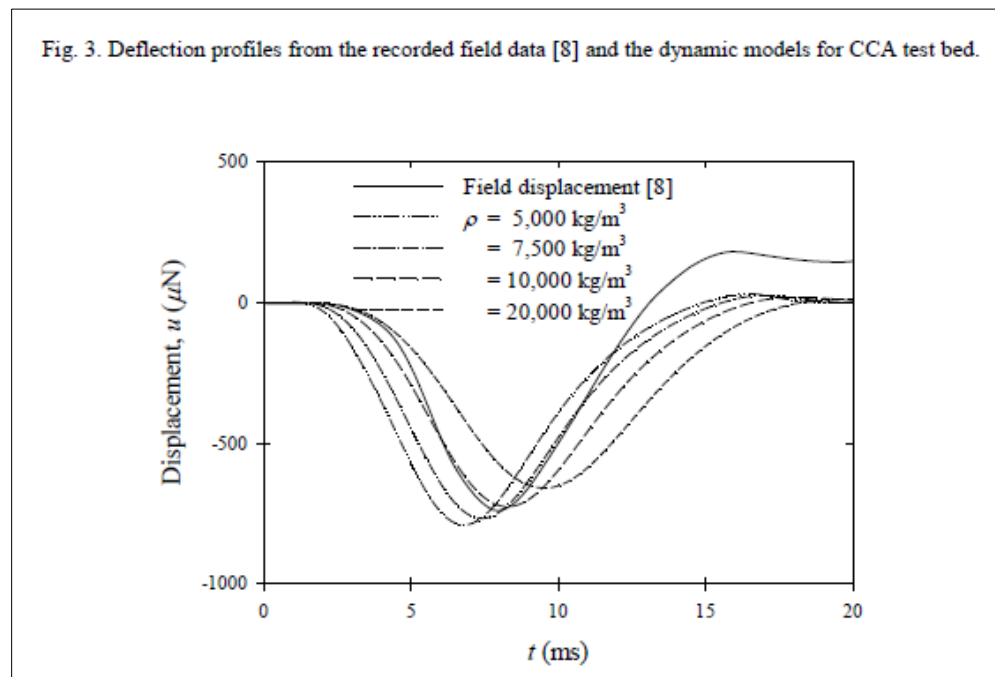


Imagen 10 Perfil de desplazamientos FWD.
Autor: Sirithemmontreea y Sapsathiarna (2017).

De los ejemplos numéricos se pudo observar que la precisión de la evaluación de los módulos elásticos basados en análisis dinámicos de retroceso depende significativamente de los modelos dinámicos de avance del suelo empleados en el proceso de retrocálculo.

En Estados Unidos se realizó una metodología basada en el diseño empírico-mecánico (M-E) basada en la calidad del pavimento o la metodología de predicción del rendimiento que incorporó pruebas no destructivas como el radar de penetración subterránea (GPR) y el deflectómetro de caída de peso (FWD). Se seleccionaron tres sitios específicos en el pavimento para realizar las pruebas no destructivas como GPR y FWD. La prueba de FWD se realizó en dichas ubicaciones, observándose que, los módulos de capa calculados de nuevo muestran niveles variables de inconsistencia en diferentes secciones del pavimento. Con base en las pruebas GPR y FWD, cada uno de estos tres sitios se dividieron en dos áreas principales: una con la media y otra con el espesor y el módulo mínimo de la capa. El espesor de la capa y los módulos se incorporaron a un software (AASHTO Ware-ME) para determinar las dificultades relacionadas con la carga, como la grieta de abajo hacia arriba y la rutina.

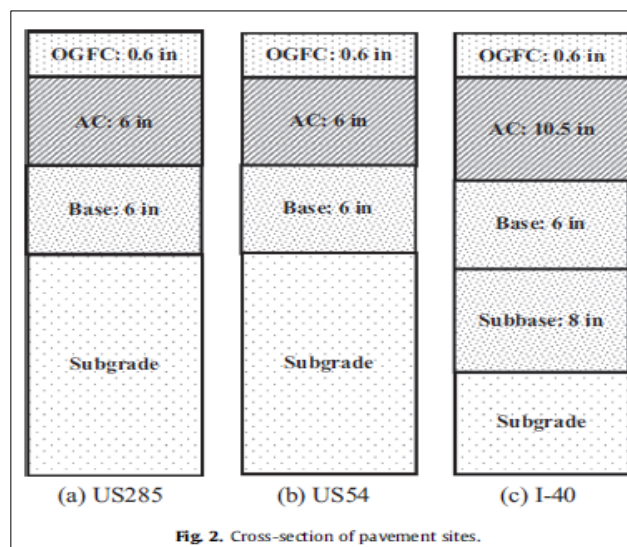


Imagen 11 Estructuras de pavimentos seleccionadas.
Autor: Mesbah, Ahmed y Tarefder (2016).

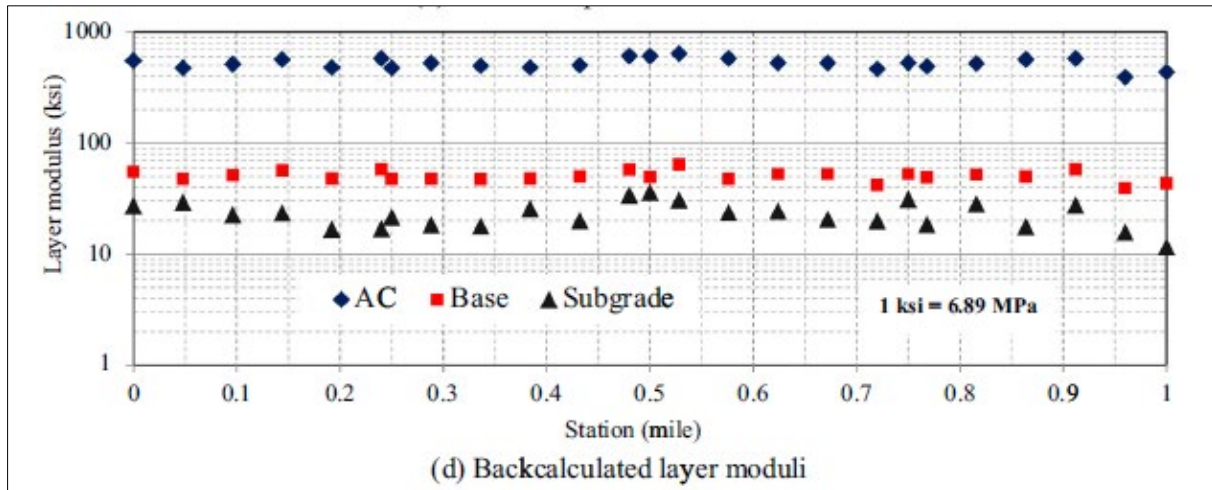


Imagen 12 Retrocálculo del módulo de capa.
 Autor: Mesbah, Ahmed y Tarefder (2016).

Mediante el análisis anterior se pudo ver que se prevén grietas ascendentes sobre la vida útil del pavimento, y se observa que la cantidad de grietas excede el umbral máximo al 15° año en US54 debido a espesores de capa más pequeños que los especificados. La cantidad de grietas se mejora en la región con un grosor y una rigidez de capa mínimos, y por lo tanto, se predice una falla antes (Mesbah, Ahmed y Tarefder; 2016).

A pesar de la facilidad de uso y la simplicidad, este enfoque empírico está desactualizado y carece de muchos aspectos para caracterizar los materiales de construcción reciclados y/o no tradicionales hoy en día más comúnmente utilizados en pavimentos. Por lo anterior, en Estados Unidos El Departamento de Transporte de Illinois (IDOT) utilizó un enfoque de diseño empírico para realizar diseños de espesores de superposiciones estructurales para carreteras de bajo volumen. Los coeficientes de capa modificados para un número limitado de tipos de materiales se utilizaron para asignar la capacidad estructural de los pavimentos en servicio. En lo que respecta a la rehabilitación de carreteras de bajo volumen, la falta de pruebas para evaluar las condiciones estructurales de los pavimentos existentes en servicio a menudo resulta en prácticas antieconómicas y poco confiables. Por ello en Illinois se realizó una investigación que presenta

una aproximación mecanicista-empírica para diseños de espesores de recubrimiento de pavimentos de bajo volumen a través de una combinación de pruebas de deflexión no destructivas y modelos preestablecidos de daños en el pavimento donde fueron seleccionadas veinte secciones diferentes obteniendo los siguientes resultados:

Section Number	Predicted ESALs Over Pavement Design Life	Threshold-Critical Pavement Response Parameters based on Damage Algorithms		Critical Pavement Response Parameters under Original Pavement Configuration		Overlay Required?
		ϵ_t	δ_v (mil)	ϵ_t	δ_v (mil)	
1	13,524	6.36E-4	45.36	6.13E-4	46.33	YES
2	13,524	6.36E-4	45.36	6.06E-4	52.21	YES
3	13,524	6.36E-4	45.36	4.52E-4	48.47	YES
4	13,524	6.36E-4	45.36	5.32E-4	47.88	YES
5	404,787	2.40E-4	19.40	4.53E-4	29.51	YES
6	13,524	6.36E-4	45.36	4.49E-4	41.7	NO
7	13,524	6.36E-4	45.36	3.49E-4	32.89	NO
8	256,365	2.74E-4	21.74	7.65E-4	40.34	YES
9	310,336	2.60E-4	20.73	4E-4	24.37	YES
10	310,336	2.60E-4	20.73	8.43E-4	42.84	YES
11	310,336	2.60E-4	20.73	7.60E-4	38.9	YES
12	310,336	2.60E-4	20.73	5.54E-4	32.26	YES
13	310,336	2.60E-4	20.73	7.55E-4	40.71	YES
14	310,336	2.60E-4	20.73	6.27E-4	37.97	YES
15	1,519,234	1.64E-4	13.94	1.19E-4	11.21	NO
16	1,556,746	1.63E-4	13.85	1.19E-4	11.21	NO
17	1,350,430	1.71E-4	14.35	1.19E-4	11.21	NO
18	437,311	2.36E-4	19.03	2.75E-4	18.39	YES
19	437,311	2.36E-4	19.03	2.58E-4	17.26	YES
20	437,311	2.36E-4	19.03	3.71E-4	22.63	YES

Table 3: Critical pavement responses compared to the threshold values for design traffic levels along with required HMA thicknesses

Imagen 13 Comparación de variables capas de pavimento flexible halladas con FWD.
Autor: Sarkera, Tutumluera y Lackeyb (2016)

Se encontró que el método de diseño de superposición M-E evalúa adecuadamente las condiciones estructurales de los pavimentos existentes y posteriormente recomienda los valores de espesor de recubrimiento requeridos a partir de las respuestas críticas del pavimento basados en FWD calculadas y comparadas con valores del umbral para los algoritmos de fatiga y/o ruteo preestablecidos (*Sarkera, Tutumluera y Lackeyb; 2016*).

Todas las secciones del pavimento probadas, excepto una, fueron erróneamente categorizadas como estructuralmente adecuadas por el método 1993 AASHTO NDT. De manera similar, el método IDOT basado en el coeficiente de capa modificado utilizado en Illinois, que es altamente empírico, predijo superposiciones bastante más gruesas para aproximadamente la mitad de las secciones de pavimento, en comparación con el método de diseño de superposición M-E.

Se encontró que el método identificó con éxito las deficiencias estructurales en las configuraciones originales del pavimento a través de FWD NDT y condujo a soluciones de superposición confiables, en comparación con los métodos AASHTO 1993 NDT, AI Deflection e IDOT.

Capítulo IV: Marco teórico

4.1. Deflexión de un pavimento

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente, la carga es producida por el tránsito vehicular. Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco de deflexión.

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

4.2. Deflectometría

Es una medición de la deformación o hundimiento de la superficie del pavimento cuando un peso estándar aplicado en la superficie de un pavimento produce una deformación de manera controlada.

Este hundimiento es medido en centésimos de milímetro y permite conocer la resistencia del pavimento ante el paso de vehículos.

Las mediciones deflectométricas consisten en la aplicación de una carga dinámica causada por la caída de un peso en un sistema amortiguado a través de un plato que descansa en la superficie de la estructura del pavimento.

El deflectómetro (FWD - Falling Weight Deflectometer) registra la fuerza de impacto, la temperatura del aire, la temperatura superficial del pavimento y las máximas deformaciones registradas mediante un grupo de sensores de deformación con las cuales se puede llevar a cabo la caracterización y evaluación estructural del pavimento.

El equipo permite registrar automáticamente el cuenco de deformación con la ayuda de 9 sismómetros.

4.2.1. Deflectómetro de impacto (FWD)

El deflectómetro de impacto es un equipo utilizado para la evaluación del estado estructural de firmes flexibles, semirrígidos y rígidos. El operador controla todas las funciones del deflectómetro desde el ordenador que se instala en el vehículo remolcador (en caso de ser con remolque). Este proceso permite a un solo operador realizar el trabajo de medición de manera fácil y sencilla.

Estos equipos están dotados de la tecnología más avanzada. Poseen programas que incorporan alarmas que aparecen en la pantalla del ordenador. Si el operador ignora advertencias vitales, no puede efectuar algunas funciones con el FWD, por ejemplo, en conexión con la medición de la temperatura del pavimento: Después de introducir el sensor de temperatura del asfalto, el sensor detecta cuando la temperatura es estable.

Se mide la temperatura mientras la placa de carga está apoyada sobre el pavimento y no se puede elevar antes de que el sensor de temperatura se haya colocado en su receptáculo. El equipo no se puede conducir a otra ubicación cuando la placa de carga está abajo y los interruptores de emergencia, colocados estratégicamente, permiten al operador detener el equipo en cualquier momento por medio del accionamiento manual.

La principal aportación del deflectómetro de impacto frente a los equipos clásicos de deflectometría, es el análisis de la capacidad de soporte mediante el cálculo inverso de los módulos de rigidez de las capas de firme a partir de los cuencos de deflexión registrados Imagen 14.



Imagen 14 *Equipo FWD*
Fuente: *Autor*

Dentro de los beneficios Clave del Deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) se encuentran los siguientes:

- Pruebas estructurales automatizadas y rápidas aplicables a los pavimentos de todo el mundo.
- Determina la capa de falla, en lugar de simplemente determinar la capacidad de resistencia de carga.
- Control de calidad de pavimentos nuevos.
- Compara una amplia gama de opciones de rehabilitación, incluyendo fresados y reciclados, en lugar de simplemente aplicar sobre capas.

- El uso del Deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) proporciona datos estructurales precisos, reproducibles y repetibles.
- El monitoreo automatizado y en tiempo real de las celdas de carga, los geófonos y las variaciones de la información garantizan una alta calidad de los datos recopilados.
- Utiliza el análisis empírico-mecanicista aplicable a la mayoría de las estructuras de pavimento.
- El Deflectómetro de Impacto FWD se utiliza en todo el mundo, desde los desiertos más calientes y secos, hasta los trópicos húmedos y las regiones más frías.

4.2.2. Cuenco de deflexiones

El cuenco de deflexión, obtenido con un deflectómetro de impacto, proporciona valiosa información acerca del pavimento (especialmente en caso de pavimentos flexibles), permitiendo evaluar mediante técnicas diversas (cálculo inverso o análisis de su forma a través de diversos parámetros) el estado de cada una de las capas que lo constituyen así como del cimiento sobre el que se apoya.

El principio de medida de un deflectómetro de impacto, para la obtención del cuenco de deflexión, es relativamente sencillo: se aplica un impacto sobre el pavimento por medio de la caída libre de una carga sobre un sistema de amortiguación, que a su vez está colocado sobre una placa de carga que reparte las tensiones, y por medio de unos sensores (geófonos o sismómetros) se mide la deformación vertical de la superficie (deflexión) bajo el punto de aplicación de la carga y a unas distancias determinadas del mismo. El conjunto de dichas deflexiones registradas es lo que se denomina cuenco de deflexión Imagen 15.

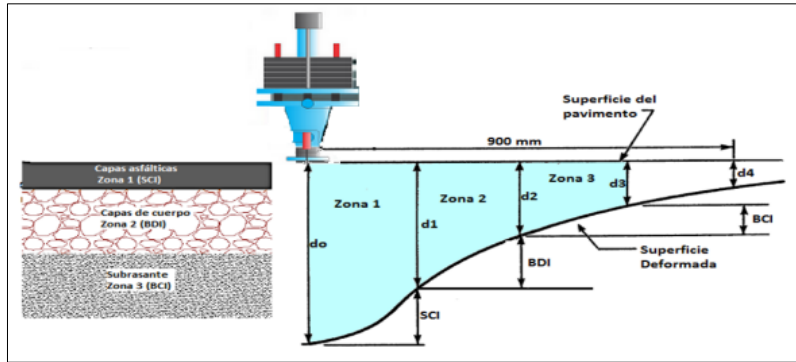


Imagen 15 Zona del cuenco de deflexión.
Fuente: Horak & Emery, (2009) [3]

Lo que se registra es la deformación del pavimento (o de forma más precisa, de su superficie) en el momento de la aplicación de la carga. Existe la tendencia a definir el cuenco de deflexión como una respuesta ante la aplicación de una carga estática, como si el impacto provocase una deformación instantánea que es registrada por los sensores como una fotografía. Dicho de otro modo, cuando representamos el cuenco de forma gráfica, podemos pensar que dicha deformación es la que experimenta el pavimento bajo la aplicación de una carga permanente en el tiempo.

Entonces, el cuenco se puede definir como la línea de influencia de la deflexión; si bien desde un punto de vista teórico, considerando el pavimento como un sistema multicapa elástico, homogéneo y lineal, efectivamente el cuenco de deflexión coincidiría con dicha línea de influencia; en el ensayo real dichas condiciones no se dan, y no está de más recordar que una línea de influencia muestra gráficamente la forma en que el movimiento de una carga unitaria a lo largo de una estructura influye en cierto efecto mecánico en la misma (en este caso, en la deflexión de la superficie en un punto concreto).

No obstante; la realidad es que cuando se aplica un impacto sobre la superficie del pavimento, lo que ocurre es más parecido a lo que todos hemos experimentado al dejar caer una piedra sobre

la superficie del agua en un estanque en calma. La carga, al caer sobre el sistema de amortiguación, transmite dicho impacto en forma de pulso a la placa de carga, que a su vez distribuye la tensión al pavimento creando un frente de onda de deformaciones recuperables, extendiéndose y atenuándose desde el punto de aplicación.

Lo que registran los sensores del deflectómetro son los valores máximos de la deformación, los picos del frente de onda en cada punto. El cuenco de deflexión no es ni una deformada real 'estática' en el sentido en que solemos entenderlo, ni una línea de influencia, sino que es el registro de una secuencia espacial de máximos del frente de onda.

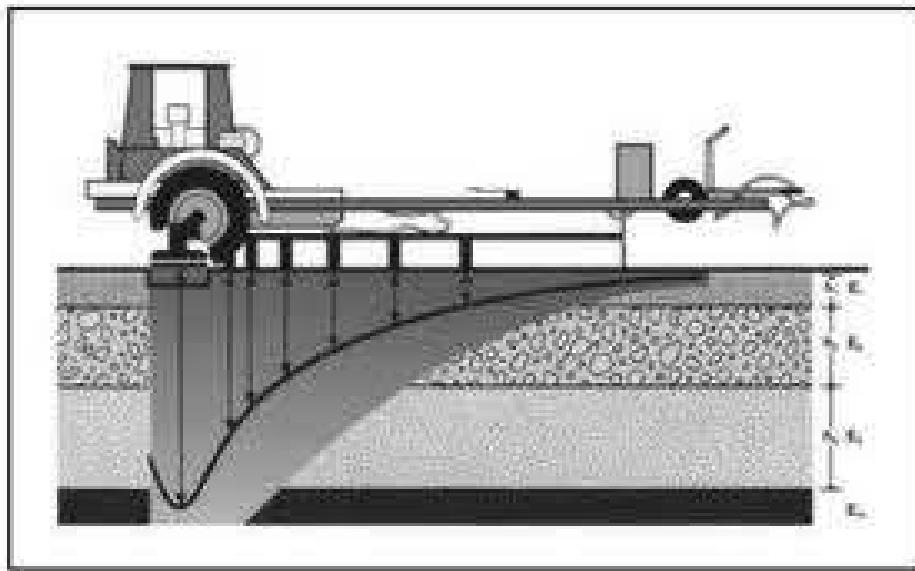


Imagen 16 deflexión por geófono.
Fuente: Figueroa (2009) [4]

Lo que se obtiene es lo que conocemos como el cálculo inverso de pavimentos, a partir del cual podemos obtener la valiosa información sobre el estado estructural del pavimento. No es más que un artificio de cálculo pseudo-estático, con el objetivo de recopilar los parámetros necesarios para abordar la rehabilitación de un pavimento.

El cuenco de deflexiones puede ser dividido en 3 zonas (Horak & Emery, 2009). Cada una de estas zonas puede ser descrita utilizando la diferencia entre la deflexión inicial y final en la zona.

Estas diferencias corresponden 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 las tablas 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 Imagen 17.

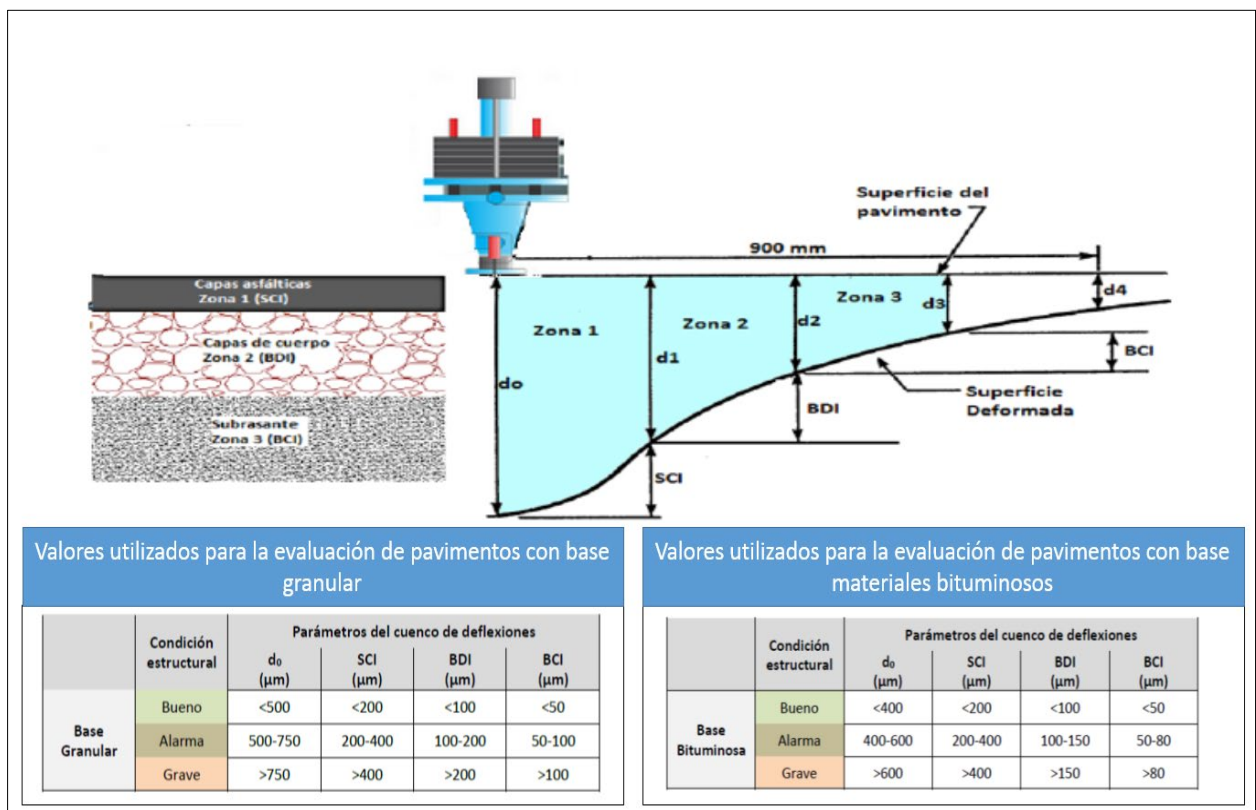


Imagen 17 Evaluación de pavimentos con base granular y materiales bituminosos.

Fuente: Horak (2008) [5]

- 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 geo textil 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.

4.3. Criterios básicos para el retrocálculo de estructuras de pavimento flexible

4.3.1. CBR

El CBR es un ensayo para evaluar la calidad de un material de suelo con base en su resistencia, medida a través de un ensayo de placa a escala.

CBR significa en español relación de soporte California, por las siglas en inglés de «California Bearing Ratio», aunque en países como México se conoce también este ensayo por las siglas VRS, de Valor Relativo del Soporte.

Aunque fue desarrollado en 1925, el ensayo comienza a aparecer en los estándares norteamericanos ASTM (por American Standards for Testing and Materials) desde 1964, en su versión para laboratorio (ASTM D 1883), y en su versión para campo (ASTM D 4429). A pesar de sus múltiples limitaciones, el CBR es uno de los ensayos más extendidos y aceptados en el mundo debido al relativo bajo costo de ejecución (si se compara con ensayos triaxiales), y a que está asociado a un número de correlaciones y métodos semi-empíricos de diseño de pavimentos.

Según la norma ASTM D 1883-07, el CBR es un ensayo de carga que usa un pistón metálico, de 0.5 pulgadas cuadradas de área, para penetrar desde la superficie de un suelo compactado en un molde metálico a una velocidad constante de penetración. Se define CBR, el parámetro del ensayo, como la relación entre la carga unitaria en el pistón requerida para penetrar 0.1” (2.5 cm) y 0.2” (5 cm) en el suelo ensayado, y la carga unitaria requerida para penetrar la misma cantidad en una piedra picada bien gradada estándar; esta relación se expresa en porcentaje.

Por cada espécimen de suelo se calculan dos valores de CBR, uno a 0.1” de penetración, y el otro a 0.2” de penetración. ASTM dice que el CBR que se reporta es el de 0.1” mientras este sea menor que el de 0.2”. En el caso en el que el valor de CBR para 0.1” fuera mayor que el de 0.2” habría que repetir el ensayo para ese espécimen.

Los valores de CBR cercanos a 0% representan a suelos de pobre calidad, mientras que los más cercanos a 100% son indicativos de la mejor calidad.

4.3.2. Módulo resiliente

En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. Él propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes. Seed et al (1955) de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo resiliente.

Este término fue cambiado más tarde por el de módulo resiliente, el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como se muestra en la ecuación (1):

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}} \quad (1)$$

- σ_1 = Esfuerzo principal mayor
- σ_3 = Esfuerzo principal menor
- σ_d = Esfuerzo desviador
- ε_{axial} = Deformación recuperable

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente Imagen 18.

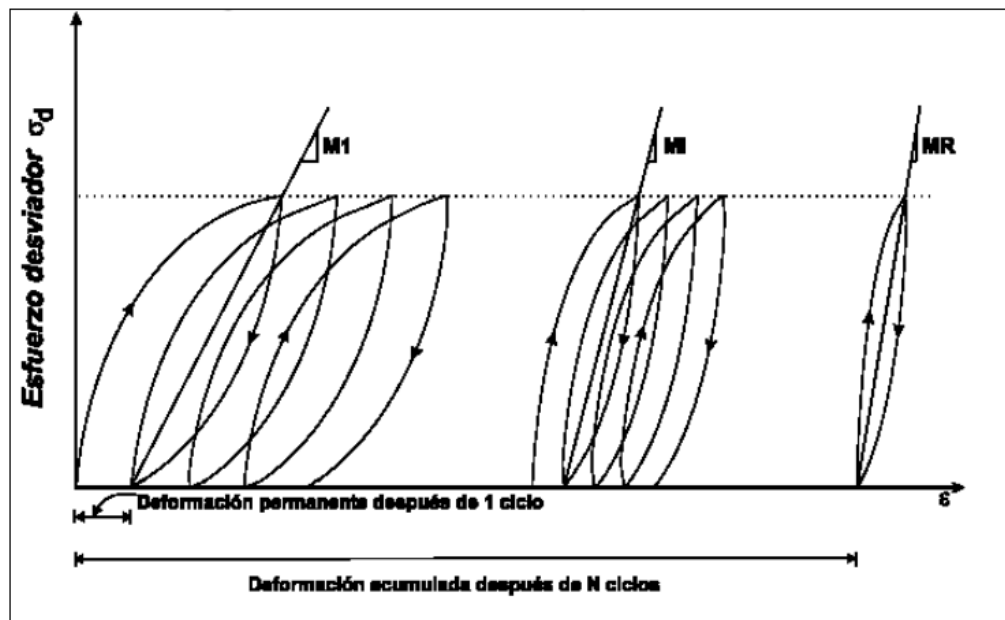


Imagen 18 Mecanismo de deformación permanente.
Fuente: AASHTO-1993 [7]

El módulo resiliente M_r es la respuesta al ensayo dinámico, definido como el cociente entre la tensión desviadora axial repetida σ_d y la deformación axial recuperable ϵ_a .

Se obtienen dos valores de módulo resiliente, uno instantáneo y otro total, debido a que se registran dos deformaciones durante el ciclo de carga, una al finalizar el pulso de carga aplicado - deformación instantánea y la otra al terminar el período de relajación deformación total ecuación (2) y ecuación (3).

$$E_i = \frac{P(v + 0.27)}{t * D_i} \quad (2)$$

$$E_t = \frac{P(v + 0.27)}{t * D_t} \quad (3)$$

- E_i : módulo resiliente instantáneo
- E_t : módulo resiliente total
- v : coeficiente de Poisson
- t : espesor de la probeta
- D_i : deformación resiliente instantánea
- D_t : deformación resiliente total

4.3.3. Módulo de poisson

Este parámetro se define como la relación entre la deformación transversal y longitudinal de un espécimen sometido a cargas. Generalmente los materiales naturales tienen valores menores que los materiales tratados en cuanto al módulo de Poisson, dichos valores pueden variar de 0 a 0.5.

4.3.4. Numero estructural

El número estructural (SN), es un término que se aplica bajo la metodología de la AASHTO y cuantifica la capacidad estructural de una estructura de pavimento.

$$SN = D_1 a_1 + D_2 a_2 m_2 + \dots + D_i a_i m_i$$

Donde:

- SN: Número estructural de la estructura de pavimento (pulgadas).
- D: Es el espesor de la capa i (pulgadas).

- a: Es el coeficiente estructural de la capa i.
- m: Es el coeficiente de drenaje de la capa i, $m = 1,0$.
- i: Es el número de capa siendo i la superficial e i la de mayor profundidad.

4.3.5. Teoría de los métodos mecanístico en pavimentos flexibles

La evolución de los métodos de análisis mecanístico (también denominado análisis estructural aplicado a pavimentos), ha sido constante, llegando a incrementar el conocimiento actual de los estados de esfuerzo y deformación en las capas constituyentes del pavimento y de la subrasante.

El primer avance lo desarrolló **Boussinesq** a fines del siglo XIX, dándose inicio al análisis mecanísticos, aunque incipientemente, y solo aplicado a un suelo homogéneo, isotrópico y elástico lineal; en esa época ya se tenía la necesidad de resolver las ecuaciones para múltiples sistemas de capas, pero las herramientas matemáticas y técnicas que se tenían aún no permitían ese avance.

Décadas después, **Burmister** desarrolló la teoría multicapa, basada en las teorías y soluciones planteadas por Boussinesq, dándose inicio a la solución de problemas aplicados a pavimentos flexibles, el único detalle era lo engorroso del método, tomándose la necesidad de usar múltiples ábacos y tablas. Actualmente se tiene a este método como el indicado para el análisis mecanístico en pavimentos flexibles, pero usando computadoras personales que hacen innecesaria las tablas y ábacos. Otra visión alentadora paralela a Burmister fue la desarrollada por Odemark, con la resolución de sistemas equivalentes de capa de pavimento, que fue ampliamente acogida por los ingenieros, actualmente este método aún se usa como un método rápido y directo para realizar cálculos previos, o de respuesta esperada en los programas de cómputo.

Finalmente, con el advenimiento de las computadoras personales, los métodos numéricos tales como los métodos de elementos finitos han hecho un ingreso rápido al análisis mecanístico del

pavimento, aunque, actualmente se prefiera este método como el indicado para pavimentos rígidos.

En definitiva los métodos creados hasta el momento son los siguientes:

- Método De Boussinesq
- Método Multicapa
- Método Del Espesor Equivalente
- Método de los elementos finitos

4.4. Retrocálculo

El retrocálculo (o retro análisis), es definido como el proceso matemático por el cual, los datos de campo obtenidos por el deflectómetro de impacto, se transforman en módulos elásticos de la subrasante y de todas las capas constituyentes del pavimento (siendo posible hallar los módulos elásticos de cada capa individualmente).

Dentro de los antecedentes del retrocálculo tenemos muchos métodos que han ido evolucionando con el tiempo hasta convertirse actualmente en métodos muy fiables, estos métodos pueden agruparse en:

- Métodos analíticos.
- Métodos por microcomputadores.

Dentro de los métodos analíticos, en su mayoría se asume un sistema bicapa, donde el pavimento en conjunto se toma como una unidad y la subrasante como la segunda capa, obviamente las soluciones solo obtendrán los módulos elásticos del pavimento en su conjunto y de la subrasante, estos métodos son los más antiguos, a la vez son muy simples; un caso particular de estos métodos es la del espesor equivalente, que proviene del método del mismo nombre para realizar análisis mecanístico de pavimentos.

Los métodos por microcomputadores son quizás actualmente los más desarrollados, se tiene en el mercado muchos programas para realizar el retrocálculo, cada uno basado en diferentes algoritmos de optimización, así tenemos a: BAKFAA, EVERCALC, BOUSDEF, MODCOMP, PEDO, MICHBACK, UMPED, ELMOD, MODULUS, y muchos otros que están siendo desarrollados. Estos programas tienen como base de análisis el tipo de carga aplicado y el método de caracterización del material, los cuales, pueden ser agrupados de la siguiente manera:

Tabla 1 Análisis de retrocálculo

CARGA APLICADA	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL
Estático	Análisis lineal
Estático	Análisis no lineal
Dinámico	Análisis lineal
Dinámico	Análisis no lineal

Fuente: Hoffman (2003).

4.4.1. Modelo de Hogg

En 1944, A. H. A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que lleva su nombre. El modelo de Hogg está basado en un sistema hipotético de dos capas: una delgada, con cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, y otra elástica, homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa, que le sirve de sustento.

El modelo de Hogg supone un comportamiento lineal entre los esfuerzos y deformaciones, lo que indica que se acepta que los materiales trabajan dentro de su rango elástico; sin embargo, la reología de los materiales asfálticos demuestra que su comportamiento es viscoelástico, función del estado de esfuerzos, del tiempo de aplicación de las cargas y de la temperatura; de la misma manera los materiales granulares responde a las cargas, de acuerdo al nivel de esfuerzos aplicados, a su densidad y humedad, en general su comportamiento no es lineal y depende en gran medida de

las características del material de la capa subyacente. 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

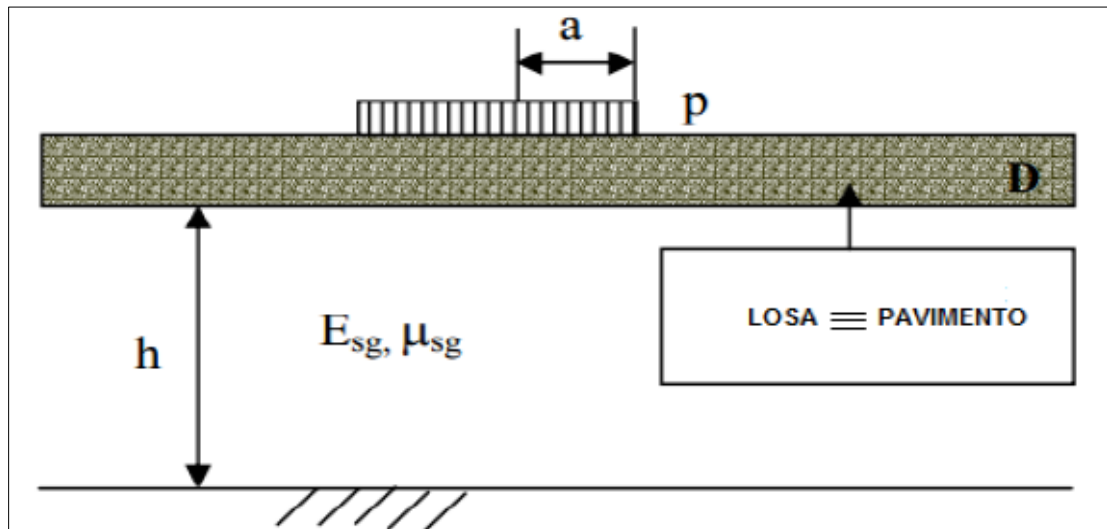


Imagen 19 Geometría de modelo de Hogg.
Fuente: Hoffman (2003).

4.4.2. Método AASHTO para retrocálculo

El método de retrocálculo formulados por la Aashto se basa en la teoría multicapa desarrollada por Boussinesq

El método simplificado para estimar el módulo resiliente de la subrasante a partir de deflexiones medidas en la superficie de pavimentos por capas fue propuesto por Ullidtz (1977; 1987), y está basado en los siguientes supuestos, para una estructura elástica multicapas:

- Como la distancia desde la carga se incrementa, la compresión de las capas arriba de la subrasante llega a ser menos significativa de ser medida en la superficie del pavimento.

Esta observación significa que a una distancia radial suficiente desde la carga aplicada, la deflexión medida en la superficie del pavimento es influenciada mayormente por la deflexión en la parte superior de la subrasante. De esta manera, la deflexión medida depende enteramente de las propiedades elásticas de la subrasante, sin tomar en cuenta el número, espesor y propiedades elásticas de las capas superiores.

- Como la distancia desde la carga se incrementa, la aproximación de una carga distribuida por un punto de carga mejora.

Esta observación es consecuencia de una comparación de deflexiones que resultan de una carga circular distribuida precedida, usando el programa BISAR 3.0 de la Shell, de capas elásticas a varias distancias radiales en la estructura multicapas, a deflexiones predichas a las mismas distancias usando la ecuación de Boussinesq para un sistema de una sola capa.

Con estas observaciones se determinó que el módulo resiliente de la subrasante puede ser obtenido por retrocálculo con las deflexiones medidas en el deflectómetro de impacto, para el sensor ubicado a 180 cm del eje de carga, ecuación (4).

$$Mrr = \frac{P*(1-\mu^2)}{\pi*r*d_r} \quad (4)$$

- Mrr: Módulo resiliente por retrcálculo de la subrasante (PSI)
- P: Carga aplicada en el impacto (lb)
- μ : Relación de Poisson de la subrasante
- d_r : Deflexión registrada a la distancia “r” medida desde el centro de carga (in)

- r : Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado (in)

Asumiendo una relación de Poisson de 0.5, el módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante se determina ecuación (5):

$$Mrr = \frac{0.24 * P}{r * d_r} \quad (5)$$

- P : Carga aplicada en el impacto (lb)
- d_r : Deflexión registrada a la distancia “ r ” medida desde el centro de carga (in)
- r : Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado (in)

La carga **P** antes de ser implementada en la anterior formula, debe ser estandarizada a 40 kN o 9000 lb y, al mismo tiempo, se debe hallar las deflexiones proyectadas para la misma; lo cual se hace mediante la relación de las deflexiones obtenidas y las cargas aplicadas con el plato del FWD ecuación (6):

$$\Delta_{ir} = \Delta_i * \left(\frac{P_r}{P} \right) \quad (6)$$

- Δ_{ir} : Deflexión corregida a la carga de referencia en el sensor i (in)
- Δ_i : Deflexión medida con el deflectómetro de impacto en el sensor i (in)
- P_r : Carga de referencia (lb)
- P : Carga actuante en el ensayo con el deflectómetro (lb)

La dificultad, se traduce en cual sensor escoger para realizar los cálculos del módulo resiliente, el cual, como se dijo anteriormente, puede ser el último sensor, pero esto puede traer errores debido a la dificultad de medir las deflexiones muy pequeñas en el caso del ultimo sensor, y estos errores se magnifican en el proceso de cálculo, razón por la cual, el método AASHTO realizó una comparación entre los módulos resilientes calculados con los de laboratorio vs la distancia de los geófonos y la distancia efectiva como se muestra en la siguiente gráfica:

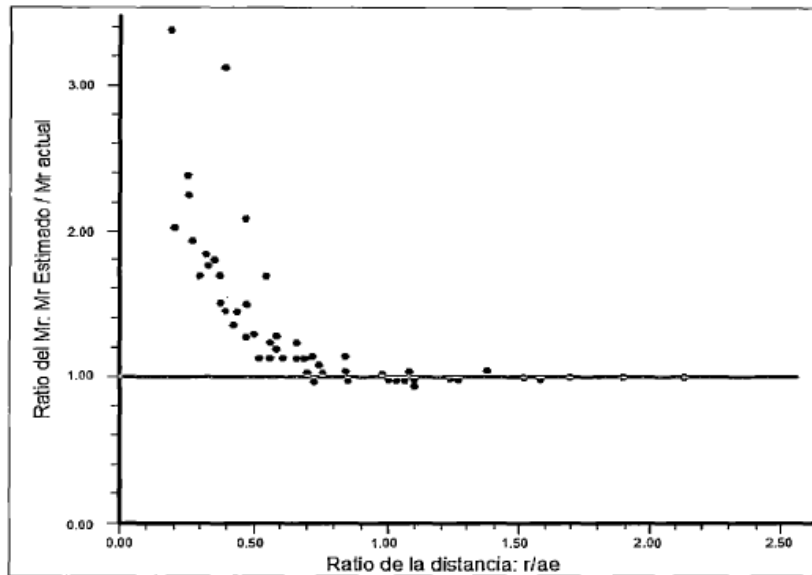


Imagen 20 comparación entre los módulos resilientes calculados
Fuente: AASHTO (1993).

Una vez realizado este estudio se determinó que los datos de Mr que se pueden tener en cuenta son aquellos medidos a la distancia “r”, tal que superen el 70% del radio del bulbo de tensión “ a_e ” ecuación (7).

$$r \geq 0.7a_e \quad (7)$$

- r : Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado. (in)
- a_e : Radio del bulbo de tensión. (in)

Para poder determinar el valor del radio del bulbo de tensión “ a_e ” se debe proceder primero a obtener el modulo elástico compuesto de todo el pavimento “ E_p ” ecuación (8).

$$D_0 = 1.5 * \frac{q}{A} * a * \left\{ \frac{1}{M_{rr} * \sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} * \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (8)$$

- D_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (in).
- q : Carga estandarizada a 9000 lb.
- A : Área del plato de carga (in^2).
- a : radio del plato de carga (in).
- M_{rr} : Modulo resiliente por retrocálculo (PSI).
- H_T : Espesor de la estructura del pavimento (in).
- E_p : Modulo elástico de la estructura del pavimento (PSI).

4.4.2.1. Factor de corrección por temperatura

Debido a que la humedad de la carpeta asfáltica puede influir en una mayor o menor deflexión en D_0 , ya que el material puede estar contraído o expandido durante el proceso del laboratorio, se debe realizar una corrección por temperatura del mismo, ecuación (9).

$$Fct = \frac{1}{1+0.0008*h*(T-20)} \quad (9)$$

- Fct: Factor de corrección por temperatura
- h: Espesor de las capas asfálticas en el sitio de la medida (cm).
- T: Temperatura de las capas asfálticas en el momento de la medida (° C).

El factor de ajuste que se calcule debe ser multiplicado únicamente a la deflexión obtenida en **Do** ya que es la variable utilizada para la obtención de EP.

Una vez obtenido el valor de “Ep” podremos establecer el valor del radio del bulbo de tensión “ae” ecuación (10).

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(H_T * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

- a_e : Radio del bulbo de tensión. (in)
- a: radio del plato de carga (in)
- H_T : Espesor de la estructura del pavimento (in)
- E_p : Modulo elástico de la estructura del pavimento (PSI)
- M_{rr} : Modulo resiliente por retrocálculo (PSI)

Con las anteriores ecuaciones se establecen los sensores que se tendrán en cuenta para realizar los cálculos posteriores de los valores obtenidos mediante el laboratorio del FWD.

4.4.2.2. Factor de corrección al módulo resiliente del retrocálculo.

El valor del módulo resiliente de la subrasante debe ser ajustado ya que los valores calculados por retrocálculo suelen ser muy altos. Lo anterior se hace multiplicando por el factor de corrección C el cual se recomienda que sea tomado como 0.33 por recomendación de la AASHTO, no obstante este factor depende del material que se encuentre inmediatamente en la parte superior de la subrasante, el cual se muestra en la siguiente tabla 2.

Tabla 2 Factor de corrección a las capas de pavimentos evaluados.

Tipo de material del pavimento	Valor de C
Subrasante debajo de una base estabilizada	1,32
Subrasante debajo de un pavimento pero con ausencia de base y subbase	0,52
Subrasante debajo de un pavimento con presencia de base o subbase	0,33

Fuente: FHWA 1997 [13]

Entonces el Mrr hallado por retrocálculo se determina ecuación (11).

$$Mrr = C * \left(\frac{0.24 * P}{r * d_r} \right) \quad (11)$$

- P: Carga aplicada en el impacto (lb)
- d_r : Deflexión registrada a la distancia “r” medida desde el centro de carga (in)
- r: Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado (in)

- C: Factor de corrección módulo resiliente por retrocálculo

Finalmente, se realiza el cálculo del número estructural ecuación (12)

$$SN_{EF} = 0.0045 * H_T * \sqrt[3]{E_P} \quad (12)$$

- SN_{EF} : Numero estructural efectivo
- H_T : Espesor de la estructura del pavimento (in)
- E_P : Modulo elástico de la estructura del pavimento (PSI)

4.4.3. Método LUKANEN para retrocálculo.

La evaluación estructural mediante el método de LUKANEN, utiliza las variaciones del modelo de Hogg, para la evaluación del módulo de la subrasante, mediante relaciones obtenidas en investigaciones llevadas a cabo por Minesota Department of Transportation (Mn/DOT; Higuera Sandoval, 2010). El modelo de Hogg está basado en un sistema hipotético de dos capas que consiste en una placa relativamente delgada que se apoya sobre una fundación elástica (del Aguila Rodríguez, 2007). El modelo define dos parámetros, la distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central (r50), y la longitud característica (lo) que es la distancia radial en donde se ubica el punto de inflexión del cuenco de deflexiones.

Lo primero que se debe tener en cuenta es que, según el modelamiento de Hogg, se debe realizar el cálculo de la distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central. Esta distancia se define como la distancia radial al punto del cuenco de deflexiones, donde la deflexión es el 50% de la deflexión en el centro del plato de carga; esta distancia, denominada r50, hace referencia a la rigidez del pavimento sobre la subrasante y a la profundidad de la capa rígida, por ejemplo, si d0

imagen 21.

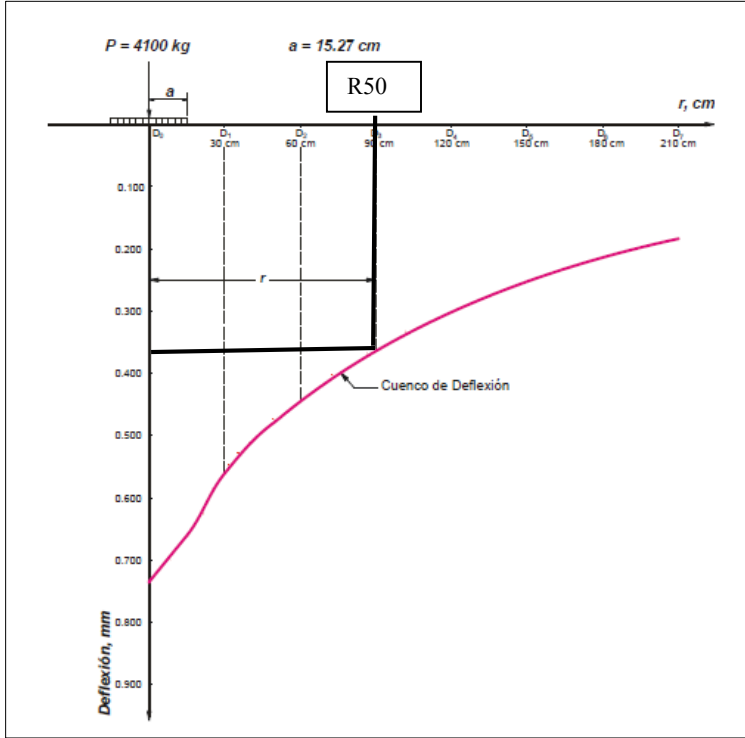


Imagen 21 deflexión en R50.
Fuente: Autor.

R50 es hallado mediante la siguiente ecuación (13):

$$r_{50} = \frac{A^{C-B}}{\left[A^* \left\{ \frac{D_0}{d_r} - 1 \right\} \right]^{C-B}} \quad (13)$$

- r_{50} : distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central (cm)
- D_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (μm)
- d_r : Deflexión registrada a la distancia “r” medida desde el centro de carga (μm)

- A,B,C: Coeficientes de ajuste de las curvas del modelo de Hogg

Los parámetros A, B y C son coeficientes utilizados del modelo de Hogg, los cuales dependen de la relación de Poisson y del coeficiente de $dr/d0$ para $h/10 = 10$ (esto se describirá más adelante), tabla 3.

Tabla 3 coeficientes para el modelo de Hogg $Dr/D0$, A, B, y C.

PROFUNDIDAD DEL ESTRATO RÍGIDO (h_0/l_0)=10					
CASO	POISSON	$Dr/D0$	A	B	C
I	0,5	$> 0,7$	2,46	0	0,592
		$< 0,7$	371,1	2	0,219
II	0,4	$> 0,426$	2,629	0	0,548
		$< 0,426$	2283,4	3	0,2004

Fuente: E.A. Guzmán Suarez. (2009) [9]

Luego debemos determinar la longitud característica (l_0) la cual por definición, es la distancia radial en donde se ubica el punto de inflexión del cuenco de deflexiones. Es un parámetro que refleja la rigidez relativa entre un pavimento y la subrasante. Por tratarse de una relación de rigideces, el valor L_0 permite una rápida evaluación cualitativa del sistema pavimento-subrasante.

El cálculo de L_0 no considera estrictamente la variabilidad de los estratos ya que puede presentarse una subrasante de suelos granulares sobre suelos finos o viceversa; el valor de la longitud característica L_0 , dependerá directamente de los valores de las deflexiones medidas para todos los estratos siempre que estén dentro de la profundidad de influencia a los que son apreciables los valores de esfuerzos y deformaciones y estos a su vez dependerán de la calidad de la subrasante, un mal suelo generalmente reflejara valores altos de deflexión y un buen suelo reflejara valores bajos de deflexión.

Cuando se trata de subrasantes mejoradas, se puede entender que la rigidez de la subrasante está aumentando por lo que el valor de L_0 será menor, dependerá de la rigidez del pavimento para hacer confiable el valor de la longitud característica.

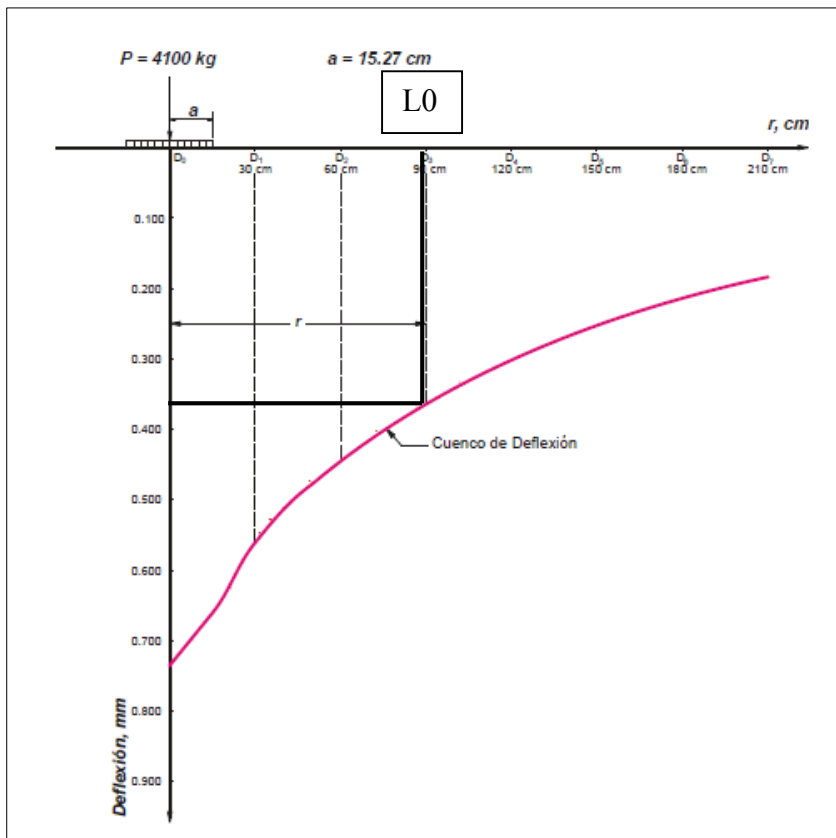


Imagen 22 Determinación de L_0
Fuente: Autor

L_0 es calculada mediante la ecuación (13).

$$l_0 = \frac{Y \cdot r_{50} + \sqrt{(Y \cdot r_{50})^2 - 4 \cdot a \cdot X \cdot r_{50}}}{2} \quad (13)$$

- l_0 : Longitud característica (cm)

- r_{50} : distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central (cm)
- a : radio del plato de carga (cm)
- X, Y : Coeficientes de ajuste de las curvas del modelo de Hogg

Los parámetros Y , y X son coeficientes utilizados del modelo de Hogg, los cuales dependen de la relación de Poisson para $h/l_0 = 10$ (esto se describirá más adelante), así:

Tabla 4 coeficientes para el modelo de Hogg Variables X y Y .

PROFUNDIDAD DEL ESTRATO RÍGIDO (h_0/l_0)=10			
CASO	POISSON	X	Y
I	0,5	0,183	0,62
II	0,4	0,192	0,602

Fuente: Guzmán Suarez. (2009) [9]

4.4.3.1. PARÁMETRO H/L_0

La metodología de evaluación permite la selección de la profundidad de la capa rocosa y puede optarse por el valor de $H/L_0 = 10$ que corresponde a una capa rocosa en el infinito. Lo anterior implica que la capa rocosa se encuentra a una profundidad igual a 10 veces la longitud característica.

4.4.3.2. Relación de poisson

El modelo asume valores del módulo de Poisson de 0.4 y 0.5 independientemente de la situación real de los estratos debido a que las ecuaciones aceptaron soluciones para dichos valores en aquellos años que fueron desarrolladas, actualmente con las investigaciones recientes en los métodos racionales para el diseño de pavimentos, los valores del módulo de Poisson fluctúan entre 0.35 y 0.50, donde el valor de 0.35 es usado para carpetas asfálticas y bases granulares mientras

que las subrasantes son modeladas con módulo de Poisson de 0.4 para subrasantes no saturadas y 0.45 para subrasantes saturadas. Por esta razón el modelo de Hogg que utilizó siempre el módulo de Poisson 0.4 se ha mantenido y generalizado como valor recomendable para la evaluación de pavimentos mediante deflexiones.

El siguiente paso es calcular la relación teórica entre la rigidez por carga puntual y la rigidez por carga distribuida sobre un AREA, para un cociente dado del valor a/l_0 . Esta relación se calcula mediante la siguiente expresión ecuación (14)

$$\frac{S_0}{S} = 1 - M * \left(\frac{a}{l_0} - 0.20 \right) \quad (14)$$

- S_0 : Rigidez teórica por carga puntual, en kg/ μ m
- S : Rigidez del pavimento, en kg/ μ m
- l_0 : Longitud característica (cm)
- a : radio del plato de carga (cm)
- M : Coeficiente de ajuste de las curvas del modelo de Hogg

El parámetro M es un coeficiente utilizado del modelo de Hogg, el cual dependen de la relación de Poisson para $h/l_0 = 10$, Tabla 7.

Tabla 5 Coeficientes para el modelo de Hogg parámetro M .

PROFUNDIDAD DEL ESTRATO RÍGIDO (h_0/l_0)=10		
CASO	POISSON	M
I	0,5	0,52
II	0,4	0,48

Fuente: Guzmán Suarez. (2009) [9]

Paso siguiente calculamos el módulo resiliente por retrocálculo mediante ecuación (15)

$$M_{rr} = \left[\frac{K \cdot I \cdot P}{l_0 \cdot d_0} \right] * \frac{S_0}{S} \quad (15)$$

- M_{rr} : Modulo resiliente por retrocálculo (Kg/cm_2)
- l_0 : Longitud característica (cm)
- d_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (cm)
- S_0 : Rigidez teórica por carga puntual, en $kg/\mu m$
- S : Rigidez del pavimento, en $kg/\mu m$
- K, I : Coeficientes de ajuste de las curvas del modelo de Hogg

Los parámetros I y K son coeficientes utilizados del modelo de Hogg, los cuales dependen de la relación de Poisson para $h/l_0 = 10$, tabla 8.

Tabla 6 coeficientes para el modelo de Hogg, Parámetros I y K.

PROFUNDIDAD DEL ESTRATO RÍGIDO (h_0/l_0)=10			
CASO	POISSON	I	K
I	0,5	0,16114	1,5
II	0,4	0,1684	1,633

Fuente: Guzmán Suarez. (2009) [9]

Finalmente el cálculo del número estructural efectivo se realiza mediante la siguiente ecuación (16)

$$SN_{ef} = 0.0182 * l_0 * \sqrt[3]{M_{rr}} \quad (16)$$

- SN_{ef} : Numero estructural efectivo
- l_0 : Longitud característica (cm)
- Mrr : Modulo resiliente por retrocálculo (Kg/cm_2)

4.4.4. Método YONAPAVE para retrocálculo.

El método YONAPAVE utiliza la base de las relaciones del modelo Hogg, junto con el programa Modulus, para generar curvas con las cuales se pueden inferir los valores de módulo, basados en las características de un cuenco de deflexión individual.

El primer cálculo que debe realizarse es el del parámetro AREA. 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) ecuación (17).

$$AREA (in) = \frac{6*(d_0+2*d_{12}+2*d_{24}+d_{36})}{d_0} \quad (17)$$

- $AREA$: área normalizada de la sección del cuenco de deflexión
- d_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (cm)
- d_{12} : Deflexión máxima medida desde el centro del plato de carga hasta la distancia $r=12$ in
- d_{24} : Deflexión máxima medida desde el centro del plato de carga hasta la distancia $r=24$ in

- d_{36} : Deflexión máxima medida desde el centro del plato de carga hasta la distancia $r=36$ in

$$AREA (mm) = \frac{150*(d_0+2*d_{300}+2*d_{600}+d_{900})}{d_0} \quad (18)$$

- $AREA$: área normalizada de la sección del cuenco de deflexión
- d_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (mm)
- d_{300} : Deflexión máxima medida desde el centro del plato de carga hasta la distancia $r=300$ mm
- d_{600} : Deflexión máxima medida desde el centro del plato de carga hasta la distancia $r=600$ mm
- d_{900} : Deflexión máxima medida desde el centro del plato de carga hasta la distancia $r=900$ mm

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.
- El parámetro área aumenta con la rigidez del pavimento.
- 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.

El área está directamente relacionada con la longitud característica es por ello que la relación h/l_0 varía dependiendo la magnitud del área de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 7 Rangos del área para la relación h/l_0 .

AREA (AR)	h/l_0
$AR \geq 23$	5
$21 < AR < 23$	10
$19 < AR < 21$	20
$AR < 19$	40

Fuente: INVIAS, Bogotá. 2008. [10]

Una vez es calculada el área se procede a calcular la longitud característica con la ecuación (19).

$$l_0 = A * e^{B*AREA} \quad (19)$$

- l_0 : Longitud característica (cm)
- $AREA$: área normalizada de la sección del cuenco de deflexión
- A, B: Coeficientes de ajuste de las curvas del modelo de Hogg

Los parámetros A y B son los coeficientes de ajuste de las curvas los cuales están dados en la siguiente tabla de acuerdo a la magnitud del área tabla 10.

Tabla 8 Coeficientes de ajuste de curvas para determinar la longitud característica.

AREA (AR)	h/l_0	A	B
$AR \geq 23$	5	3,275	0,1039
$21 < AR < 23$	10	3,691	0,0948
$19 < AR < 21$	20	2,8	0,1044
$AR < 19$	40	2,371	0,1096

Fuente: INVIAS, Bogotá. 2008. [10]

Una vez calculados estos parámetros se procede a realizar el cálculo del módulo resiliente por retrocálculo mediante la siguiente ecuación (20).

$$M_{rr} = m * \frac{P}{d_0} * l_0^n \quad (20)$$

- M_{rr} : Modulo resiliente por retrocálculo (MPa)
- P : Carga aplicada en el impacto estandarizada (kPa)
- d_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (μm)
- l_0 : Longitud característica (cm)
- m y n : Coeficientes de ajuste de las curvas del modelo de Hogg

Los parámetros m y n son los coeficientes de ajuste de las curvas los cuales están dados en la siguiente tabla de acuerdo a la magnitud del área tabla 11.

Tabla 9 Coeficientes de ajuste de curvas para determinar el módulo equivalente de la subrasante.

AREA (AR)	h/l ₀	M	N
AR ≥ 23	5	926,9	-0,8595
21 < AR < 23	10	1152,1	-0,8782
19 < AR < 21	20	1277,6	-0,8867
AR < 19	40	1344,2	-0,8945

Fuente: INVIAS, Bogotá. 2008. [10]

Una vez calculado el módulo resiliente por retrocálculo determinamos el número estructural efectivo ecuación (21).

$$SN_{ef} = 2 * [0.0182 * l_0 * \sqrt[3]{M_{rr}}] - 0.5 \quad (21)$$

- SN_{ef} : Numero estructural efectivo
- l_0 : Longitud característica (cm)
- M_{rr} : Modulo resiliente por retrocálculo (Kg/cm_2)

Capítulo V: Metodología

Este trabajo contempla el estudio de dos tipos de estructuras de pavimentos, estructuras de pavimentos flexibles convencionales a base de materiales granulares y estructuras de pavimentos flexibles a base de RAP estabilizado, los cuales se analizaron mediante ensayo IN SITU no destructivo FWD, se dividió en cuatro etapas; la primera la recopilación de información de trabajos de medición de deflexiones para pavimentos reciclados y convencionales a nivel mundial y nacional utilizando el FWD; la segunda etapa se efectuó el trabajo de campo haciendo el ensayo IN SITU de deflectometría FWD para ocho (8) tramos viales de la localidad de Usme; la tercera etapa se realizó obtenciones de módulos y números estructurales por medio de Retrocálculo y en la última etapa se realiza el análisis de los datos, y se efectúa una comparación de costos para cada estructura de pavimento.

- **Recopilación de la información:**

Se realizó una base de datos de investigaciones realizadas utilizando FWD a nivel mundial y a nivel nacional, en donde se tiene la información de las deflexiones obtenidas, además se contó con las hojas de vida de los segmentos evaluados las cuales fueron proporcionadas por la UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACION Y MANTENIMIENTO VIAL – UAERMV la cual permitió conocer las condiciones de diseño y parámetros iniciales de los segmentos viales a evaluados.

- **Selección de vías a estudiar**

Para esta investigación se identificaron ocho (8) segmentos viales con una longitud total de aproximadamente 635 metros. Estos tramos se dividen en dos categorías, pavimentos flexibles convencionales y pavimentos flexibles reciclados de acuerdo a su estructura. Su clasificación se realizó dependiendo las hojas de vida suministradas por la UAERMV. Estos segmentos viales se

localizan en la Localidad de Usme, UPZ Alfonso López, las cuales fueron intervenidas por parte de la UAERMV.

- Retrocálculo

El retrocálculo de los pavimentos se realizó mediante las metodologías AASHTO, YONAPAVE y LUKANEN. La metodología AASHTO considera como variable principal el cálculo del módulo resiliente de la estructura del pavimento “Ep” y con base en ello determina los números estructurales efectivos y el módulo de la subrasante tomando en cuenta solo los datos de los sensores que estén por encima del 70% del cuenco de deflexión.

La metodología YONAPAVE se basa en el modelo de Hoog el cual estudia el pavimento como si se tratase de una sola capa multigranular. En este método se calcula el parámetro AREA que corresponde a la interfaz que se desarrolla por debajo del cuenco de deflexiones y la longitud característica, la cual se define como el punto de inflexión de la curva que forma el cuenco. A partir de esto se precisa el número estructural efectivo y el módulo resiliente por retrocálculo.

Finalmente, el método LUKANEN también se basa en el modelo de Hogg. Aquí se calcula el “R50” que corresponde a la distancia horizontal desde DO donde la deflexión es la mitad de la deflexión principal; también, como en el método YONAPAVE se evalúa la longitud característica y con ello se determina el número estructural efectivo y el módulo resiliente por retrocálculo.

- Análisis de datos

El análisis de datos se realizó haciendo comparaciones de los cálculos obtenidos en cada método, además, como elemento adicional se hizo el cálculo de módulos y números estructurales teóricos con parámetros asumidos. Como herramienta tecnológica se utilizó el software BAKFAA para obtener módulos de las capas del pavimento y de la subrasante. Entre los análisis realizados se encuentra la comparación de módulos y números estructurales tanto por método de retrocálculo

como por tipo de estructura (GRANULARES, GRANULARES CON RAJON y RAP). Con lo anterior se trató de identificar que estructura se comportó mejor durante el periodo en uso y que falencias tiene a nivel de materiales utilizados y subrasante. Conjuntamente se estudiaron las deflexiones obtenidas ya que entre mayor sean las mismas peor condición tiene el pavimento y de esto dependerá la conformación del cuenco tanto de cada punto tomado como de cada CIV estudiado.

5.1. Recopilación de la información

Por medio del Fondo de Desarrollo Local de Usme – FDLU y LA UAERMV, este último como ejecutor de las obras de “CONSTRUCCIÓN, RECONSTRUCCIÓN, REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS VÍAS LOCALES”, actividades objeto del Convenio Interadministrativo de Cooperación No. 1292 de 2012 con cargo al presupuesto del Fondo de Desarrollo Local; Se tuvo la información de las hojas de vida de los segmentos viales ejecutados e intervenidos para la localidad quinta (5) de Usme, en donde hubo un total de 120 segmentos viales y de los cuales se escogieron 8 para esta investigación, los cuales se eligieron con criterios como condiciones similares en cuestiones de transitabilidad y ubicación de la misma zona, además que se contempló los dos tipos de estructuras a evaluar para esta investigación; estas hojas de vida nos suministran la información desde la planeación, diseño y construcción de las vías, hasta su finalización, aportándonos información esencial de la estructura final y de los materiales empleados para su construcción.

5.2. Trabajo de campo

Para el trabajo de campo, se realizó el ensayo IN SITU no destructivo de deflectometría **FWD**, el cual se realizó teniendo en cuenta la norma INV-E-198-07, y en donde se utilizó el equipo **FDW KUAB 50/150/240 (Deflectómetro de Impacto)** (ver imagen 23).



Imagen 23 Deflectómetro de impacto (FWD) del modelo KUAB 150
Fuente: Autor

El Equipo cuenta con 7 geófonos o sensores, el espaciamiento entre sensores es de 300 mm imagen 23. Los sensores son del tipo sismómetro tabla 12.

Tabla 10 Distribución de los geófonos o sensores del equipo FDW.

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

Fuente: Autor



Imagen 24 Geófono o sensores del equipo
Fuente: Autor.

Para el proceso de selección de los tramos que se escogieron, se tuvo en cuenta dos tipos de estructuras de pavimentos, estructuras de pavimentos flexibles convencionales a base de materiales granulares y estructuras de pavimentos flexibles a base de RAP estabilizado, este tipo de vías corresponde a vía local de tráfico liviano, los segmentos viales que corresponden a estructuras de RAP estabilizado se relacionan en la tabla 11 y se discriminan con su Código de Identificación Vial CIV.

Tabla 11 CIV'S RAP Estabilizado evaluados con deflectometría.

ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE CON RAP ESTABILIZADO							
CODIGO	NOMBRE UZP	BARRIO	CIV	EJE VIAL	INICIAL	FINAL	PUNTOS
PR1	ALFONSO LOPEZ	PUERTA AL LLANO	5007251	CL 114F SUR	AC 115 SUR	KR 7I E	7
PR2	ALFONSO LOPEZ	PUERTA AL LLANO	5007295	CL 114F SUR	KR 7I E	KR 8C E	7

PR3	ALFONSO LOPEZ	PUERTA AL LLANO	5007321	CL 114F SUR	KR 8C E	KR 9 E	4
-----	------------------	--------------------	---------	-------------------	---------	--------	---

Fuente: Autor.

Estos segmentos viales con CIV'S: 5007251, 5007295, 5007321, contemplan CBR de diseño de la subrasante encontrada de 6.4%² y una estructura imagen 25.

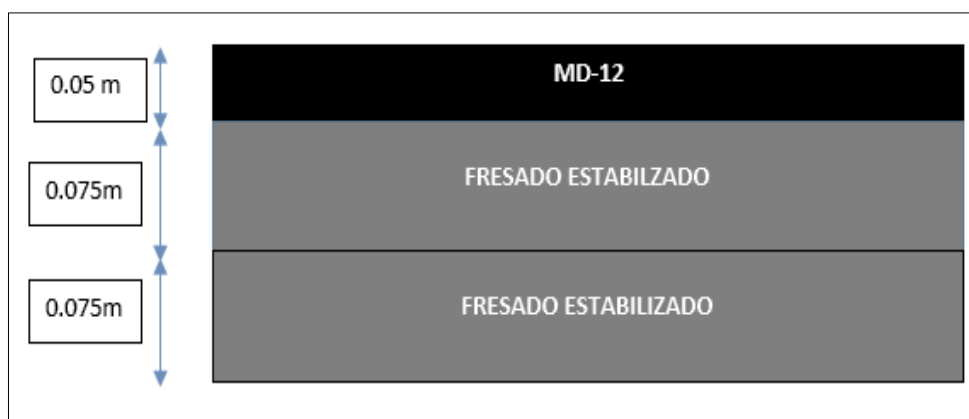


Imagen 25 Estructura Pavimento con RAP estabilizado.
Fuente: Autor.

² ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PAVIMENTOS PARA CONSTRUCCIÓN Y/O REHABILITACIÓN DE LAS VÍAS PRIORIZADAS EN CABILDOS DE LA LOCALIDAD DE USME CIV 5007251, 5007295, 5007321 (UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL – UAERMV - 2012)



Imagen 26 Vías evaluadas con estructura de RAP estabilizado.
Fuente: Autor.

Los segmentos viales que corresponden a estructuras convencionales a base de agregados pétreos se relacionan en la tabla 12 y se discriminan con su Código de Identificación Vial CIV:

Tabla 12 CIV'S a base de agregados pétreos evaluados con deflectometría.

ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE CON AGREGADOS PETREOS							
CODIGO	NOMBRE UZP	BARRIO	CIV	EJE VIAL	INICIAL	FINAL	PUNTOS
PG1	ALFONSO LOPEZ	PROGESRO II SECTOR LA REFORMA	5007879	KR 6E	CLL 84 B SUR	CLL 85 A SUR	6
PG2	ALFONSO LOPEZ	PROGESRO II SECTOR LA REFORMA	5004239	KR 6E	CLL 83D SUR	CLL 84 B SUR	5
PGr1	ALFONSO LOPEZ	BARRIO LA COMUNA	5003992	KR 6E	CLL 83 SUR	CLL 83 BIS SUR	2
PGr2	ALFONSO LOPEZ	BARRIO LA COMUNA	5004075	KR 6E	CLL 83 BIS SUR	CLL 83 A SUR	2

PGr3	ALFONSO LOPEZ	BARRIO LA COMUNA	5003929	KR 6E	CLL 83 A SUR	CLL 83 B SUR	2
------	---------------	------------------	---------	-------	--------------	--------------	---

Fuente: Autor.

Estos segmentos viales con CIV'S: 5007879, 5004239, contemplan CBR de diseño de la subrasante encontrada de 4.5%³ y una estructura imagen 27.

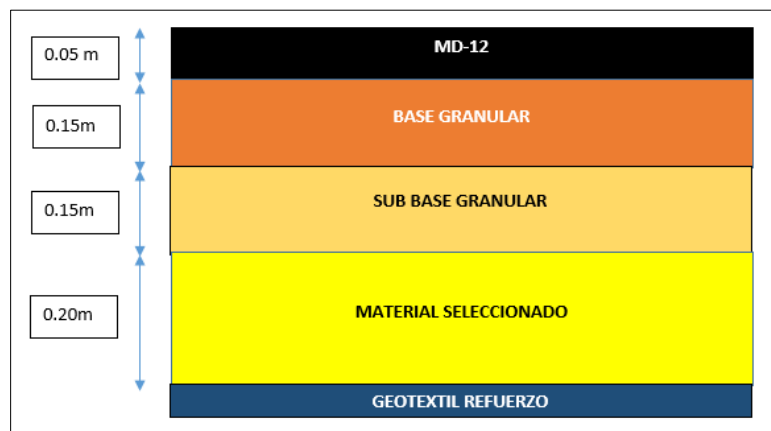


Imagen 27 Estructura Pavimento con materiales pétreos. Estructura 1

Fuente: Autor.

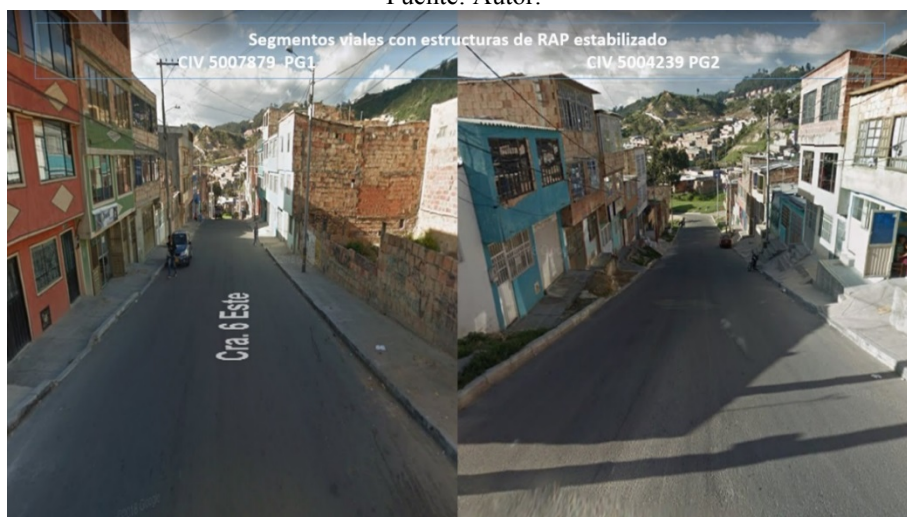


Imagen 28 Vías evaluadas con estructura de materiales pétreos.

Fuente: Autor.

³ ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PAVIMENTOS PARA CONSTRUCCIÓN Y/O REHABILITACIÓN DE LAS VÍAS PRIORIZADAS EN CABILDOS DE LA LOCALIDAD DE USME CIV 5007879, 5004239 (UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL – UAERMV -2012).

Estos segmentos viales con CIV'S: 5003992, 5004075, 5003929, contemplan CBR de diseño de la subrasante encontrada de 2.8%⁴ y una estructura, imagen 29.

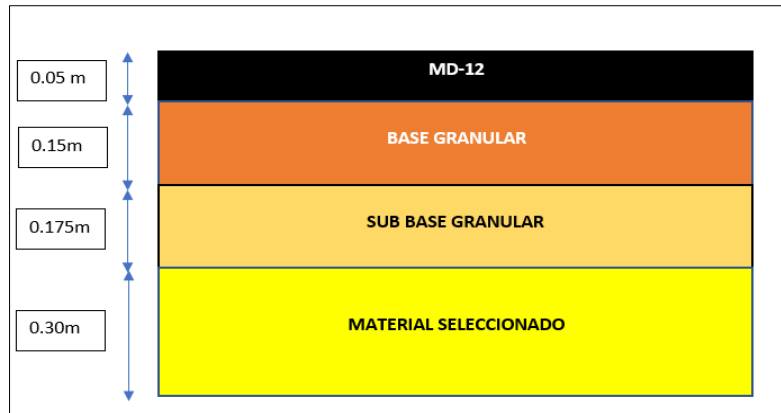


Imagen 29 Estructura Pavimento con materiales pétreos. Estructura 2.
Fuente: Autor.



Imagen 29 Vías evaluadas con estructura de materiales pétreos y mejoramiento con piedra rajón.
Fuente: Autor.

⁴ ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PAVIMENTOS PARA CONSTRUCCIÓN Y/O REHABILITACIÓN DE LAS VÍAS PRIORIZADAS EN CABILDOS DE LA LOCALIDAD DE USME CIV 5003992, 5004075, 5003929 (UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL – UAERMV - 2012).

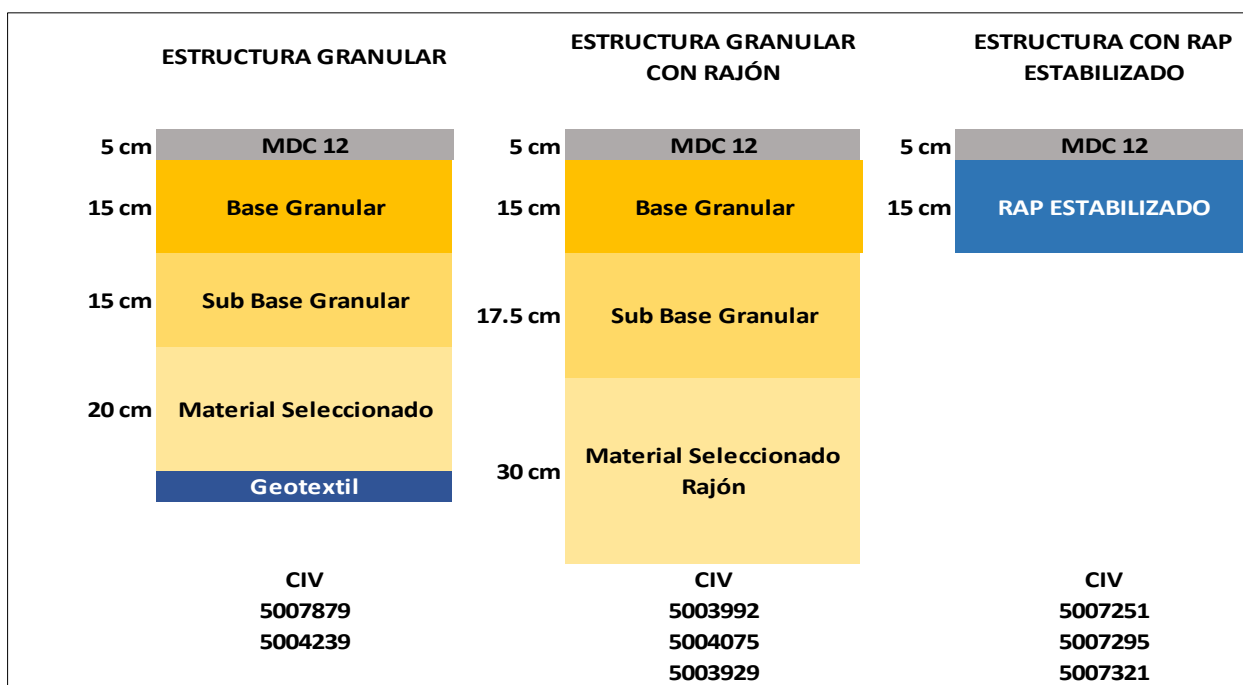


Imagen 30 Estructuras evaluadas.
Fuente: Autor.

5.3. Realización del ensayo IN SITU

Se realizó el ensayo IN SITU FWD mediante el deflectómetro de impacto el día 18 de agosto de 2018, día en el cual se desarrollaron todas las vías seleccionadas de acuerdo a los CIV'S ya clasificados realizando una demarcación en el terreno del lugar donde se efectuaban las pruebas.

De acuerdo a la norma INVIAE E - 798-07 se efectuaron ensayos con intervalos separados cada 20 m en los segmentos viales con estructuras de pavimentos flexibles y materiales reciclado RAP estabilizado como se muestra en la Imagen No. 31, y estructuras de pavimentos flexibles con materiales convencionales granulares como se muestra en la Imagen No. 32.



Imagen 31 Localización toma de deflexiones Pavimentos reciclados
Fuente: Autor.

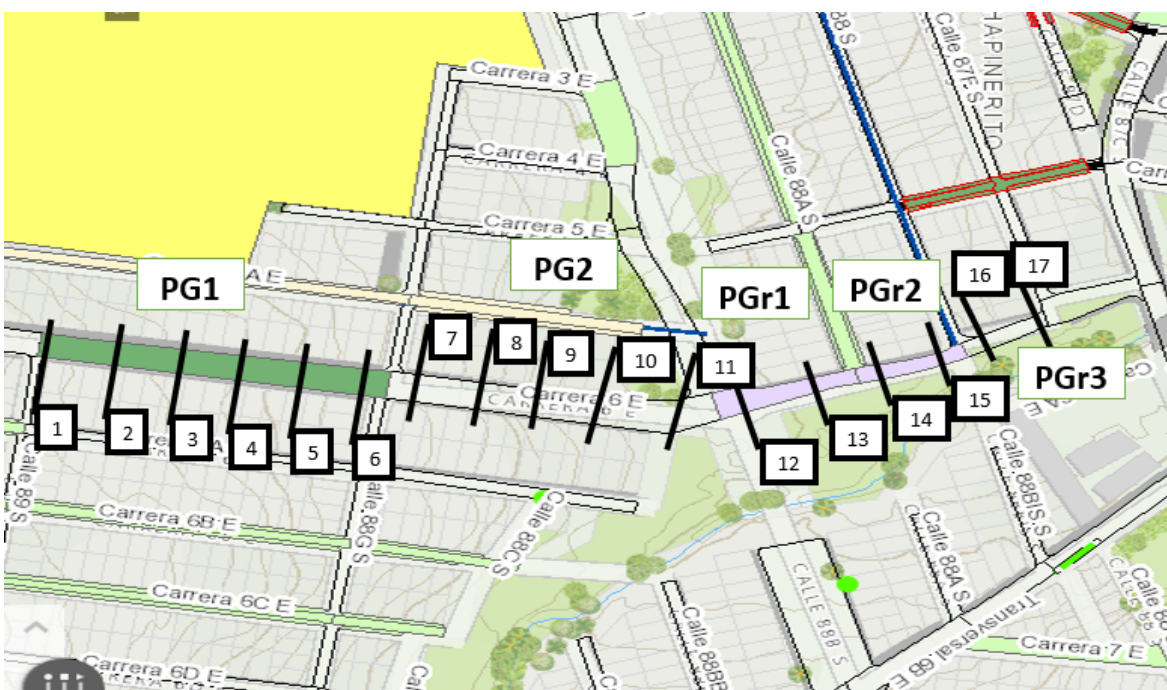


Imagen 32 Localización toma de deflexiones Pavimentos Granulares.
Fuente: Autor.

Se decidió por cada CIV hacer una prueba cada 20 metros a lo largo del mismo evitando lugares tales como alcantarillas o redes de cualquier tipo tal cual muestran imagen 33.

CIV 5007251 CODIGO PR1 	CIV 5007295 CODIGO PR2 
CIV 5007321 CODIGO PR3 	CIV 5007879 CÓDIGO PG1 
CIV 5004239 CÓDIGO PG2	CIV 5004075 CÓDIGO PGr2



CIV 5003992 CÓDIGO PGr1



CIV 5003929 CÓDIGO PGr3



Imagen 33 Vías evaluadas con deflectómetro de impacto FWD – Usme
Fuente: Autor

Una vez realizado los laboratorios, fueron recibidos los datos crudos por parte de ITINERIS el día 21 de agosto de 2018 los cuales se presentan en el Anexo 1, se digitalizó con el fin de comenzar a procesar la información.

Capítulo VI: Procedimiento

6.1. Cálculos para la implementación de los métodos AASHTO, LUKANEN y

YONAPAVE

6.1.1. Estandarización de la carga a 40 kN

Una vez se obtuvieron los resultados crudos del deflectómetro de impacto, se debe estandarizar las deflexiones a 40 KN ya que el deflectómetro impacta con fuerzas que oscilan entre los 40 KN hasta los 43 KN, luego se realiza un promedio de los dos golpes efectuados por el FWD de la siguiente manera:

Tabla 13 Datos crudos abscisa k 0+ 00, CIV 5007879, PG1.

P(kN)	D (μ m)0	D (μ m)30	D (μ m)60	D (μ m)90	D (μ m)120	D (μ m)150	D (μ m)180	Tair (°C)	Tpav (°C)
42,5	510	374	215	119	80	53	43	15	16
42,3	507	373	216	119	80	54	44	15	16

Fuente: Autor.

Para el primer golpe de la deflexión D0 se tiene que, corrección de carga ecuación (22).

$$\frac{40 \text{ kN} * 510 \mu\text{m}}{42.5 \text{ kN}} = 480 \mu\text{m} \quad (22)$$

Y así para cada deflexión medida, tabla 24.

Tabla 14 Datos con carga estandarizada a 40 KN.

P(kN)	D (μ m)0	D (μ m)30	D (μ m)60	D (μ m)90	D (μ m)120	D (μ m)15 0	D (μ m)18 0	Tair (°C)	Tpav (°C)
40	480,00	352,00	202,35	112,00	75,29	49,88	40,47	15	16
40	479,43	352,72	204,26	112,53	75,65	51,06	41,61	15	16

Fuente: Autor.

6.1.2. Promedio efectivo de deflexiones

Con los resultados anteriores se promedian los dos golpes ecuación (23).

Para D0

$$\frac{480 \mu m + 479.43 \mu m}{2} = 479.72 \mu m \quad (23)$$

Y así para cada deflexión medida, luego:

Tabla 15 Promedio de deflexiones

P (kN)	D (μm)0	D (μm)30	D (μm)60	D (μm)90	D (μm)120	D (μm)150	D (μm)180	Tair (°C)	Tpav (°C)
40,0	479,72	352,36	203,30	112,26	75,47	50,47	41,04	15	16

Fuente: Autor.

6.1.3. Cuenco de deflexiones por segmento vial CIV

Con base en la anterior información el cuenco de deflexiones estandarizado para la abscisa k0+00 sería el siguiente:

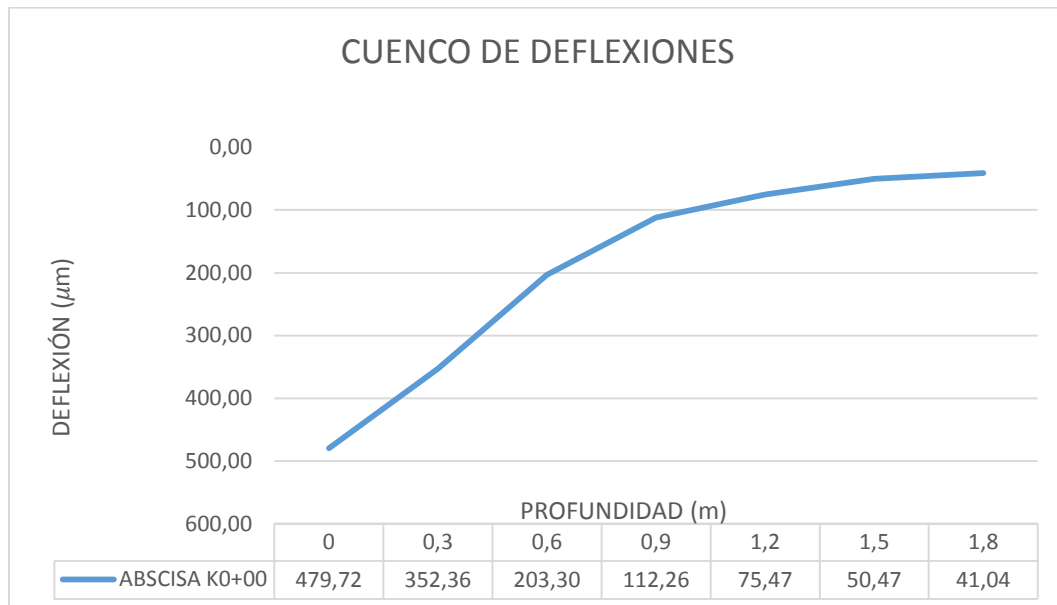


Imagen 34 Cuenco de deflexión CIV5007879

Fuente: Autor

El anterior procedimiento se repitió en cada abscisa medida por segmento vial evaluado (CIV) obteniéndose el cuenco de deflexiones de todo el tramo tal como se muestra a continuación:



Imagen 35 Cuenco de deflexiones para PG1
Fuente: Autor

Finalmente con el procedimiento visto se obtienen los siguientes cuencos de deflexiones para cada segmento vial evaluado:

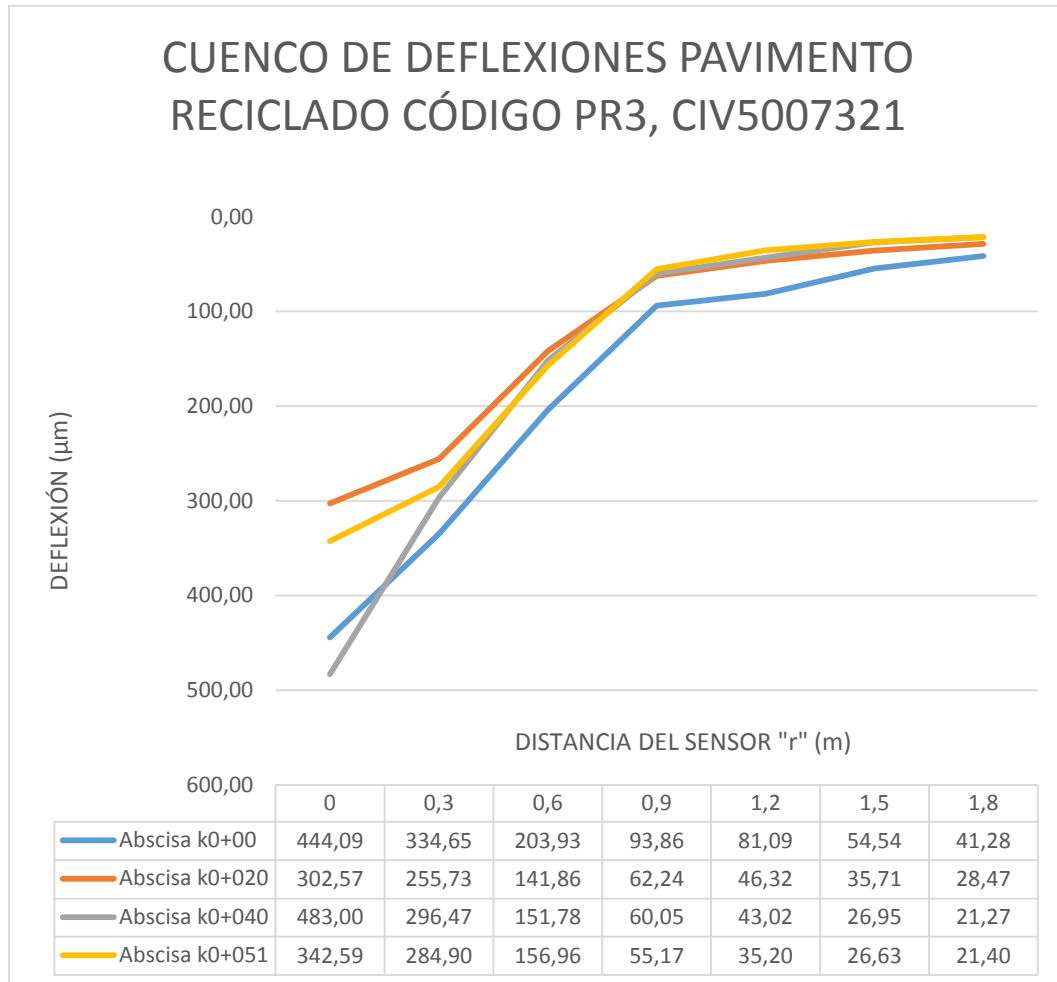


Imagen 36 Cuenco de deflexiones para PR3

Fuente: Autor

CUENCO DE DEFLEXIONES PAVIMENTO RECICLADO CÓDIGO PR2, CIV5007295

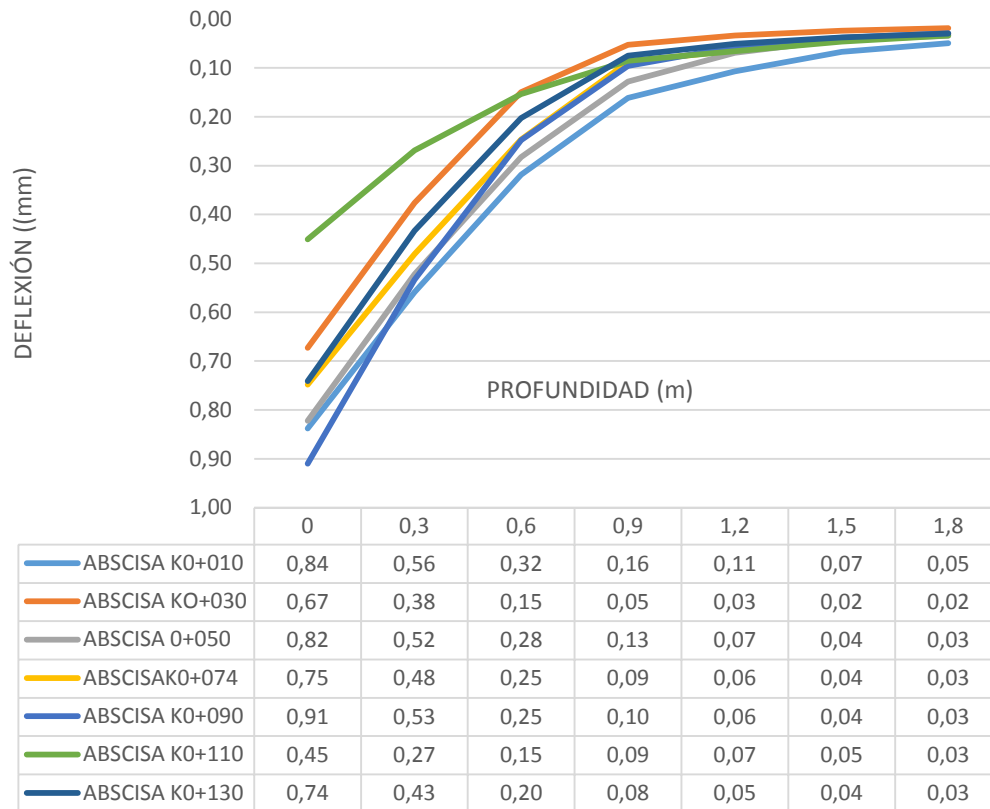
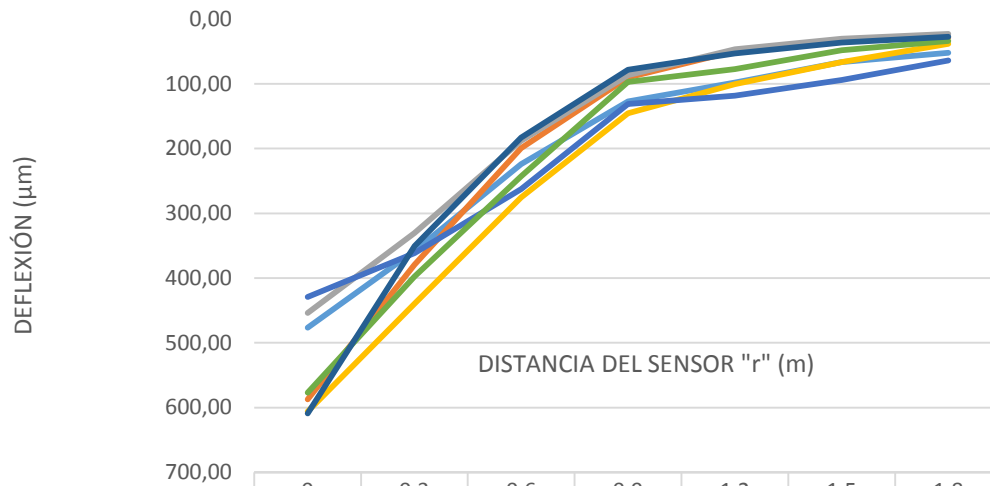


Imagen 37 Cuenco de deflexiones para PR2
Fuente: Autor

CUENCO DE DEFLEXIONES PAVIMENTO RECICLADO CÓDIGO PR1, CIV5007251



	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
ABSCISA K0+00	476,78	358,17	224,04	127,40	98,08	66,35	51,92
ABSCISA K0+020	587,07	379,08	199,51	90,02	49,64	32,60	28,22
ABSCISA 0+040	453,67	330,18	188,12	86,79	46,55	30,55	22,79
ABSCISA K0+060	606,27	439,42	275,43	145,50	100,73	66,18	38,44
ABSCISA K0+080	429,06	361,44	262,55	131,03	118,17	93,94	63,78
ABSCISA K0+100	577,01	397,57	242,93	97,07	77,07	48,29	33,66
ABSCISA K0+109	608,89	350,37	183,14	78,07	53,01	36,14	27,47

Imagen 38 Cuenco de deflexiones para PR1

Fuente: Autor

CUENCO DE DEFLEXIONES PAVIMENTO GRANULAR CÓDIGO PG2, CIV5004239

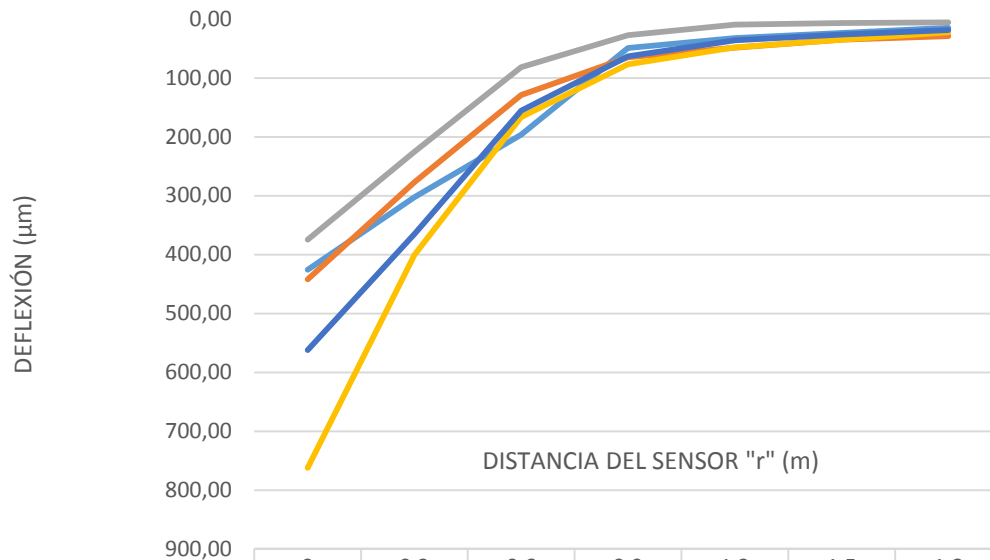


Imagen 39 Cuenco de deflexiones para PG2

Fuente: Autor

CUENCO DE DEFLEXIONES PAVIMENTO GRANULAR CÓDIGO PGr2, CIV5004075

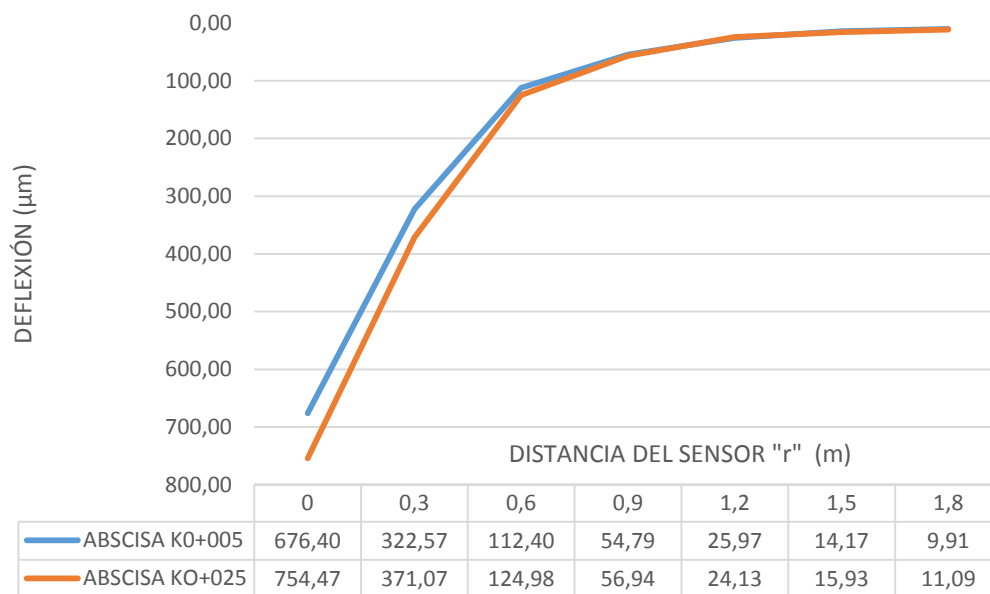


Imagen 40 Cuenco de deflexiones para PGr2
Fuente: Autor

CUENCO DE DEFLEXIONES PAVIMENTO GRANULAR CÓDIGO PGr1, CIV5003992

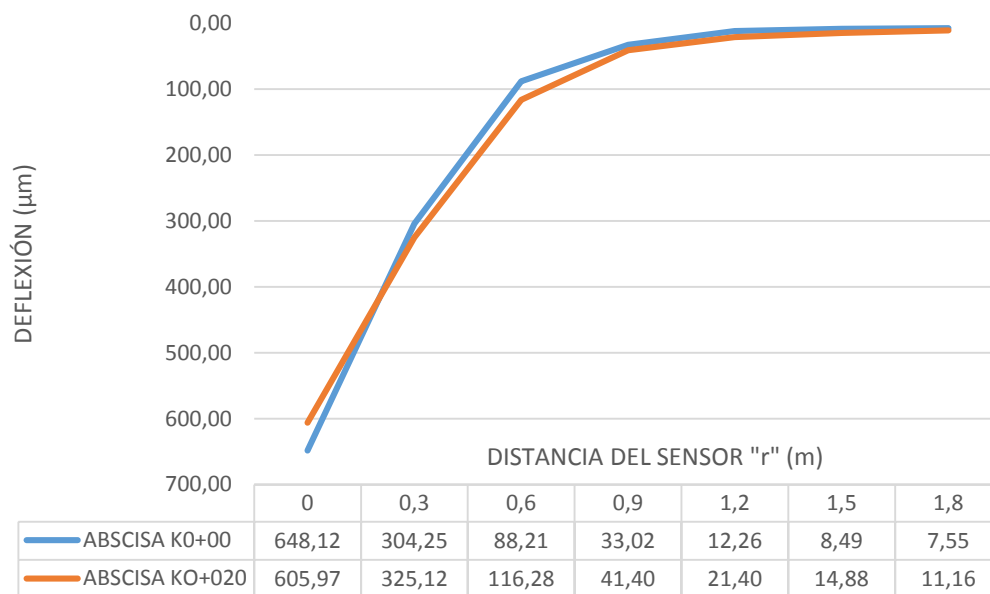


Imagen 41 Cuenco de deflexiones para PGr1
Fuente: Autor

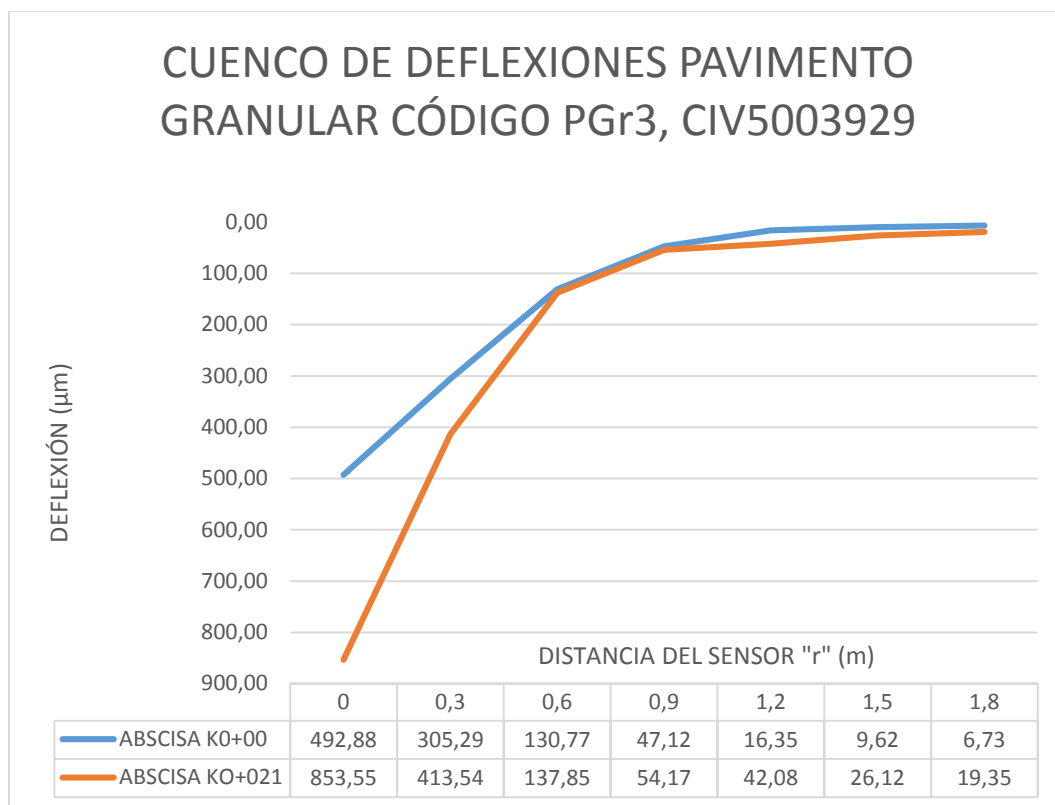


Imagen 42 Cuenco de deflexiones para PGr3
Fuente: Autor

6.2. Aplicación de los métodos seleccionados procedimiento método AASHTO

Se realizó la conversión a medidas al sistema inglés, con el fin de trabajar las unidades para el método AASHTO:

Tabla 16 Promedio de deflexiones en la abscisa k0 + 00 en sistema ingles CIV 5007879

P(lb)	D (in)0	D (in)30	D (in)60	D (in)90	D (in)120	D (in)150	D (in)180	Tair (°C)	Tpav (°C)
8992,36	0,0192	0,0141	0,0081	0,0045	0,0030	0,0020	0,0016	15	16

Fuente: Autor

Lo primero que se debe hacer en este método es calcular el Modulo resiliente (Mrr) por retro cálculo el cual se evalúa en la ecuación (24).

$$M_{rr} = \frac{0.24P}{d_r * r} \quad (24)$$

- P = Carga estandarizada del plato (40 kN)
- dr = Deflexión medida a la distancia r desde el centro del plato de carga
- r = Distancia desde el centro del plato de la carga (D0, D30, D60, D90, D120, D150, D180)

Para que el módulo resiliente nos dé en PSI la carga (P) debe estar en libras, dr en pulgadas y r en pulgadas ecuación (25). Para el cálculo del Mrr del segmento vial con CIV 5007879, los cálculos se muestran en la tabla 27.

Tabla 17 Promedio de deflexiones en la abscisa k0 + 00 en sistema ingles

K 0+ 00										
	P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71	Tair (°C)	Tpav (°C)
GOLPE ₁	8992,36	0,0189	0,0139	0,0080	0,0044	0,0030	0,0020	0,0016	15	16
GOLPE ₂	8992,36	0,0189	0,0139	0,0080	0,0044	0,0030	0,0020	0,0016	15	16
PROMEDIO	8992,36	0,0192	0,0141	0,0081	0,0045	0,0030	0,0020	0,0016	15	16

Fuente: Autor

$$M_{rr} = \frac{0.24 * 8992.36 \text{ lb}}{12 \text{ in} * 0.0192 \text{ in}} = 12961.07 \text{ PSI} \quad (25)$$

Tabla 18 Módulo resiliente por Retrocálculo en la abscisa k0+00 en cada punto r medido.

K 0+ 00							
P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71
Mrr (Psi)	N/A	12961,07	11231,83	13560,07	15127,95	18096,59	18547,18

Fuente: Autor

El módulo elástico del pavimento (E_p), se determinó mediante ecuación (26).

$$D_o = 1.5qa \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (26)$$

- D_o = valor de la deflexión medida en el centro del plato de carga en DO
- a = radio del plato de carga
- M_r = Módulo resiliente por Retrocálculo
- H_T = espesor total de la estructura del pavimento
- q = Carga estandarizada

Tabla 19 Modulo elástico del pavimento en la abscisa k0+00 en cada punto r medido.

P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71
Ep (psi)	N/A	96651,60	74251,13	89029,95	107093,96	145344,92	132448,42

Fuente: Autor

Para el cálculo del número estructural efectivo (SN_{ef}) del pavimento, se utiliza la ecuación (27).

$$SN_{ef} = 0.0045 H_T^3 \sqrt[3]{E_p} \quad (27)$$

- H_T = espesor total de la estructura del pavimento

- E_p = Modulo elástico del pavimento

Tabla 20 Numero estructural del pavimento en la abscisa k0+00 en cada punto r medido.

P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71
SN	N/A	4,47	4,10	4,35	4,63	5,12	4,97

Fuente: Autor

Luego de calcular el módulo resiliente por Retrocálculo (M_{rr}), multiplicamos este valor de M_{rr} por una constante C que es igual a 0.33 recomendada por el método AASHTO 93, debido a que los valores calculados son mucho mayores a los obtenidos por ensayos de laboratorio.

Tabla 21 Módulo resiliente corregido en la abscisa k0+00 en cada distancia (r) medido

P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71
Mr (PSI)	N/A	4277,15	3706,50	4474,82	4992,22	5971,88	6120,57

Fuente: Autor

Luego calculamos el radio del bulbo de tensión en la interface subrasante-pavimento con la ecuación (28).

$$a_e = \sqrt{[a^2 + \left(H_T * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{rr}}}\right)^2]} \quad (28)$$

- a = radio del plato de carga
- H_T = espesor total de la estructura del pavimento
- E_p = Modulo elástico del pavimento
- M_{rr} = Módulo resiliente por Retrocálculo

Tabla 22 Bulbo de tensión en la interface subrasante-pavimento en la abscisa k0+00.

P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71	PROMEDIO
Ae (in)	N/A	42,71	41,07	40,97	41,99	43,76	42,11	42.10

Fuente: Autor

Luego, de acuerdo a lo recomendado por la AASHTO 93 se deben tomar en cuenta los datos obtenidos de los valores de r que estén por encima del 70% de ae conforme a la ecuación (29).

$$r \geq 0.7a_e \quad (29)$$

Tabla 23 70% del bulbo de tensión en la interface subrasante-pavimento en la abscisa k0+00.

P(lb)	D (in)0	D (in)12	D (in)24	D (in)35	D (in)47	D (in)59	D (in)71	PROMEDIO
0,7ae	N/A	29,90	28,75	28,68	29,40	30,64	29,48	29,47

Fuente: Autor

Para los datos anteriores, se tomaron en cuenta los que estuvieron por encima de 29.47 in, para este caso específico tomaremos el D12, D47, D59 Y D71.

Los resultados para cada CIV se evidencian en el Anexo No. 2.

6.3. Procedimiento método LUKANEN

Para poder determinar las variables de este método se tienen en cuenta los Coeficientes del modelo de Hogg los cuales son los siguientes:

Tabla 24 Coeficiente de Hogg.

PROFUNDIDAD DEL ESTRATO RÍGIDO (ho/lo)=10										
CASO	POISSON	Dr/D0	A	B	C	X	Y	M	I	K
I	0,4	>0,426	2,629	0	0,548	0,192	0,602	0,48	0,1684	1,633
		<0,426	2283,4	3	0,2004	0,192	0,602	0,48	0,1684	1,633

Fuente: Guzmán Suarez. (2009) [9]

Debemos convertir la fuerza estandarizada de 40 kN a Kg y las deflexiones que están medidas en micrómetros a centímetros lo cual arroja lo siguiente para el CIV 5007879.

Tabla 25 Datos crudos CIV 50007879 - Código PG1

	P(k N)	D (Mm) 0	D (Mm) 30	D (Mm) 60	D (Mm) 90	D (Mm) 120	D (Mm) 150	D (Mm) 180	Tair (°C)	Tpav (°C)
	40	480.0 0	352.00	202.35	112.00	75.29	49.88	40.47	15	16
	40	479.4 3	352.72	204.26	112.53	75.65	51.06	41.61	15	16
PROM EDIO	40. 00	487.5 2	352.36	203.30	112.26	75.47	50.47	41.04	15	16

Fuente: Autor

Se realiza la conversión de unidades como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 26 Datos crudos deflexiones en cm y carga en Kg CIV 5007879 - Código PG1.

	P(k G)	D (cm) 0	D (cm) 30	D (cm) 60	D (cm) 90	D (cm) 120	D (cm) 150	D (cm) 180	Tair (°C)	Tpav (°C)
	4078 .8	0.048 0	0.0352	0.0202	0.0112	0.0075	0.0050	0.0040	15	16
	4078 .8	0.047 9	0.0352	0.0203	0.0112	0.0075	0.0050	0.0041	15	16
PROME DIO	4078 .80	0.048 8	0.0352	0.0203	0.0112	0.0075	0.0050	0.0041	15	16

Fuente: Autor

Se determinó la relación Dr/Do la cual nos indicó los valores a tomar de los coeficientes del modelo de Hogg ecuación (30).

$$\frac{0.0352}{0.048} = 0.735 \quad (30)$$

Ejemeplo cálculo $\frac{dr}{d0}$ en D30

Y así con todas las deflexiones como se muestra tabla 72.

Tabla 27 resultados relación Dr/Do para PG1

	D (cm)0	D (cm)30	D (cm)60	D (cm)90	D (cm)120	D (cm)150	D (cm)180
Dr/Do	1.000	0.723	0.417	0.230	0.155	0.104	0.084

Posteriormente se determinó la distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central r_{50} , ecuación (31) y ecuación (32).

$$r_{50} = r \frac{A^C - B}{\left[A \cdot \left\{ \frac{d_0}{d_r} - 1 \right\} \right]^C - B} \quad (31)$$

- r_{50} : Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central, en cm
- r : Distancia a la cual se mide la deflexión d_r , en cm
- d_0 : Deflexión central, en μm
- d_r : Deflexión medida a la distancia r , en μm
- A, B, C : Coeficientes de correlación método de Hogg

$$r_{50} = 30 * \frac{2.46^{0.592} - 0}{\left[2.46 * \left\{ \frac{479.72}{352.36} - 1 \right\} \right]^{0.592} - 0} = 54.80 \text{ cm} \quad (32)$$

Ejemplo cálculo r_{50} para relación de poisson de 0.5 CIV 5007879, Abscisa $k_0 + 00$

Tabla 28 Datos calculados r_{50} CIV 5007879 - código PG1.

Abse		D	D	D	D	D	D	D
K0+00		(cm)0	(cm)30	(cm)60	(cm)90	(cm)120	(cm)150	(cm)180
Dr/Do		1.000	0.723	0.417	0.230	0.155	0.104	0.084
POISSON	r50	N/A	50.72	50.37	51.33	56.72	60.23	66.93
0.4	(cm)							

Fuente: Autor

Luego debemos calcular la longitud característica la cual se determina mediante el empleo de la ecuación (33) y ecuación (34).

$$l_0 = \frac{Y \cdot r_{50} + \sqrt{(Y \cdot r_{50})^2 - 4 \cdot a \cdot X \cdot r_{50}}}{2} \quad (33)$$

- l_0 : Longitud característica, en cm
- a : Radio del plato de carga, en cm = 15 cm
- r_{50} : Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión central, en cm
- X, Y : Coeficientes de correlación de Hogg

$$l_0 = \frac{0.62 \cdot 54.80 + \sqrt{(0.62 \cdot 54.80)^2 - 4 \cdot 15 \cdot 0.183 \cdot 54.80}}{2} = 28.74 \text{ cm} \quad (34)$$

Ejemplo cálculo l_0 para deflexión en D30 y relación de poisson de 0.5 CIV 5007879, Abscisa $k_0 + 00$, tabla 74.

Tabla 29 Datos calculados D30 - CIV 5007879 - código PG1.

Absc K0+00		D (cm)0	D (cm)30	D (cm)60	D (cm)90	D (cm)120	D (cm)150	D (cm)180
Dr/Do		1.000	0.723	0.417	0.230	0.155	0.104	0.084
POISSON 0,4	L0 (cm)	N/A	25,66	24,82	25,26	28,64	30,82	34,99

Fuente: Autor

Luego debemos calcular la rigidez teórica de las rigideces mediante ecuación (35) y ecuación (36).

$$\frac{s_0}{s} = 1 - M \cdot \left(\frac{a}{l_0} - 0.20 \right) \quad (35)$$

- S_0 : Rigidez teórica por carga puntual, en kg/ μ m
- S : Rigidez del pavimento, en kg/ μ m

- l_0 : Longitud característica, en cm
- a : Radio del plato de carga, en cm
- M : Coeficiente para relación de rigideces de Hogg

$$\frac{S_0}{S} = 1 - 0.52 * \left(\frac{15}{28.74} - 0.20 \right) = 0.833 \quad (36)$$

Ejemplo cálculo $\frac{S_0}{S}$ para deflexión en D30 y relación de poisson de 0.5 CIV 5007879, Abscisa $k_0 + 00$

Tabla 30 Datos calculados S_0/S CIV 5007879 - código PG1

Absc K0+00		D (cm)0	D (cm)30	D (cm)60	D (cm)90	D (cm)120	D (cm)150	D (cm)180
Dr/Do		1.000	0.723	0.417	0.230	0.155	0.104	0.084
POISSON 0,4	So/S (cm)	N/A	0.803	0.801	0.808	0.842	0.861	0.889

Fuente: Autor

Luego calculamos el módulo resiliente por retrocálculo M_{rr} mediante ecuación (37) y ecuación (38).

$$M_{rr} = \left[\frac{K \cdot l \cdot P}{l_0 \cdot d_0} \right] \cdot \frac{S_0}{S} \quad (37)$$

- M_{rr} : Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante, en kg/cm²
- P : Carga aplicada, en kg
- d_0 : Deflexión central, en cm
- l_0 : Longitud característica, en cm

- S0/S: Relación de rigideces
- K: Coeficiente numérico modelo de Hogg
- I: Factor de influencia modelo de Hogg

$$M_{rr} = \left[\frac{1.5 * 0.16114 * 4078.8}{28.74 * 479.72} \right] * 0.833 = 595.19 \frac{kg}{cm^2} \quad (38)$$

Ejemplo cálculo Mrr para deflexión en D30 y relación de poisson de 0.5 CIV 5007879, Abscisa k0 + 00

Tabla 31 Datos calculados Mrr CIV 5007879 - código PG1.

Abs k0 +00		D (cm)0	D (cm)30	D (cm)60	D (cm)90	D (cm)120	D (cm)150	D (cm)180
Dr/Do		1.000	0.723	0.417	0.230	0.155	0.104	0.084
POISSON 0,4	Mrr (kg/cm2)	751.45	755.83	743.94	682.69	647.36	588.51	751.45

Fuente: Autor

Finalmente calculamos el Número estructural efectivo mediante ecuación (39) y ecuación (40).

$$SN_{ef} = 0.0182 * l_0 \sqrt[3]{M_{rr}} \quad (39)$$

- Mrr: Módulo resiliente de retrocálculo de la subrasante, en kg/cm2
- l0: Longitud característica, en cm

$$SN_{ef} = 0.0182 * 28.74 * \sqrt[3]{595.19} = 4.40 \quad (40)$$

Ejemplo cálculo SN_{ef} para deflexión en D30 y relación de poisson de 0.5 CIV 5007879, Abscisa $k0 + 00$

Tabla 32 Datos calculados SN_{ef} CIV 5007879 - Código PG1.

Abs $k0+00$		D (cm)0	D (cm)30	D (cm)60	D (cm)90	D (cm)120	D (cm)150	D (cm)180
Dr/Do		1.000	0.723	0.417	0.230	0.155	0.104	0.084
POISSON 0,4	SN_{ef}	N/A	4.07	4.04	4.12	4.55	4.82	5.30

Fuente: Autor

Los resultados por cada CIV por el método LUKANE se encuentran en el Anexo 3.

6.4. Procedimiento método YONAPAVE

Para este método se deben tener en cuenta los siguientes coeficientes

Tabla 33 Coeficientes de ajuste de curvas para determinar la longitud característica

AREA (AR)	h/lo	A	B	m	n
AR ≥ 23	5	3.275	0.1039	926.9	-0.8595
21 < AR < 23	10	3.691	0.0948	1152.1	-0.8782
19 < AR < 21	20	2.8	0.1044	1277.6	-0.8867
AR < 19	40	2.371	0.1096	1344.2	-0.8945

Fuente: Guzmán Suarez. (2009) [9]

Lo primero que se debe calcular es el área del cuenco de deflexiones mediante ecuación (40).

CIV 5007879

$$AREA = 6 \left[1 + 2 \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right] \quad (40)$$

$$6 * \left[1 + 2 * \frac{352.36}{479.72} + 2 * \frac{203.30}{479.72} + \frac{112.26}{479.72} \right] = 17.28 \text{ in} \quad (41)$$

Ejemplo cálculo Area del cuenco de deflexiones CIV 5007879 Abscisa k0 + 00

Tabla 34 Calculo área del cuenco de deflexiones CIV 5007879 Abscisa k0+00

AREA (in)	21,06
-----------	-------

Fuente: Autor

Luego, se debe calcular la longitud característica del área del cuenco de deflexiones la cual se hace mediante la siguiente expresión (Deben seleccionarse los coeficientes de ajuste de las curvas de acuerdo al rango donde encuentre el AREA), ecuación (42).

$$l_0 = Ae^{B \cdot AREA} \quad (42)$$

- l_0 = Longitud característica en cm
- A y B = Coeficientes de ajuste de curvas

$$l_0 = 2.371 * e^{0.1096 * 17.28} = 27.81 \text{ cm}$$

Ejemplo cálculo longitud característica CIV 5007879 Abscisa k0 + 00

Tabla 35 Calculo longitud característica CIV 5007879 Abscisa k0+00.

l_0 (cm)	27,18
------------	-------

Fuente: Autor

Luego debemos calcular el Modulo resiliente por Retrocálculo M_{rr} mediante la siguiente expresión, ecuación (43).

$$M_{rr} = m * \frac{P}{D_0} * l_0^n \quad (43)$$

- m y n = Coeficientes de ajuste de las curvas

- P = Es la carga estandarizada en Kpa
- Do = deflexión en el Do
- lo = Longitud característica

$$Mrr = 1344.2 * \frac{400}{479.72} * 27.81 = 51.8 \text{ Mpa}$$

Ejemplo cálculo Modulo resiliente por retrocalculo CIV 5007879 Abscisa k0 + 00

Tabla 36 Calculo Modulo resiliente por retrocálculo CIV 5007879 Abscisa k0+00.

Mrr(Mpa)	73,6
----------	------

Fuente: Autor

Finalmente calculamos el número estructural efectivo mediante la siguiente ecuación:

$$SN_{ef} = 2[0.0182 * l_o \sqrt[3]{M_{rr}}] - 0.5 \quad (44)$$

$$SN_{ef} = 2 * [0.0182 * 27.81 * \sqrt[3]{21.8}] - 0.5 = 3.27 \quad (45)$$

Tabla 37 número estructural efectivo CIV 5007879 Abscisa k0+00.

Snef	3,64
------	------

Fuente: Autor

Los resultados por cada CIV por el método YONAPAVE se encuentran en el Anexo 4.

6.5. Procedimiento software BAKFAA

Para realizar el retrocálculo de los módulos resilientes a través de BAKFAA, se tomaron en cuenta los datos de la abscisa en la cual la deflexión central era la mayor de las medidas en todo el tramo, se asumió un módulo teórico para la carpeta asfáltica el cual se dejó fijo en 5000 MPa, una relación de Poisson de 0,35 para la capa de rodadura y granulares y de 0,45 para la subrasante:

Los primeros datos crudos que se digitan en el cuadro de dialogo del programa son las deflexiones medidas por el deflectómetro de impacto en todos sus sensores:

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, mm	0.0	300.0	600.0	900.0	1200.0	1500.0	1800.0
Defln, mc	454.52	261.36	149.41	82.90	64.17	44.50	32.79

Imagen 43 ingreso de datos crudos al programa.

Fuente: Autor.

Posteriormente ingresamos la relación de Poisson de cada capa:

Poisson's Ratio	
	0.35
	0.35
	0.45

Imagen 44 Ingreso de relación de Poisson materiales del pavimento.

Fuente: Autor.

A continuación, hay que tener en cuenta si las capas entre sí, están ligadas o no; en caso de estar ligadas se debe colocar un 1 en el parámetro de interface:

Interface Parameter (0 to 1.0)	
	1.00
	1.00
	1.00

Imagen 45 ingreso de Características de las capas del pavimento.

Fuente: Autor.

Una vez se tiene lo anterior, se debe colocar el radio del plato de carga y la carga estandarizada que para este caso son 150 mm y 40 kN respectivamente:

Plate Radius, mm	Plate Load, KN
150	40

Imagen 46 Ingreso de datos del equipo FWD.
Fuente: Autor.

Y, finalmente se deben colocar los espesores de cada capa:

Thickness, mm
50.8000
149.9997
0.0000

Imagen 47 Ingreso de espesores de las capas del pavimento.
Fuente: Autor.

Con lo anterior, se corre el programa el cual arroja las deflexiones retro calculadas y los módulos resilientes por capa iterados:

Capítulo VII: Análisis

Una vez tomados los registros con el deflectómetro de impacto FWD y calculados los datos de Modulo resiliente (Mrr) y Numero estructural efectivo (SNef) por cada método, se establecieron los parámetros a tener en cuenta debido a que por cada CIV se tomaron entre dos y siete registros de acuerdo a la longitud del tramo. Por lo anterior, se promediaron los datos de las abscisas de los CIV, los cuales se evidencian en el Anexo 6.

7.1. Módulos Resilientes (Mrr)

7.1.1. Análisis módulo resiliente métodos LUKANEN, AASHTO, YONAPAVE y programa BAKFAA para los CIV medidos.

Con el fin de poder realizar una comparación con un modelo teórico se realizó el cálculo del módulo resiliente de diseño teniendo en cuenta el CBR seleccionado para el diseño original de cada tipo de estructura, en donde se utilizaron las correlaciones establecidas en Higuera (2011) ecuación (47).

$$Mr \left(\frac{lb}{in^2} \right) = 1500 * CBR \quad (47)$$

Tabla 38. Módulos resilientes teóricos de diseño de la estructura Granular, Rap y Granulares con Rajón.

ESTRUCTURA GRANULARES	
CBR APROX. DE DISEÑO (%)	Mr APROX. DISEÑO (lb/in ²)
4,5	6750
ESTRUCTURA RAP	
CBR APROX. DE DISEÑO (%)	MR APROX. DISEÑO (lb/in ²)
6,4	9600
ESTRUCTURA GRANULARES - RAJON	
CBR APROX. DE DISEÑO (%)	MR APROX. DISEÑO (lb/in ²)
2,8	4200

Fuente: Autor

Además de lo anterior se implementó el retrocálculo de los módulos resiliente de la subrasante mediante el programa BAKFAA desarrollado por U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration.

Una vez obtenidos los módulos resilientes promedios por CIV se procedió a comparar dichos resultados tanto por estructuras como entre métodos con el módulo resiliente teórico y de BAKFAA.

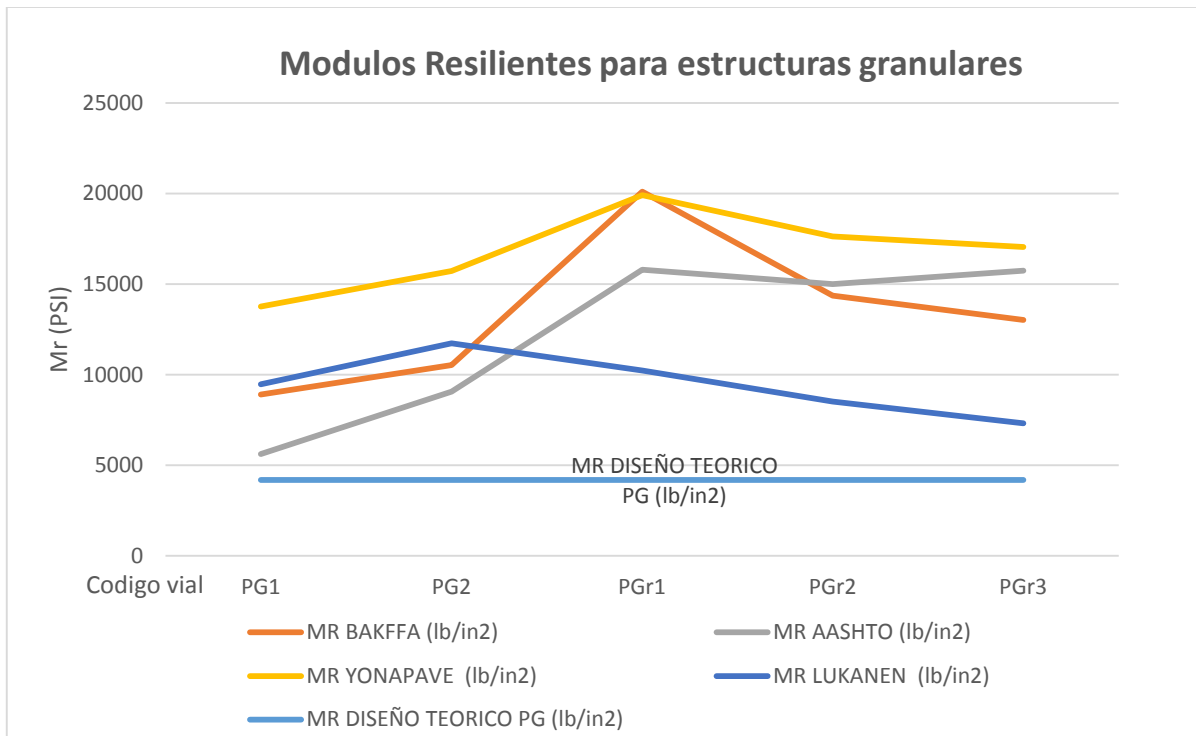
El resumen de los resultados de los módulos se muestra a continuación:

Tabla 39 Análisis comparativo de módulos resilientes.

CIV	CODIGO	DISEÑO CBR (%)	MR DISEÑO TEORICO (lb/in2)	MR BAKFFA (lb/in2)	MR AASHTO (lb/in2)	MR YONAPAVE (lb/in2)	MR LUKANEN (lb/in2)
5007879	PG1	4.5	6750	8902	5620	13768	9479
5004239	PG2	4.5	6750	10530	9060	15729	11737
5003992	PGr1	2.8	4200	20102	15796	19916	10234
5004075	PGr2	2.8	4200	14359	14992	17640	8517
5003929	PGr3	2.8	4200	13019	15733	17055	7314
5007251	PR1	6.4	9600	10434	5550	10794	9501
5007295	PR2	6.4	9600	12636	6218	12839	8356
5007321	PR3	6.4	9600	12349	8776	13199	13060

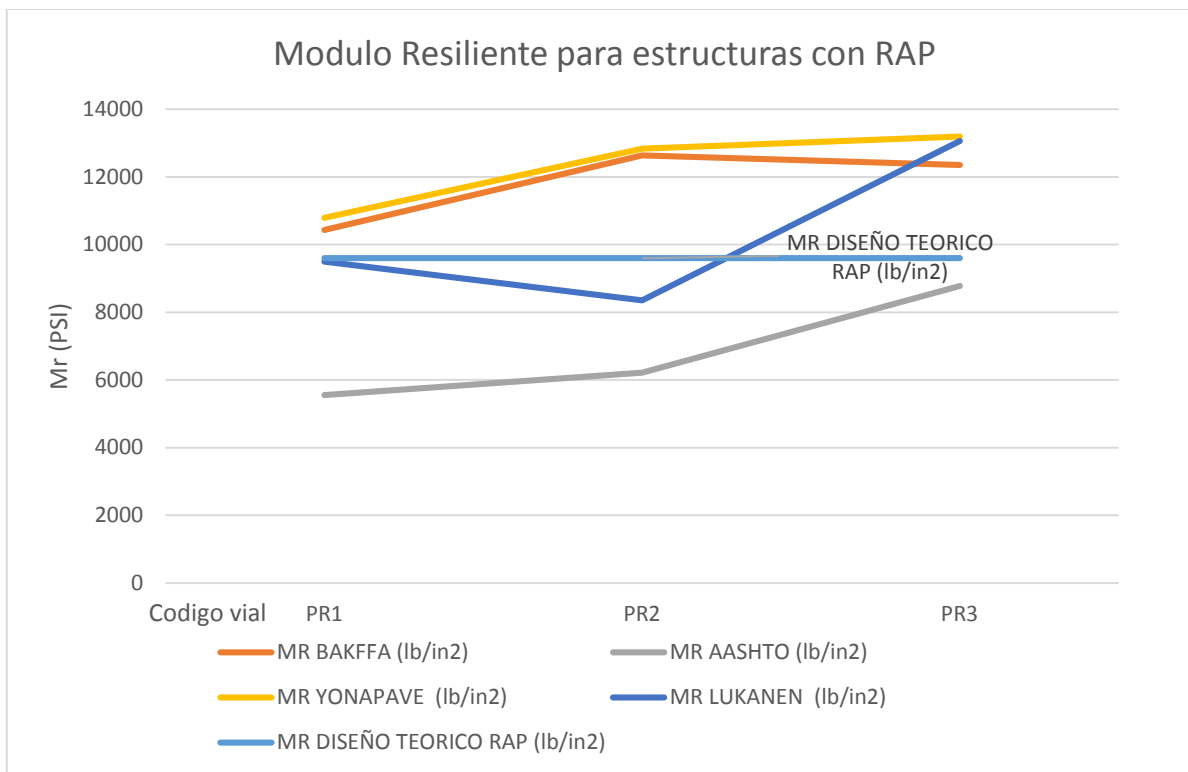
Fuente: Autor

En la Tabla No. 39 y en la Grafica No. 1 se puede observar que los parámetros de diseño para los pavimentos a base de materiales granulares, los Módulos Resilientes teóricos (Mr), se encuentran por debajo de los hallados por medio de los métodos de retrocálculo AASHTO, YONAPAVE y LUKANEN y el programa BAKFAA, lo que indica que se optó por manejar unas estructuras optimas, manejando unos espesores altos para las condiciones iniciales de la subrasante.



Grafica 1 Módulos Resilientes Estructuras granulares.
Fuente: Autor

En la gráfica No. 2, se observa que las estructuras con RAP estabilizado, presenta un módulo resiliente de diseño promedio con los resultados que se obtuvieron con los resultados de retrocálculo, aclarando que por la metodología AASHTO y LUKANEN estuvieron por debajo de Mrr teórico de diseño en la mayoría de CIV intervenidos, indicando que el los pavimentos construidos con estructuras de RAP estabilizado tuvieron un diseño muy justo con estructura más reducida a comparación de las convencionales con materiales granulares.



Grafica 2 Módulos Resilientes para estructuras con RAP.

Fuente: Autor.

Una vez analizados los módulos resilientes Mrr retro calculados de las capas de cada pavimento por medio del programa BAKFAA, como se muestra en la Tabla No. 40; al comparar los módulos se tiene que el módulo promedio de la capa de RAP estabilizado es mayor entre 3.4 y 4.3 veces que el de los materiales granulares y en el peor de los casos del doble como mínimo.

Tabla 40 Comparación de módulos en las capas de los pavimentos evaluados.

MATERIAL	Módulos retro calculados (Mpa)	Módulos retro calculados (PSI)	PROMEDIO
BASE GRANULAR	166.95	24219	21200
BASE GRANULAR	125.33	18181	
RAP ESTABILIZADO	344.6	49990	72612
RAP ESTABILIZADO	641.3	93032	
RAP ESTABILIZADO	515.72	74814	
BASE GRANULAR	133.53	19371	16708
BASE GRANULAR	114.51	16612	
BASE GRANULAR	97.49	14143	

Fuente: Autor.

7.2. Numero Estructural (SN)

Una vez obtenidos los números estructurales promedios por CIV se procedió a comparar dichos resultados tanto por estructuras como entre métodos con el número estructural teórico

7.2.1. Análisis números estructurales métodos LUKANEN, AASHTO y YONAPAVE para los CIV medidos

Para demostrar que una estructura de un pavimento está en óptimas condiciones, el número estructural calculado en el diseño (SN_{calc}) debería ser menor al número estructural efectivo (SN_{eff}). En este caso no se tienen datos del número estructural de diseño (SN_{calc}); con el fin de poder realizar una comparación con un modelo teórico se realizó el cálculo del número estructural de diseño mediante la utilización de la fórmula de la metodología AASHTO, asumiendo valores teóricos máximos y mínimos de los coeficientes estructurales (a) y los coeficientes de drenaje (m) por cada estructura así:

Tabla 41. Calculo Número estructural teórico estructura Granulares

NÚMERO ESTRUCTURAL CALCULADO SN_{calc} Pavimentos Granulares											
Snmax						Snmin					
CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (in)	a max	m max	SN max	CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (in)	a min	m min	SN min
C.A.	5	2.0	0.43	1	0.8	C.A.	5	2.0	0.39	1	0.8
BG	15	5.9	0.13	1	0.8	BG	15	5.9	0.12	0.8	0.6
SBG	15	5.9	0.12	1	0.7	SBG	15	5.9	0.11	0.8	0.5
RELLENO	20	7.9	0.08	1	0.6	RELLENO	20	7.9	0.08	0.8	0.5
TOTAL	55				3.0	TOTAL	55				2.4
PROMEDIO	2.7										

Fuente: Autor

Tabla 42. Calculo Número estructural teórico estructura RAP

NÚMERO ESTRUCTURAL CALCULADO SN_{calc} Pavimentos RAP estabilizado											
Snmax						Snmin					
CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (in)	a max	m max	SN max	CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (in)	a min	m min	SN min
C.A.	5	2.0	0.43	1	0.85	C.A.	5	2.0	0.43	1	0.8

RAP	15	5.9	0.24	1	1.42	BG	15	5.9	0.18	1	1.1
TOTAL	20				2.26	TOTAL	20				1.9
PROMEDIO	2.1										

Fuente: Autor

Tabla 43. Calculo Número estructural teórico estructura Granulares con Rajón

NÚMERO ESTRUCTURAL CALCULADO SNcal Pavimentos Granulares con rajón											
Snmax						Snmin					
CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (in)	a max	m max	SN max	CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (in)	a min	m min	SN min
C.A.	5	2.0	0.43	1	0.8	C.A.	5	2.0	0.39	1	0.8
BG	15	5.9	0.13	1	0.8	BG	15	5.9	0.12	0.8	0.6
SBG	15	5.9	0.12	1	0.7	SBG	15	5.9	0.11	0.8	0.5
RAJON	30	11.8	0.08	1	0.9	RAJON	30	11.8	0.08	0.8	0.8
TOTAL	65				3.3	TOTAL	65				2.6
PROMEDIO	2.9										

Fuente: Autor

Una vez obtenidos los números estructurales promedios por CIV se procedió a comparar dichos resultados tanto por estructuras como entre métodos con el número estructural teórico

El resumen de los resultados de los Números Estructurales *NS* se muestra a continuación:

Tabla 44 Comparación Números Estructurales

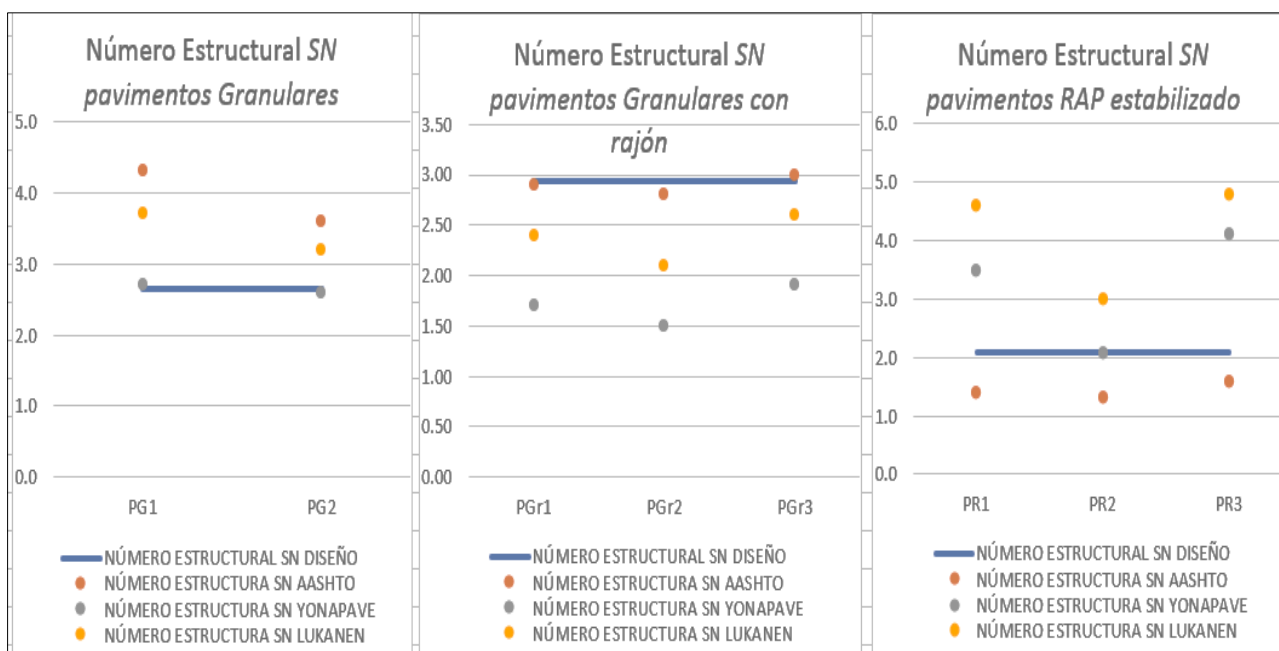
CIV	CODIGO	NÚMERO ESTRUCTURAL <i>SNcal</i> DISEÑO	NÚMERO ESTRUCTURA <i>SNefe</i> AASHTO	NÚMERO ESTRUCTURA <i>SNefe</i> YONAPAVE	NÚMERO ESTRUCTURA <i>SNefe</i> LUKANEN
5007879	PG1	2.7	4.30	2.70	3.70
5004239	PG2	2.7	3.60	2.60	3.20
5003992	PGr1	2.9	2.89	1.70	2.40
5004075	PGr2	2.9	2.80	1.50	2.10
5003929	PGr3	2.9	3.00	1.90	2.60
5007251	PR1	2.1	1.40	3.50	4.60
5007295	PR2	2.1	1.30	2.10	3.00
5007321	PR3	2.1	1.60	4.10	4.80

Fuente: Autor

Una vez calculados los números estructurales teóricos de diseño para las tres estructuras, se observó que las estructuras de pavimentos granulares con rajón presentan números estructurales

efectivos (NS_{efe}) menores a los de diseño NS_{cal} por las metodologías YONAPAVE, LUKANEN y para PGr2 en la metodología AASHTO ver Tabla 43, lo que representa que estos tramos se encuentran afectados y que requieren de una intervención, esto puede ser causa a que estos segmentos viales se encuentran colindando cerca de un cuerpo de agua (quebrada Chunaza) con presencia de alta humedad, en donde no se observó obras de drenaje, ya que estas vías se encuentran ubicadas en pie de ladera.

Para los pavimentos construidos con materiales reciclados PR1, PR2 y PR3, los números estructurales efectivos NS_{efe} presentan un buen comportamiento con respecto de las metodologías YONAPAVE y LUKANE en donde nos dan resultados mayores a los números estructurales calculados NS_{cal} ver Grafica 3, esto se debe a que estas metodologías de retrocálculo trabajan con los parámetros de longitud característica y área del cuenco de deflexiones, mientras que la metodología AASHTO se basa en el espesor del pavimento y módulo resiliente M_r del pavimento, se debe tener en consideración que las estructuras de pavimentos con materiales reciclados RAP estabilizado PR1, PR2 y PR3, contemplan un espesor mucho menor al de las estructuras convencionales con materiales granulares PG1, PG2, PGr1, PGr2 y PGr3, en donde esta metodología de retrocálculo AASHTO generaría Números Estructurales efectivos NS_{efe} menores a los de diseño para espesores mínimos como los que se presentan con RAP estabilizado.



Grafica 3 Comparación de Números Estructurales NSeFe vs NScal
Fuente: Autor

7.3. Análisis de datos de las deflexiones centrales (d0), SCI, BDI y BCI a partir de los cuencos de deflexiones

Para poder realizar el análisis del SCI, BDI, BCI y d0 debemos realizar el cálculo de los mismos teniendo en cuenta lo siguiente:

- SCI (Índice de curvatura de la superficie): Este índice corresponde a la diferencia de la deflexión generada en D0 y D30
- BDI (Índice de daño en la base): Este índice corresponde a la diferencia de la deflexión generada en D30 y D60
- BCI (Índice de curvatura en la base): Este índice corresponde a la diferencia de la deflexión generada en D60 y D90
- D0 (deflexión central): Este parámetro corresponde a la deflexión generada en el sensor d0. Con este parámetro se determinara si el pavimento o la subrasante es la capa que está absorbiendo la solicitud de las cargas del transito

De acuerdo a lo anterior se tomaron los promedios de deflexiones de cada CIV generando los índices para ser evaluados, comparando los resultados con la tabla No. 44 las cuales contienen los parámetros de cotejo para determinar el estado actual de la estructura.

Tabla 45 Parámetro de cotejo para determinar el estado de las estructuras.

BASE GRANULAR	CONDICION ESTRUCTURAL	D0 (μm)	SCI (μm)	BDI (μm)	BCI (μm)
	BUENO	<500	<200	<100	<50
	ALARMA	500-750	200-400	100-200	50-100
	GRAVE	>750	>400	>200	>100
RAP	CONDICION ESTRUCTURAL	D0 (μm)	SCI (μm)	BDI (μm)	BCI (μm)
	BUENO	<400	<200	<100	<50
	ALARMA	400-600	200-400	100-150	50-80
	GRAVE	>600	>400	>150	>80

Fuente: Horak, E (2008)

Para efectos de nuestro análisis el color verde será indicador de condición estructural “BUENO” el color amarillo indicará condición estructural “ALARMA” y el color rojo indicará condición estructural “GRAVE”.

El indicador SCI asociará el estado de la rigidez de la capa de rodadura, el BDI asociará el estado de la rigidez de las capas de base y sub base o RAP según sea el caso, y el BCI indicará el estado de la subrasante; por consiguiente, nuestros datos se muestran ver Anexo 7.

En resumen:

Tabla 46 Evaluación de parámetros D0, SCI, BDI y BCI.

CODIGO VIA	PROMEDIO DEFLEXION (μm)							SCI	BDI	BCI
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6			
	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8			
PGr1	627.05	314.68	102.24	37.21	16.83	11.69	9.36	312.36	212.44	65.04
PGr2	715.44	346.82	118.69	55.86	25.05	15.05	10.50	368.62	228.13	62.83
PGr3	673.22	359.42	134.31	50.64	29.21	17.87	13.04	313.80	225.11	83.66
PG1	576.12	366.24	183.26	96.58	65.64	49.05	40.81	209.89	182.97	86.69

PG2	513.40	313.85	145.95	56.25	34.82	25.41	18.24	199.55	167.90	89.71
PR1	534.11	373.75	225.10	107.98	77.61	53.44	38.04	160.36	148.64	117.12
PR2	740.55	439.25	221.65	95.08	61.75	40.99	31.16	301.30	217.59	126.57
PR3	393.06	292.94	163.63	67.83	51.41	35.96	28.11	100.12	129.31	95.80

Fuente: Autor.

La Tabla No. 45 nos deja ver los resultados obtenidos para la evaluación de D0, SCI, BDI y BCI, en donde se establece que:

- El comportamiento de los pavimentos a base de materiales granulares PGr1, PGr2, PGr3, PG1 y PG2, presentan una condición de alarma, ya que las deflexiones centrales D0 presentan rangos superiores a 500 μm , lo que indica que la subrasante está recibiendo una gran cantidad de cargas lo que puede presentar fallas futuras con hundimientos, mientras que los pavimentos con materiales reciclados RAP, presentan una particularidad en sus tres estructuras, el pavimento PR1 cuenta con un síntoma de alarma para la Subrasante, mientras que el pavimento PR2 las cargas las está absorbiendo la Subrasante presentando una deflexiones mayores a los 600 μm , esto puede ser ocasionado ya que en este tramo se observó parcheo por instalaciones de tuberías de redes de gas y agua posteriores a la construcción del pavimento, lo que indica una mala compactación de las capas de RAP, también que las reposiciones hayan sido con materiales diferentes como bases o sub-bases; el pavimento PR3 presenta unas deflexiones D0 dentro del rango del comportamiento estructural bueno, en donde visualmente no ha tenido ningún tipo de intervención.
- El índice de curvatura de la superficie SCI, nos indica el comportamiento de la capa superior, la cual indica un mejor comportamiento de los pavimentos con materiales

reciclados en comparación de los pavimentos con materiales convencionales, en donde PR1 y PR3 presentan un comportamiento estructural bueno con deflexiones menores 200 μm , mientras que los pavimentos con materiales convencionales PGr1, PGr2, PGr3, PG1 y PG2 se encuentran en una condición estructural de alarma presentando deflexiones mayores 250 μm .

- En el Índice de Daño de la Base BDI, se determinó que todas las estructuras presentan un estado de alarma a grave, de los cuales se observa que las estructuras de pavimento con materiales reciclado RAP, están realizando un comportamiento mejorado, debido a que, analizando el parámetro BCI nos muestra que estos pavimentos están soportados sobre una subrasante con un estado estructural grave, el cual las principales capas del pavimento están absorbiendo las cargas del tránsito para estas vías.

7.4. Análisis del cuenco de deflexiones

Para estudiar los cuencos de deflexiones se tomaron los obtenidos de cada abscisa y se promediaron teniendo en cuenta que el compartimiento de los mismos es muy similar, alcanzando un cuenco por CIV los cuales tomaremos de referencia para el correspondiente análisis ver Anexo 8.

7.4.1. Análisis de cuencos del parámetro AREA a partir del método YONAPAVE

El cálculo del Área normalizada se da con el fin de observar el comportamiento del cuenco y con ello determinar la resistencia del pavimento y la subrasante. Lo anterior se evaluará de acuerdo a la siguiente tabla tomada de Gómez et al (2007) y Zárate y Lucero (2009):

Tabla 47. Parámetros de evaluación indicador AREA en cuenco de deflexiones.

$\dot{A}N_{0.9}$ (mm)	D _{máx}	Subrasante	Pavimento
Baja (< 600)	Baja (< 0.7)	Resistente	Débil
Baja (< 600)	Alta (> 0.7)	Débil	Débil
Alta (> 600)	Baja (< 0.7)	Resistente	Resistente
Alta (> 600)	Alta (> 0.7)	Débil	Resistente

Fuente: Gómez (2007) y Zarate y Lucero (2009)

Debido a que el parámetro AREA también se da en cada abscisa medida, es necesario establecer un único valor por CIV lo cual se realizó promediando los resultados obtenidos, Anexo 9.

Determinando los parámetros de evaluación para las áreas de los cuencos de deflexiones establecidas por Gomez (2007) y Zarate y Lucero (2009) que muestran en la Tabla No. 47, se determinó que las estructuras de los pavimentos granulares como los pavimentos con RAP se encuentran débiles, no obstante, los CIV PR1 y PR3 son los que tienen mejor estado de la estructura de pavimento, ver Tabla 48,

Tabla 48. Selección de estructuras para evaluación de parámetro AREA.

CODIGO CIV	AREA (mm)	D0 (μ m)	Parámetros	
			$\dot{A}N_{0.9}$ (mm)	Pavimento
PG1	473	576	baja	débil
PG2	448	513	baja	débil
PR1	552	534	baja	débil
PR2	444	740	baja	débil
PR3	541	393	baja	débil
PGr1	365	627	baja	débil
PGr2	363	715	baja	débil
PGr3	398	673	baja	débil

Fuente: Autor

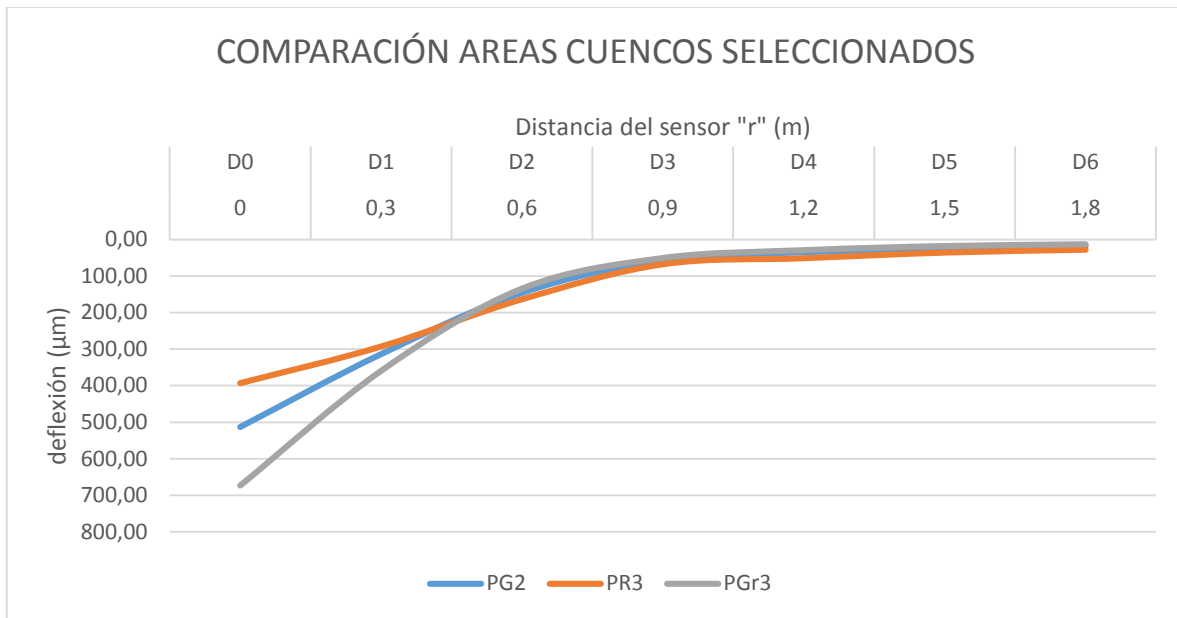


Imagen 49. Comparación estructuras seleccionadas parámetro AREA
Fuente: Autor

En la Imagen No. 50, se puede observar que la estructura que mejor se comporta es la PR3 ya que bajo el parámetro área lo que busca es que en magnitud, ésta sea mayor a 600 mm y las deflexiones pequeñas, lo cual indica que presenta una subrasante y un pavimento resistente en óptimas condiciones. Por otro lado, la estructura que presenta peores condiciones de las tres es la construida con materiales granulares y Rajón la cual presenta grandes deflexiones y parámetros de AREA muy pequeños. Se realizó la comparación en donde se escogieron las mejores estructuras de cada tipo, PG2, PR3 y PGr3, ver Tabla 48, en donde se determinó un mejor comportamiento del pavimento reciclado PR3 con relación a los pavimentos granulares PG2 y PGr3, a pesar que todas la estructuras están por debajo del rango de área de 600mm, las estructuras con materiales reciclados se acercan más a los parámetros aceptados.

Tabla 49 Comparación de áreas en pavimentos reciclados vs convencionales.

CODIGO CIV	AREA (mm)	D0 (μm)	Parámetros	
			AN _{0.9} (mm)	Pavimento
PG2	448	513	baja	débil
PR3	541	393	baja	débil
PGr3	398	673	baja	débil

Fuente: Autor.

7.5. Análisis de Costos

Se realizó un análisis de costos, en donde se determinó el valor aproximado en pesos de la construcción por metro cuadrado (m²), de los tres tipos de estructuras evaluadas, como referencia se tomaron los precios del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU (precios 2018-2⁵), tal como se muestra en la Tabla No. 49.

Tabla 50 Costos estructuras PG, PGr y PR.

ESTRUCTURA 1 Pavimentos Granulares con Geo textil (PG1 y PG2)				
ITEM	UNIDAD	CANT	V/UNITARIO	V/TOTAL
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASF CONVENCIONAL con Cemento Asfáltico 60-70 (Suministro, Extendido y Nivelación Manual y Compactación con vibro compactador Benitin de 1 tonelada incluye operario y combustible)	m3	0.05	\$ 664,181	\$ 33,209
IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRR-1 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	m2	1	\$ 1,429	\$ 1,429
BASE GRANULAR BG-A (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibro compactador Benitin de 1 tonelada)	m3	0.15	\$ 134,905	\$ 20,236
SUBBASE GRANULAR SBG-A (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibro compactador)	m3	0.15	\$ 122,485	\$ 18,373
MATERIAL SELECCIONADO. SUMINISTRO, EXTENDIDO MANUAL, NIVELACIÓN, HUMEDECIMIENTO Y COMPACTACIÓN.	m3	0.2	\$ 55,729	\$ 11,146

⁵Precios Unitarios de Referencia 2018-II + Mano de Obra 2019
<https://www.idu.gov.co/page/siipviales/economico/portafolio>

GEOTEXTIL NT 4000 PARA SEPARACION SUBRASANTE/CAPAS GRANULARES (Incluye Suministro e Instalación)	m2	1	\$ 12,975	12975
TOTAL				\$ 97,367
ESTRUCTURA 2 Pavimentos Granulares con Rajón (PGr1, PGr2 y PGr3)				
ITEM	UNIDAD	CANT	V/UNITARIO	V/TOTAL
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASF CONVENCIONAL con Cemento Asfáltico 60-70 (Suministro, Extendido y Nivelación Manual y Compactación con vibro compactador Benitin de 1 tonelada incluye operario y combustible)	m3	0.05	\$ 664,181	\$ 33,209
IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRR-1 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	m2	1	\$ 1,429	\$ 1,429
BASE GRANULAR BG-A (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibro compactador Benitin de 1 tonelada)	m3	0.15	\$ 134,905	\$ 20,236
SUBBASE GRANULAR SBG-A (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibro compactador)	m3	0.175	\$ 122,485	\$ 21,435
MATERIAL SELECCIONADO. SUMINISTRO, EXTENDIDO MANUAL, NIVELACIÓN, HUMEDECIMIENTO Y COMPACTACIÓN.	m3	0.30	\$ 55,729	\$ 16,719
GEOTEXTIL NT 4000 PARA SEPARACION SUBRASANTE/CAPAS GRANULARES (Incluye Suministro e Instalación)	m2	0	\$ 12,975	0
TOTAL				\$ 93,027
ESTRUCTURA 3 Pavimentos Reciclados (PR1,PR2 y PR3)				
ITEM	UNIDAD	CANT	V/UNITARIO	V/TOTAL
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO DENSO MD12 ASF CONVENCIONAL con Cemento Asfáltico 60-70 (Suministro, Extendido y Nivelación Manual y Compactación con vibro compactador Benitin de 1 tonelada incluye operario y combustible)	m3	0.05	\$ 664,181	\$ 33,209
IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRR-1 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	m2	1	\$ 1,429	\$ 1,429
FRESADO ESTABILIZADO AL 5% CON EMULSIÓN CRL-1 (INCLUYE TRANSPORTE DE MATERIAL FRESADO AL FRENTE DE OBRA DE 40 Km, SUMINISTRO DE EMULSIÓN, INSTALACIÓN DE MATERIAL ESTABILIZADO).	m3	0.15	\$ 169,816	\$ 25,472
TOTAL				\$ 60,110

Fuente: Autor.

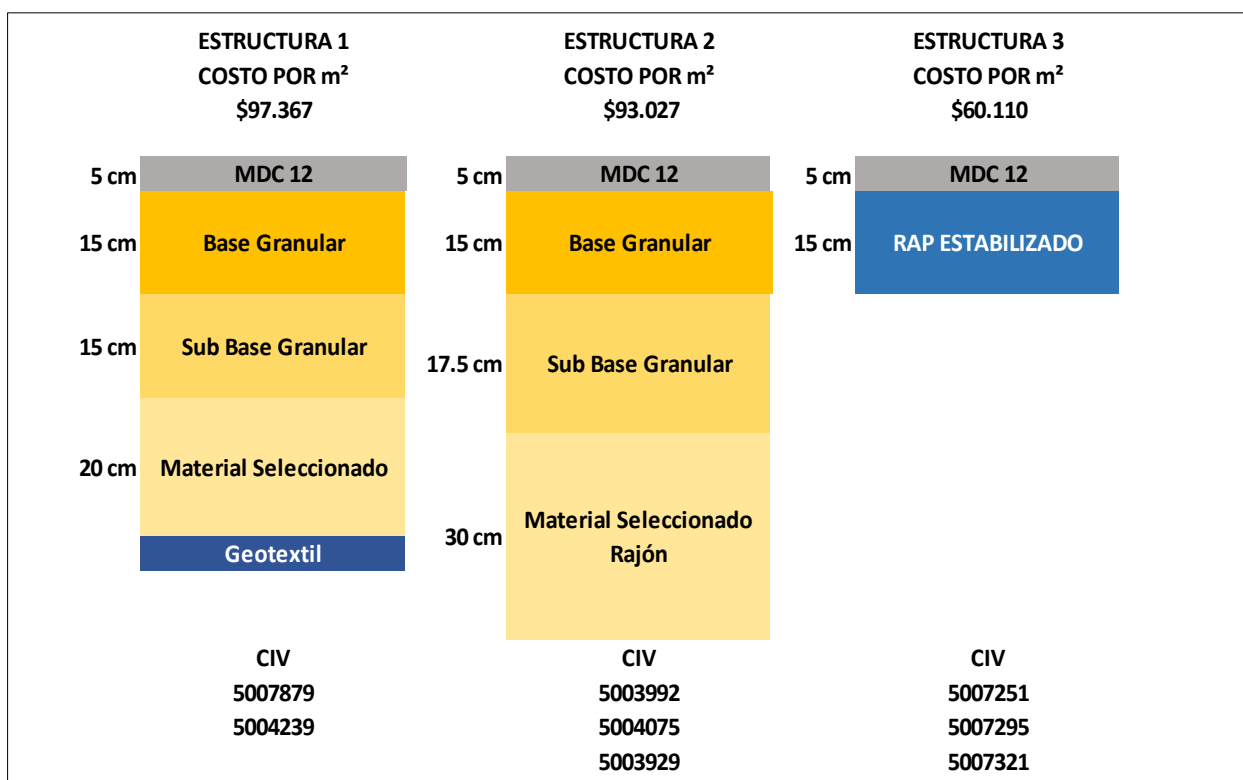


Imagen 50 comparación costos estructuras evaluadas.
Fuente: Autor

En la imagen No. 51, se realizó la comparación de costos de los tres tipos de estructuras evaluadas en este estudio, donde se establece que la construcción de los pavimentos con materiales reciclados Estructura 3, es más económica en un 38% que la Estructura 1 y un 34% que la Estructura 2, ver imagen 52.

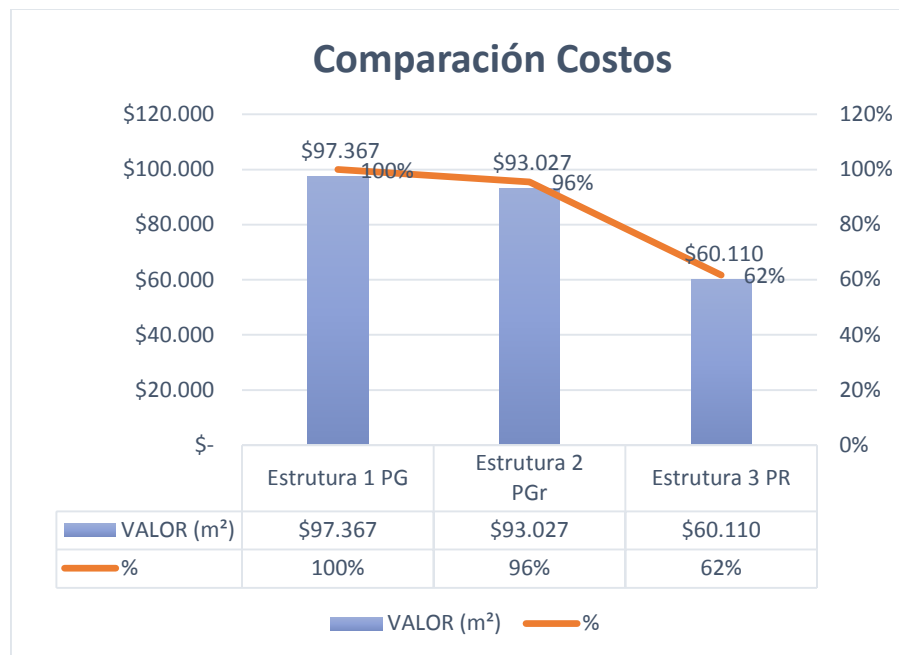


Imagen 51 Porcentaje de costo de construcción.

Fuente: Autor

8. CONCLUSIONES

Debido a que los análisis se realizaron independiente con cada variable calculada se concluye que:

- Se realizó un análisis con respecto a los cuencos de deflexiones, en donde se determinó que los pavimentos contruidos con materiales reciclados RAP estabilizado, tienen mejores comportamientos de resistencia que los pavimentos contruidos con materiales convencionales bases y sub-bases, debido a que estas estructuras presentan valores cercanos a los parámetros de revisión del área normalizada ya que su cuenco de deflexiones es más uniforme en comparación de las estructuras con materiales convencionales o granulares.
- Las deflexiones centrales D0 presentadas en la mayoría de las estructuras, muestran una condición de alarma debido a que estas varían en rangos superiores a los 500 μm , lo que indica que la subrasante está absorbiendo una gran cantidad de cargas, pudiéndose presentar fallas futuras con presencia de ahuellamientos, hundimientos locales y daños considerable a la estructura de los pavimentos, aclarando que el pavimento reciclado PR3 presenta unas deflexiones D0 dentro del rango del comportamiento estructural bueno.
- El índice de curvatura de la superficie SCI, indicó un mejor comportamiento de los pavimentos con materiales reciclados en la capa superior de rodadura, en comparación de los pavimentos con materiales convencionales, en donde PR1 y PR3 presentan un comportamiento estructural bueno con deflexiones menores 200 μm , mientras que los pavimentos con materiales convencionales PGr1, PGr2, PGr3, PG1 y PG2 se encuentran en una condición estructural de alarma presentando deflexiones mayores 250 μm .

- Mediante los parámetros del índice de daño de la base BDI, se determinó que las estructuras de granulares con rajón, se encuentran en un estado grave, el cual puede ser generado por factores externos, debido a que cerca de estos segmentos viales se encuentra el paso de la quebrada Chuniza, dándose mayores niveles freáticos a comparación de las demás estructuras.
- El parámetro BDI, para los pavimentos con estructuras de materiales reciclados RAP estabilizado, presentó un buen comportamiento ya que una vez analizado el parámetro BCI, nos mostró que estos pavimentos están soportados sobre una subrasante con un estado estructural grave, determinándose que las capas del pavimento son las que están absorbiendo las cargas del tránsito.
- Los módulos resilientes hallados por retrocálculo para las estructuras granulares, estuvieron por encima del módulo resiliente teórico de diseño, lo cual indica que el estado de la subrasante se ha mantenido desde su etapa de construcción, mientras que los módulos resilientes para los pavimentos con estructuras recicladas nos dan una voz de alarma, ya que los módulos hallados por retrocálculo por los métodos AASHTO y LUKANEN presentan una disminución a los teóricos, lo que indica el desmejoramiento de la subrasante posiblemente a factores externos del sector, como se observó en el recorrido, ya que estas estructuras presentan intervenciones posteriores a la construcción.
- Las estructuras de pavimento granulares con rajón, presentaron números estructuras efectivos NS_{efe} , menores a los números estructurales calculados NS_{cal} de diseño, lo que indica que estos pavimentos necesitan de una intervención inmediata, mientras que los pavimentos granulares y reciclados, presentan números estructurales efectivos NS_{efe} mayores a los números estructurales de diseño NS_{cal} , lo que indica que estas estructuras se han comportado mejor durante su periodo de servicio.

- Para los pavimentos contruidos con materiales reciclados PR1, PR2 y PR3, los números estructurales efectivos NS_{efe} presentan un buen comportamiento con respecto de las metodologías YONAPAVE y LUKANE en donde nos dan resultados mayores a los números estructurales calculados NS_{cal} , esto se debe a que estas metodologías de retrocálculo trabajan con los parámetros de longitud característica y área del cuenco de deflexiones, mientras que la metodología AASHTO se basa en el espesor del pavimento y módulo resiliente M_r del pavimento, se debe tener en consideración que las estructuras de pavimentos con materiales reciclados RAP estabilizado PR1, PR2 y PR3, contemplan un espesor mucho menor al de las estructuras convencionales con materiales granulares PG1, PG2, PGr1, PGr2 y PGr3, en donde esta metodología de retrocálculo AASHTO generaría Números Estructurales efectivos NS_{efe} menores a los de diseño para espesores mínimos como los que se presentan con RAP estabilizado.
- El comportamiento de los pavimentos a base de materiales granulares PGr1, PGr2, PGr3, PG1 y PG2, presentan una condición de alarma, ya que las deflexiones centrales D0 presentan rangos superiores a 500 μm , indicando que la subrasante está recibiendo una gran cantidad de cargas pudiendose presentar fallas futuras con hundimientos, mientras que los pavimentos con materiales reciclados RAP, presentan una particularidad en sus tres estructuras, el pavimento PR1 cuenta con un síntoma de alarma para la Subrasante, mientras que el pavimento PR2 las cargas las está absorbiendo la Subrasante presentando una deflexiones mayores a los 600 μm , esto puede ser ocasionado ya que en este tramo se observó parcheos por instalaciones de tuberías de redes de gas y agua posteriores a la construcción del pavimento, lo que indica una mala compactación de las capas de RAP, también que las reposiciones hayan sido con materiales diferentes como bases o sub-bases; el pavimento PR3 presenta unas deflexiones D0

dentro del rango del comportamiento estructural bueno, en donde visualmente no ha tenido ningún tipo de intervención

- Una vez seleccionadas las estructuras PG2, PR3 y PGr1 se pudo determinar que la estructura PR3 obtuvo un mayor valor de MR calculado por el método AASHTO y YONAPAVE, no obstante de tener menores espesores, por lo que construir una capa de RAP en vez de capas granulares convencionales podría ser implementada como alternativa constructiva para vías secundarias de las localidades de Bogotá con bajos tránsitos, generando una disminución al utilizar materiales convencionales.
- Se realizó la comparación de costos de los tres tipos de estructuras evaluadas en este estudio, donde se establece que la construcción de los pavimentos con materiales reciclados, es más económica en un 38% que las estructura con materiales convencionales y mejoradas con geo textil, y en un 34% que las estructuras con materiales granulares con mejoramiento con piedra rajón.

9. Aportes

Si se compara el costo de la base granular con la base en RAP estabilizado, se tiene que este último es aproximadamente un 25% mayor. No obstante, al comparar los módulos estimados mediante retrocálculo con el programa BAKFAA se tiene que el módulo promedio de la capa de RAP estabilizado es mayor entre 3.4 y 4.3 veces que el de los materiales granulares y en el peor de los casos del doble como mínimo.

Según lo anterior, el RAP estabilizado constituye una alternativa económicamente viable cuyo impacto no es sólo reducir espesores de intervención sino además tener un mejor apoyo para las capas de concreto asfáltico de rodadura a la vez que se recicla eficientemente un material de residuo.

10. BIBLIOGRAFIA

- Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayos para materiales de carreteras; INVIAS 2013 - ARTÍCULO 330 – 07 [1]
- Bardasano R. (2014). El origen del deflectómetro de impacto. Recuperado el 15 de diciembre de 2018 de <http://paveing.blogspot.com/2014/01/el-origen-del-deflectometro-de-impacto.html> [2]
- Horak, E. & Emery, S., 2009. Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter benchmarking methodology. 2nd European Airport Pavement Workshop. [3]
- Fuentes C. y Roco V.; (2009). AUSCULTACION DEL MONOLOTISMO DE PAVIMENTOS MULTICAPAS MEDIANTE DEFLECTOMETRO DE IMPACTO. Santiago de Chile. [4]
- Horak, E., (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. [5]
- NORMA INVIAS INV-E-798-07. MÉTODO PARA MEDIR DEFLEXIONES MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) [6]
- AASHTO, 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Guide for Design of Pavement Structures*. [7]
- FHWA -RD-97-077 (1997). Design pamphlet for the determination of layered elastic moduli for flexible pavement design in support of the 1993 AASHTO guide for the design of pavement structures. [8]
- E. A. Guzmán Suárez. (2009). Evaluación estructural de pavimentos flexibles a partir de información tomada con deflectómetro de impacto. Congreso de Pavimentos. Medellín. [9]
- INVIAS. (2008). Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. [10]

- 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. Estados Unidos
- Mallque P. (2006). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de deflexiones con el modelo de Hogg – aplicación. Lima, Peru.
- Gomez O. (2015). Criterios de optimización del diseño de sobrecarpetas asfálticas para Bogotá, basados en ensayos no destructivos. Bogotá, Colombia.
- Higuera C. (2012). Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos. Tunja, Colombia.
- Higuera C. (2011). Nociones sobre metodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras V.1. Tunja, Colombia.
- Higuera C. (2011). Nociones sobre metodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras V.2. Tunja, Colombia.
- Bejarano L. Análisis estructural de un pavimento flexible con presencia de deterioro, por medio de deflexiones obtenidas con equipo de carga dinámica y estática. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia.
- Beltras G.,Romo M. (2012). Análisis de índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos. Mexico.
- Gutierrez A. (2012). EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE USANDO TECNICAS NO DESTRUCTIVAS UTILIZANDO EL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO Ó FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER). Bogota, Colombia.
- Leal M. (2010). RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO. Bogotá, Colombia.

- Ruffiño J.,Machado I.,Andrade C. (2014). Metodología de análisis de la condición del pavimento a partir del cuenco de deflexión. Cuba
- Marin M. (2015). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE A TRAVÉS DEL TIEMPO, UTILIZANDO EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (HWD). Lima, Peru.
- Coronado O. (2010). Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocalculo y el encontrado en ensayos de laboratorio Mario Helberto Leal Noriega. Tesis de Maestría. Colombia
- Gutiérrez G.; (2012). Evaluación de estructuras de pavimento flexible usando técnicas no destructivas utilizando el deflectometro de impacto ó fwd (falling weight deflectometer). Tesis de Maestría, Universidad Nacional. Colombia
- Bejarano L.; (2013). Análisis estructural de un pavimento flexible con presencia de deterioro, por medio de deflexiones obtenidas con equipo de carga dinámica y estática. Universidad Nacional. Colombia
- Ainalem N., Hamid N., Imad L.; (2016). Dynamic analysis of falling weight deflectometer. Australia
- Maria J. Sulewskaa, Grzegorz B.;(2017). Application of the Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) to Test Aggregate Layers on Geosynthetic Base. Rusia
- Vânia M., Simona F., Maria de Lurdes A., Mercedes S.; (2016). Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar. España
- A. El Ayadi, B. Picoux , G. Lefeuvre-Mesgouez, A. Mesgouez, C. Petit; (2011). An improved dynamic model for the study of a flexible pavement. Francia
- Christina P., Konstantina G., Brad C., Andreas L.;(2016). Incorporation of GPR data into genetic algorithms for assessing recycled pavements. Grecia
- Montepara, A.; Tebaldi. G; Marradi, A.; Betii, G. (2012). Effect on Pavement Performance of a Subbase Layer Composed by Natural Aggregate and RAP. Italia.
- Joo-Won S., Soo-Il K., Jun-Sung C., Dae-Wook P.; (2009). Evaluation of layer properties of flexible pavement using a pseudo-static analysis procedure of Falling Weight Deflectometer. Korea
- Hudsadin S., Yasothorn S.; (2017). Dynamic soil models for backcalculation of material properties from falling weight deflectometer deflection data. Taylandia.

- Mesbah U., Rafiqul A.; (2017). Incorporation of GPR and FWD into pavement Mechanistic-Empirical design. University of New Mexico. Estados Unidos.
- Priyanka S., Erol T., Scott L.; (2016). Nondestructive Deflection Testing based Mechanistic- Empirical Overlay Thickness Design Approach for Low Volume Roads: Case Studies. Estados Unidos.
- Torres, J.A. (2014). Comparación desde el punto de vista financiero y constructivo entre pavimento flexible estabilizado con rap y con estructura común en una vía urbana. Colombia.
- Guio, E.I.; Sánchez, H.M. (2011). Mezclas asfálticas recicladas y su uso en capas granulares para pavimentos. Colombia.
- Higuera C.; (2009). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. Colombia.
- Avila E., Albarracin F., Bojorque J. (2015). Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso. Cuenca, Ecuador.
- Perez G., Wilfredo N. (2009). Metodología y aplicación del retrocálculo del deflectómetro de impacto (FWD) en pavimentos flexibles, caso práctico : carretera Abancay – Chalhuanca. Peru.
- Bardasano R. (2014). ¿qué es el cuenco de deflexión? Recuperado el 15 de diciembre de 2018 de <http://paveing.blogspot.com/2014/03/que-es-el-cuenco-de-deflexion.html>
- ASTM D4694 – 09. Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. Estados Unidos