

**CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES DE SUELOS ESTABILIZADOS
CON CAL A PARTIR DE ENSAYOS DE PLACA Y VIGA BENKELMAN**

CARLOS ARTURO PANDALES
BORIS ANDRÉS PEDROZA VALDÉS

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2009

**CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES DE SUELOS ESTABILIZADOS
CON CAL A PARTIR DE ENSAYOS DE PLACA Y VIGA BENKELMAN**

CARLOS ARTURO PANDALES
BORIS ANDRÉS PEDROZA VALDÉS

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil

Asesor: Ing. CESAR AUGUSTO HIDALGO

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2009

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 JUSTIFICACIÓN	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo General	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL	15
3. PROPIEDADES RESILIENTES O RESILIENCIA	18
3.1 MÓDULO RESILIENTE	19
3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO RESILIENTE	20
4. ENSAYOS DE CAMPO	24
4.1 ENSAYO DE PLACA	24
4.1.1 Módulo elástico a partir de ensayos de placa	29
4.2 VIGA BENKELMAN	31
4.2.1 Radio de curvatura	35
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEFLEXIONES	39
4.3.1 Deflexión característica	39
4.3.2 Deflexión admisible	41
5. MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO APROXIMADO	43
5.1 PROGRAMA DEPAV	44
5.2 WINDEPAV 2.0 (Vásquez, 2007)	46
6. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	48
6.2 PROGRAMA PLAXIS (Brinkgreve, 2004)	52
7. METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES	55
7.1 PISTA DE PRUEBA	56
7.2 DATOS DE ENSAYO DE VIGA BENKELMAN	58
7.3 DATOS DE ENSAYO DE PLACA	60
7.4 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES ESTABILIZADOS CON CAL A PARTIR DE ENSAYOS DE PLACA Y VIGA BENKELMAN	65
7.4.1 Método de Análisis Numérico Aproximado	65
7.4.2 Método de Elementos Finitos	69
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
8.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE VIGA BENKELMAN	75
8.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PLACA	76
8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROGRAMA WINDEPAV 2.0	77
8.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROGRAMA PLAXIS	78

8.5	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MÓDULOS RESILIENTES OBTENIDOS POR MÉTODOS DE ANÁLISIS NUMÉRICO APROXIMADO Y ELEMENTOS FINITOS (PROGRAMA WINDEPAV 2.0 Y PROGRAMA PLAXIS RESPECTIVAMENTE)	79
8.6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAMPO COMPARADOS CON LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS	80
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFÍA	83

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 4.1	Corrección de la deflexión por condiciones ambientales	40
Tabla 4.2	Calificación del pavimento según relación (D_c / Δ_{adm})	41
Tabla 7.1	Materiales que componen las celdas de la pista de prueba	57
Tabla 7.2	Características físicas de los materiales de la base del pavimento	58
Tabla 7.3	Deflexiones con viga Benkelman	59
Tabla 7.4	Valores estadísticos de deflexiones en mm/100	59
Tabla 7.5	Ensayos de placa en carril en dirección Angelópolis-Caldas	61
Tabla 7.6	Ensayos de placa en carril con dirección Caldas-Angelópolis	62
Tabla 7.7	Módulos de elasticidad de la estructura de pavimento	64
Tabla 7.8	Parámetros de las capas del pavimento (Windepav 2.0)	67
Tabla 7.9	Módulos resilientes obtenidos en Windepav 2.0	68
Tabla 7.10	Parámetros de las capas del pavimento (Plaxis)	70
Tabla 7.11	Módulos resilientes de bases estabilizadas con cal obtenidos en Plaxis	73
Tabla 7.12	Diferencia relativa entre los módulos obtenidos en Windepav 2.0 y Plaxis	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1 Métodos utilizados para calibración de módulos resilientes	22
Figura 4.2 Esquema de equipo para ensayo de placa con carga	26
Figura 4.2 Esquema de viga Benkelman	32
Figura 4.3 Significado cualitativo de los tipos de curvas de deflexiones	34
Figura 6.1 Modelo de los elementos finitos	50
Figura 7.1 Distribución reticular de la pista de prueba	56
Figura 7.2 Curvas Esfuerzo-Deformación de los ensayos de placa	63

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 2.1 Estabilización de suelos con cal	15
Imagen 4.1 Ensayo de placa	24
Imagen 4.3 Viga Benkelman	31
Imagen 6.1 Discretización	49
Imagen 7.1 Modelo programa Windepav 2.0. Datos	66
Imagen 7.2 Modelo programa Windepav 2.0. Resultados	67
Imagen 7.3 Modelo programa Plaxis. Geometría	71
Imagen 7.4 Modelo programa Plaxis. Datos Base granular (1)	71
Imagen 7.5 Modelo programa Plaxis. Datos base granular (2)	72
Imagen 7.6 Modelo programa Plaxis. Resultados	72

TÍTULO
**CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES DE SUELOS ESTABILIZADOS
CON CAL A PARTIR DE ENSAYOS DE PLACA Y VIGA BENKELMAN**

AUTORES

CARLOS ARTURO PANDALES
BORIS ANDRÉS PEDROZA VALDÉS

TÍTULO QUE SE OTORGA

Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. CESAR AUGUSTO HIDALGO

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2009

RESUMEN

Con el fin de atender nuestra inquietud “¿Es posible determinar los valores de módulo resiliente de capas de pavimentos flexibles a partir de ensayos de campo?”, se realizaron varias actividades, sintetizadas de la siguiente manera:

La primera actividad consistió en obtener toda la información disponible sobre módulos resilientes, estabilización de suelos con cal, los ensayos de campo prueba de placa y viga Benkelman y los métodos de análisis numérico aproximado y elementos finitos junto con los respectivos programas que aplican estos métodos, esto se logró realizando investigaciones en bibliotecas, bases de datos e internet. Paso seguido en esta actividad fue el de organizar y analizar toda la información recolectada.

Como nuestro trabajo partía de unos datos bases de deflexiones, obtenidas en los ensayos de placa y viga Benkelman realizados como una segunda fase de la investigación “Mejoramiento de suelos con cal” realizada por los profesores investigadores Cesar Augusto Hidalgo y Mario Alberto Rodríguez, la segunda actividad se basó en analizar los resultados de dichos ensayos con ayuda de tablas y gráficos, enfocándonos en la mejora del comportamiento de los suelos para los diferentes porcentajes de cal que se les adicionaron.

Por último, se calibraron módulos resilientes por los métodos de análisis numérico aproximado y elementos finitos, utilizando los programas Windepav 2.0 y Plaxis respectivamente. Esta última actividad se complementó analizando y comparando los resultados obtenidos junto con los módulos obtenidos por correlaciones a partir del ensayo de placa. Con estos resultados dimos respuesta a nuestra inquietud, dándonos cuenta de que si es posible determinar valores de módulo resiliente de capas de pavimentos flexibles, aunque el rango de variabilidad de estos valores es alto.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, son pocas las investigaciones que se han realizado acerca del comportamiento de las estructuras de los pavimentos con suelos estabilizados con adición de cal, sobre todo en lo que concierne a la determinación de Módulos Resilientes, los cuales, en el método de diseño de pavimentos propuesto por la AASHTO, son incorporados como parámetros representativos de la capacidad de soporte del suelo de fundación de calles, carreteras y autopistas que están sometidas a cargas repetitivas impuestas por los vehículos.

Los equipos que se requieren para determinar el módulo resiliente son de alto costo, debido a la instrumentación de alta tecnología que poseen; razón por la cual en nuestro medio se realizan poco estos ensayos y se sigue diseñando con métodos tradicionales o con correlaciones entre valores dinámicos y estáticos aplicados a los métodos de diseño que utilizan dicho valor. Considerando esto, es que se ofrecen alternativas para determinar este parámetro de diseño, entre las cuales el proyecto presenta los resultados de ensayos de Viga Benkelman y Prueba de Placa.

Se realizaron ensayos no destructivos en la pista de prueba de un sector de la carretera que comunica los municipios de Caldas y Angelópolis con 70m de longitud, cuyas condiciones de carga y características de subrasante son desfavorables para cualquier tipo de estructura de pavimento. Estos ensayos se realizaron como parte de la investigación “Mejoramiento de suelos con cal” planteada por el grupo de investigación GICI, de la Universidad de Medellín. Utilizando los resultados de los ensayos, sobre la pista de prueba, se llevará a cabo el desarrollo de este trabajo de tesis.

La importancia que tiene en el diseño de pavimentos el conocimiento de las propiedades dinámicas de los suelos que conforman la estructura del mismo,

conlleva a que además de los parámetros obtenidos en los ensayos no destructivos se utilicen técnicas de retrocálculo, que en este caso se lleva a cabo utilizando software que permiten realizar el diseño de estructuras de pavimento a partir de la teoría de elementos finitos y métodos de análisis aproximados. De los ensayos efectuados en la pista de prueba se obtuvo datos de deflexión y deformación, en las diferentes celdas construidas. Con la ayuda de los programas de elementos finitos Plaxis y análisis aproximado Depav se pretenden calibrar módulos de bases estabilizadas con cal a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de campo, para que puedan ser utilizados en el diseño de pavimentos flexibles o en nuevas investigaciones sobre la materia.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La utilización de programas de elementos finitos y análisis numérico viene siendo ampliamente aplicada en el diseño y análisis racional de estructuras de pavimentos. En esta metodología se requiere un conocimiento del módulo de elasticidad y relación de Poisson en las diferentes capas que conforman la estructura. La obtención de dichos parámetros se realiza a través de ensayos de laboratorio y campo, ambos procedimientos por lo general son costosos y requieren gran inversión de tiempo.

De otro lado, la estabilización de suelos con cal es utilizada, tradicionalmente, para el tratamiento de suelos cohesivos con el fin de reducir su plasticidad y no tanto para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos. Son pocos los estudios realizados sobre el comportamiento mecánico de suelos granulares estabilizados con cal y por consiguiente, sobre los valores de sus módulos de elasticidad y resiliencia. Dichos estudios han demostrado que existe un aumento en los módulos resilientes de los suelos granulares estabilizados con cal, por tanto, es importante poder determinar los rangos de valores de módulos resilientes de

suelos granulares adicionados con cal y determinar la variación de éstos en relación a el mismo suelo no estabilizado.

De los suelos granulares estabilizados con cal investigados, unos son materiales utilizados como bases en la construcción de pavimentos, mientras que otros son suelos que se encuentran durante la construcción de carreteras y que no cumplen con las especificaciones técnicas. Luego, es relevante identificar el grado de mejoramiento mecánico que se obtienen en dichos suelos cuando se les adiciona cal, además de establecer rangos de valores en los cuales oscilan los módulos resiliente.

Los resultados obtenidos en esta investigación por una parte contribuyen al avance de las investigaciones de estabilización de suelos granulares con cal. De otro lado, proporcionan valores de módulos resilientes de suelos granulares estabilizados con cal, para emplear en el diseño de estructuras de pavimentos, principalmente, con el uso de software.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Determinar la influencia del contenido de cal sobre los módulos de resiliencia de una estructura de pavimento flexible con base estabilizada con cal.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la variación de los parámetros obtenidos en ensayos de viga benkelman y placa.

- Determinar la influencia del tipo de estructura y del contenido de cal sobre los resultados de los ensayos de campo.
- Establecer un análisis comparativo de los módulos resilientes obtenidos en los métodos de elementos finitos y análisis numérico aproximado frente a resultados de ensayos de campo.

2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

Imagen 2.1 Estabilización de suelos con cal



Tradicionalmente se ha concluido que los suelos más adecuados para que sean estabilizados con cal, son aquellos con alto contenido de arcilla y que los suelos arenosos son más adecuados para estabilizaciones con cemento o productos bituminosos. Sin embargo, la cal tiene una capacidad cementante bastante importante que puede mejorar las propiedades de otros tipos de suelos (Figueroa y Reyes, 2003; Gómez et al., 2004; Hidalgo & Rodríguez, 2005). En 1994, Little usó contenidos de cal de 1% y 2% para mejorar las propiedades de bases granulares calcáreas determinando incrementos entre 70% y 125% en la rigidez y de hasta 350 MPa en los módulos resilientes, lo cual se verificó tanto en laboratorio como en campo (citado por Little, 2000). También citado por Little (2000), Syed (1998) encontró por medio de análisis regresivos que el módulo de

bases estabilizadas con cal, mejora casi un 400% respecto a estas mismas bases sin estabilizar.

Como anteriormente se mencionó, la cal es comúnmente utilizada como agente estabilizador de suelos de tipo limoso y/o arcilloso, ya que se ha comprobado que modifica algunas de sus características físico-químicas, mejorando su resistencia mecánica. En estos casos si se desea simplemente mejorar las características del suelo sin un efecto cementante la literatura tradicional recomienda usar la cal en pequeñas cantidades que oscilan entre el 1% y 3% del peso del material a utilizar, a los cuales se les denomina materiales tratados con cal. En el caso de desear un efecto que involucre cementación, el rango varía entre 2% y 8% del peso del material que va a ser estabilizado denominados materiales estabilizados con cal; otros autores como Das (2001), afirman que para cementación el rango óptimo de contenido de cal se presenta entre el 5% y el 10%. Gómez et al. (2004), Hidalgo & Rodríguez (2005, 2008) determinaron en ensayos realizados en mezclas de suelos residuales que los valores óptimos de contenidos de cal varían entre el 6 al 9%. Otras investigaciones citadas por Little, como la realizada por Uddin et al. (1997), arrojan como resultado que el contenido de cal óptimo, para dar la mayor resistencia en arcillas, está entre el 10% y 15% de cal.

La cementación de la cal en un proceso de estabilización de suelos, se produce en forma de silicatos cristalinos, en algunos casos parecidos a los que se forman en el concreto. Las cales para estabilización de suelos deberán presentar un aspecto homogéneo y no un estado grumoso o aglomerado, deben ser del tipo que se endurece con el dióxido de carbono presente en el aire y compuestas principalmente por óxido e hidróxido de calcio y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos e hidráulicos (Sampedro, 2003).

Una de las ventajas que presenta la estabilización de suelo con cal son las siguientes (Sampedro, 2003):

- Presenta compatibilidad química con los cementos asfálticos, lo que conduce a una mayor adherencia entre estos dos materiales.
- Presenta la posibilidad de usar suelos disponibles en la zona, brindando mayor economía en la ejecución de la obra.
- Aumenta la capacidad portante del suelo, resistencia a tracción y compresión del mismo.
- Por sus propiedades cementantes genera que el suelo sea más impermeable y que su vida útil sea mejor, siempre y cuando el mantenimiento sea el adecuado.
- No presenta fraguado rápido.

3. PROPIEDADES RESILIENTES O RESILIENCIA

Los pavimentos están sometidos a la acción constante de cargas producidas por las llantas de los vehículos, las cuales, generan cargas verticales sobre su estructura. Dichas cargas inducen en la estructura deformaciones de dos tipos plásticas, también conocidas como permanentes y resilientes (elásticas), estas últimas se presentan cuando las deformaciones se recuperan de manera instantánea en el momento que la carga deja de actuar; mientras que las primeras se presentan después de la aplicación de la misma y son acumulativas.

Las deformaciones tienen gran importancia en los procedimientos para el diseño de pavimentos que actualmente se utilizan debido a que este parámetro debe ser mantenido en niveles tolerables (IMT, 2001).

Las deformaciones elásticas son importantes para las capas superiores de la estructura de pavimento como la carpeta asfáltica y bases estabilizadas, debido a que éstas se ven sometidas a grandes esfuerzos repetidos y producidos por el tráfico vehicular, que generan niveles de deformación muy altos y provocan fallas por fatiga cuando las capas del pavimento son muy rígidas (Hidalgo & Rodriguez, 2004).

Las cargas vehiculares no son constantes, tienen duración y magnitud variables y se presentan como aplicaciones de carga que se repiten de manera cíclica y cuyas repeticiones producen inicialmente los dos tipos de deformación mencionados anteriormente, pero a medida que el número de aplicaciones aumenta, las deformaciones plásticas se hacen menores. Esto conduce a que después de 100 a 200 repeticiones de carga, la deformación es prácticamente recuperable (Huang, 2004). Cuando se llega a este estado se logra lo que se conoce como estado resiliente. El estado resiliente se define como aquel donde las deformaciones inducidas por una aplicación de carga son prácticamente

recuperables y las permanentes no casi nulas. De allí nace el concepto de módulo resiliente, que es usado para explicar las características no lineales de esfuerzo-deformación de suelos de subrasante (Hidalgo & Rodriguez, 2004).

3.1 MÓDULO RESILIENTE

El módulo resiliente se define, como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables (AASHTO, 1993). Se introdujo el término módulo resiliente como la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (Rondon & Reyes, 2007).

Matemáticamente la ecuación del módulo resiliente está dada por:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

Donde:

M_r = Módulo Resiliente.

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador dinámico.

ε_r = Deformación unitaria recuperada.

σ_1 = Esfuerzo axial. Esfuerzo principal mayor.

σ_3 = Presión de confinamiento. Esfuerzo Principal menor

De acuerdo a la literatura cuando un pavimento se somete a la acción de las cargas transmitidas por los vehículos, estas cargas son de naturaleza cíclica. Luego sobre las capas del pavimento se producen deformaciones permanentes y recuperables o resilientes. Después de un cierto número de ciclos de carga, el material tiende a poseer casi en su totalidad deformaciones resilientes (Rondon & Reyes, 2007)

En la teoría elástica tradicional el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (ν) definen las propiedades elásticas de un material. Para describir el comportamiento recuperable de un material sujeto a cargas cíclicas cargado en un aparato triaxial se utiliza M_r . El módulo resiliente es no lineal y dependiente del esfuerzo (Uthus, 2007).

3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO RESILIENTE

Rondon & Reyes (2007) haciendo una recopilación del estado del conocimiento del comportamiento resiliente de materiales granulares empleados en para conformar capas de base y subbase en estructuras de pavimento flexible, listan como factores que influyen en el comportamiento resiliente: el esfuerzo (esfuerzo desviador y presión de confinamiento), el contenido de agua, la densidad, la frecuencia de carga e historia de esfuerzo, el tipo de ensayo, la anisotropía, la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de la partícula.

(ACEVEDO) Indica como factores influyentes en el módulo resiliente el estado de esfuerzos (esfuerzo desviador y presión de confinamiento) y las condiciones físicas del suelo (densidad seca y contenido de humedad).

Uthus (2007) menciona que de acuerdo a la recopilación de la literatura hecha por Lekarp (1999) sobre investigaciones del tema; los factores que influyen en el comportamiento resiliente de materiales granulares están: El esfuerzo, la densidad, el contenido de humedad, el contenido de finos, la granulometría, el tipo de agregado, el número de aplicaciones de carga, la historia de esfuerzos, la duración de la carga, la frecuencia y secuencia de carga.

Las conclusiones más relevantes indicadas por los autores de acuerdo a sus investigaciones y la literatura indican lo siguiente:

Influencia del esfuerzo: El módulo resiliente depende principalmente de la presión de confinamiento, manteniendo una relación de proporcionalidad directa. Esa dependencia es menor con el esfuerzo desviador.

Influencia de la densidad: El módulo resiliente aumenta para materiales con mayor valor de densidad seca.

Influencia del contenido de humedad: El valor del módulo resiliente disminuye con el aumento del contenido de humedad, aunque, algunos investigadores han encontrado un valor óptimo de contenido de humedad en el cual la rigidez es máxima (Rondon & Reyes, 2007)

Influencia del contenido de finos: El módulo resiliente tiende a disminuir con el aumento del contenido de finos. Pero, esta tendencia no es generalizada y depende mucho del tipo de material estudiado (Rondon & Reyes, 2007). Se deben evaluar las propiedades de los finos tales como la gradación, la mineralogía y el área de superficie específica (Uthus, 2007).

Influencia de la granulometría: Aunque algunas investigaciones reportan que materiales con granulometrías gruesas presentan un mayor módulo, también indican que esta influencia es poco significativa. La influencia de la granulometría es importante cuando se controla el contenido de agua y la densidad (Rondon & Reyes, 2007)

Influencia de la forma de las partículas: El módulo resiliente presenta un leve incremento cuando las partículas son más angulares (Rondon & Reyes, 2007). Al parecer, el efecto de la forma de los granos actúa recíprocamente con la gradación de los materiales; la influencia de la forma de los granos es mayor en materiales bien gradados (Uthus, 2007).

Influencia de la frecuencia de carga e historia de esfuerzos: En este aspecto existen discrepancias en la literatura. Autores citados por Rondon & Reyes, 2007, han determinado que la historia de esfuerzos y la frecuencia de esfuerzos no afectan el comportamiento resiliente de los materiales granulares. En contraposición, se ha encontrado que hay un leve aumento del valor del módulo resiliente debido a la frecuencia de carga; y al parecer se tiene cierto impacto de la historia de esfuerzos (Uthus, 2007). En cuanto a la influencia de la frecuencia de cargas se ha observado, en suelos finos una disminución de la respuesta resiliente, mientras que los materiales granulares se vuelven más rígidos a medida que crece el número de ciclos de carga (Alvarez).

En general, las investigaciones apuntan a una gran influencia de la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador, en lo correspondiente al estado de esfuerzos, en el comportamiento resiliente de los materiales granulares. Mientras que de las condiciones físicas del suelo los factores de mayor influencia son el contenido de humedad y la densidad seca.

La calibración que se pretende realizar se refiere a un cálculo inverso o retrocálculo, que consiste en determinar los valores de los módulos resilientes que mejor modelan las deflexiones y deformaciones medidas, presentando como gran ventaja el hecho de que se realiza mediante ensayos no destructivos.

En la figura 3.1 se muestran los métodos utilizados para tal fin y luego se presenta una breve descripción de los mismos:

Figura 3.1 Métodos utilizados para calibración de módulos resilientes



4. ENSAYOS DE CAMPO

Estos son los ensayos que se realizan en el sitio para determinar los parámetros más significativos en el diseño de pavimentos. En la evaluación estructural de los pavimentos, se consideran como parámetros más significativos las deflexiones y deformaciones obtenidas como respuesta de un firme flexible ante la aplicación de una carga sobre la superficie del pavimento. Aunque existen otras medidas que pueden dar una idea del estado estructural del pavimento, la deflexión en superficie es, sin duda, la que ofrece las posibilidades de análisis más amplias.

Son muchos los métodos no destructivos utilizados para obtener la respuesta de un firme de pavimento a una solicitación, y que se diferencian, fundamentalmente, en la forma de aplicación de la carga, pero para el caso en estudio se utilizaron como parámetros de referencia las deflexiones y deformaciones obtenidas en los ensayos de placa y viga Benkelman, razón por la cual se describen estos ensayos a continuación:

4.1 ENSAYO DE PLACA

Imagen 4.1 Ensayo de placa



Los ensayos de placa de carga se utilizan para comprobar el módulo de deformación de capas de terraplenes y firmes. El método habitualmente utilizado es el estático, con carga aplicada sobre una placa circular mediante un gato hidráulico, utilizando un camión cargado o una máquina pesada como reacción para el gato (Tadeo, 2006).

Consiste en medir el desplazamiento vertical de un punto de la superficie de un suelo situado en la vertical del centro de gravedad de una placa rígida cargada. En cada punto de ensayo se miden las deflexiones, producidas en dos o más ciclos de carga, respecto a una posición inicial de referencia. (NLT-357, 1998).

En Colombia la norma que regula la aplicación del ensayo es la INVE 168-7, la cual tiene como referencia las normas AASTHO T 222-81 y la ASTM D 1196. De acuerdo a la norma los ensayos realizados en el sitio son usados para la evaluación y diseño de estructuras de pavimento.

Cabe resaltar, que debido a que la realización del ensayo es compleja, delicada y larga, en otras palabras un ensayo lento y costoso, y para responder a la necesidad de disponer de equipos sencillos, económicos y de alta producción para determinar el módulo de deformación de las capas compactadas de suelo, nacieron hace 20 años en Centro Europa los equipos ligeros de impacto que realizan ensayos de placa de carga dinámica de 300mm de diámetro, utilizando una masa de accionamiento manual como elemento de carga, y un dispositivo electrónico de medida de los movimientos de la placa (Tadeo, 2006).

El equipo utilizado en el ensayo de placa, como se muestra en la figura 4.1, consta básicamente de unas placas de carga, una reacción Cilindro o gato hidráulico, dispositivos para medición de las cargas, diales indicadores, viga de deformación, herramientas misceláneas y un aparato consolidómetro.

Figura 4.2 Esquema de equipo para ensayo de placa con carga



Fuente: Estabilización de subrasante. Álvarez Pabón, Jorge; 2004

Placas de carga. Las placas de carga presentan las siguientes características:

- Deben de estar construidas en acero.
- La superficie inferior debe ser plana.
- En la zona superior debe disponer de un nivel de burbuja para ajustar horizontalmente y poder compensar inclinaciones de la placa de hasta 7 grados.
- El espesor de cada una debe ser no menos de 25,4 mm (1”), y deben estar maquinadas de tal forma que puedan disponerse a manera de pirámide para asegurar rigidez y que tengan diámetros de 152 a 762mm (6” a 30”).
- Los diámetros de las placas adyacentes en la disposición piramidal no deberán diferir en más de 152 mm (6”).

Reacción. Para realizar el ensayo es necesario un sistema de reacción, cuya carga útil sea, como mínimo, superior en 10 KN a la carga máxima necesaria para el ensayo. Se puede utilizar un camión o remolque o una combinación de ambos, un tracto-remolque, un marco de anclaje u otra estructura cargada con peso suficiente para proporcionar la reacción deseada sobre la superficie de apoyo.

Cilindro o gato hidráulico. El gato debe tener suficiente capacidad para aplicar la máxima carga requerida, y estar provisto de un manómetro calibrado exactamente, o de un anillo de carga, que indique la magnitud de la carga aplicada.

Dispositivos para medición de las cargas. Entre la placa y el sistema de aplicación de la carga, se sitúa un dispositivo de medida, mecánico o electrónico con objeto de poder medir directamente la carga aplicada, independientemente del control que realice en el sistema de presión de aceite. Dicho medidor debe indicar la carga correspondiente con un margen de error equivalente, como máximo, al 1% de la carga máxima que se prevee alcanzar en el ensayo.

Diales indicadores. Tres o más, graduados en unidades de 0,02mm (0,001”) y que pueden registrar una deflexión acumulada de al menos 25,4 mm (1”) u otros dispositivos equivalentes para medir deformaciones.

Viga de deformación. Sobre la cual deberán montarse los manómetros indicadores. La viga es un tubo de acero normal de 63,5 mm (2^{1/2}”) de diámetro o equivalente.

Esta debe descansar sobre soportes localizados por lo menos a 1,2 m (4') de la circunferencia de la placa de soporte o de la rueda o pata de apoyo más próxima.

Herramientas misceláneas. Deberá incluirse un nivel de burbuja, para la preparación de la superficie que se va a ensayar y para la operación del equipo, así como termómetro, balanzas, arena seca de granulometría media, aceite, protección contra sol y viento, horno y otras herramientas menores.

Aparato consolidómetro. Equipo necesario para recortar una muestra inalterada de suelo dentro de un anillo del consolidómetro de ensayo.

Para la correcta realización del ensayo se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- El ensayo de carga con placa puede realizarse sobre distintos tipos de suelo, ya sean de granulometría gruesa, media o fina.
- Debajo de la placa no debe encontrarse material granular con tamaño superior a una cuarta parte del diámetro de la placa.
- En el caso de que se trate de arenas de granulometría uniforme, el ensayo de carga con placa debe realizarse siempre por debajo de la primera capa superior; la densidad del suelo que se ha de estudiar debe mantenerse lo más inalterada posible.
- En caso de suelos de granulometría fina, el ensayo de carga con placa sólo podrá realizarse y valorarse adecuadamente cuando aquellos posean una consistencia que varíe de rígida a firme.

El procedimiento más apropiado para la realización de éste ensayo se divide en dos pasos como son la preparación de la superficie de ensayo y la instalación del equipo de carga con placa.

En el primer paso, como su nombre lo indica, se prepara una superficie plana lo suficientemente grande para situar adecuadamente la placa de carga.

Para ensayos confinados, el diámetro del área circular excavada deberá ser apenas suficiente para acomodar la placa de apoyo seleccionada.

En el segundo, se recomienda seguir los siguientes pasos:

- 1) Se sitúa la placa en el lugar elegido y se presiona de forma que no queden puntos en los que no exista contacto entre el suelo y aquella.
- 2) Si es necesario enrasar o nivelar las desigualdades se extiende una capa de arena seca de granulometría media.
- 3) A continuación, se ajusta la placa de carga haciéndola girar y golpeándola suavemente sobre su superficie.
- 4) Se coloca el cilindro hidráulico sobre la placa de carga formando ángulo recto con ella, y de forma que quede protegido contra posibles vuelcos.
- 5) La distancia entre la placa de carga y la superficie de apoyo de la reacción debe ser como mínimo de 0,75 m para una placa de 300 mm de diámetro, de 1,10 m, para una placa de 600 mm de diámetro, y de 1,30 m, para una placa de 762 mm de diámetro.

4.1.1 Módulo elástico a partir de ensayos de placa. Del ensayo de placa se pueden obtener diferentes módulos de elasticidad, entre otros, el módulo tangente inicial y el módulo para un nivel de esfuerzo dado. Para determinar el módulo tangente inicial $E_{PLT(i)}$ se traza una línea tangente al segmento inicial de la curva esfuerzo-deformación, luego se selecciona un punto arbitrario sobre esta línea, y

el esfuerzo y deformación correspondiente a este punto se utiliza para determinar el módulo inicial (Nazzal, 2003) (Abu-Farsakh, 2004).

Abu-Farsakh et al, indica que en muchos países de Europa el ensayo de placa es utilizado para evaluar estructuras de pavimentos flexibles y rígidos. La National cooperative Highway Research Program citando a Abu-Farsakh expresa que en pocos estados de Estados Unidos como Florida y Louisiana han intentado establecer correlaciones entre los ensayos de placa y el módulo resiliente. Más investigaciones son necesarias para entender mejor la aplicabilidad de los ensayos de placa en la evaluación de las propiedades resilientes de subrasantes y subbases (National cooperative Highway Research Program, 2008).

De acuerdo a la norma FM 5-527 o método de ensayo de la Florida, el módulo elástico puede determinarse utilizando la ecuación:

$$E = \frac{1.18PR}{0.050} \quad \text{Ecuación 4.1.}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad (psi)

R = radio de la placa seleccionada (pul²)

P = Esfuerzo en 0.050 pul (psi)

La correlación anterior se deriva de la propuesta por Yoder & Witczak, citada por Nazzal, como la ecuación general para determinar el módulo elástico para el ensayo de placa, cuya expresión es:

$$E_{PLT} = \frac{1.18PR}{\delta} \quad \text{Ecuación 4.2.}$$

Donde:

E_{PLT} = Módulo elástico de carga de placa

P = Esfuerzo aplicado

R = Radio de la placa

δ = deflexión de la placa para el esfuerzo P.

El factor 1.18 es basado en una relación de Poisson de 0.5, valor no típico en los materiales usados en la construcción de carreteras que están entre 0.25 y 0.4 (Nazzal, 2003) citando a (Horhota, 1996).

Los módulos elásticos obtenidos por los procedimientos anteriores son del espesor de la estructura de pavimento. El módulo elástico de la capa de base puede obtenerse utilizando el modelo Method Equivalent Thickness (MET) de Odemark (Abu-Farsakh, 2004) (Nazzal, 2003).

4.2 VIGA BENKELMAN

Imagen 4.3 Viga Benkelman



La viga Benkelman es un equipo que fue desarrollado durante el ensayo de la “Western Association of State Highway Organizations” (WASHO) en 1952. Se trata de un dispositivo bastante simple, que funciona aplicando la conocida “regla de la palanca” (Nazzal, 2003). Este método se puede considerar simple y económico y su principio de aplicación es ampliamente conocido y consiste en medir el

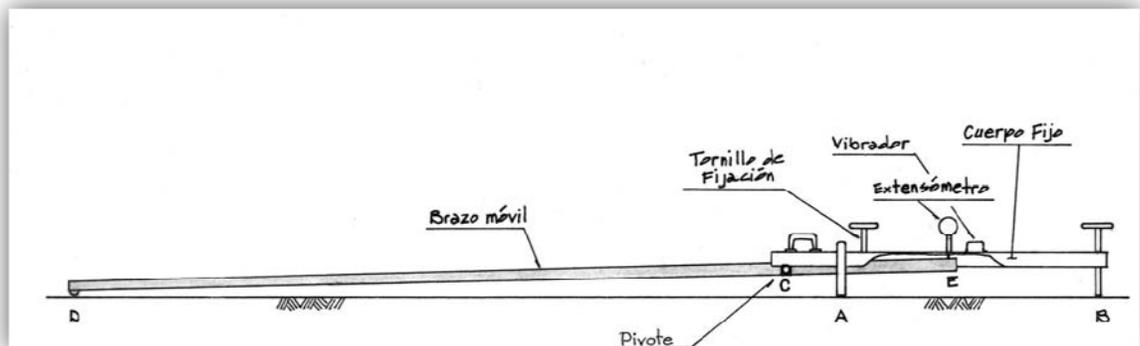
desplazamiento vertical del pavimento ante la aplicación de una carga estática o de lenta aplicación (Goel & Das, 2008).

Este equipo se usa junto con un camión cargado; el ensayo se realiza colocando el extremo de la viga entre las dos ruedas gemelas del camión, midiendo la recuperación vertical de la superficie del pavimento cuando el camión avanza y se retira. (Crespo del Rio & Bardasano, 2004).

Según se esquematiza en la figura 4.2, la viga Benkelman consta esencialmente de dos partes:

1. Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos "A" y uno trasero regulable "B")
2. Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote "C", uno de cuyos extremos se apoya sobre el terreno (punto "D") y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical (punto "E").

Figura 4.2 Esquema de viga Benkelman



Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos no destructivos); Hoffman Mario & Del Aguila Pablo; 1985.

Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas.

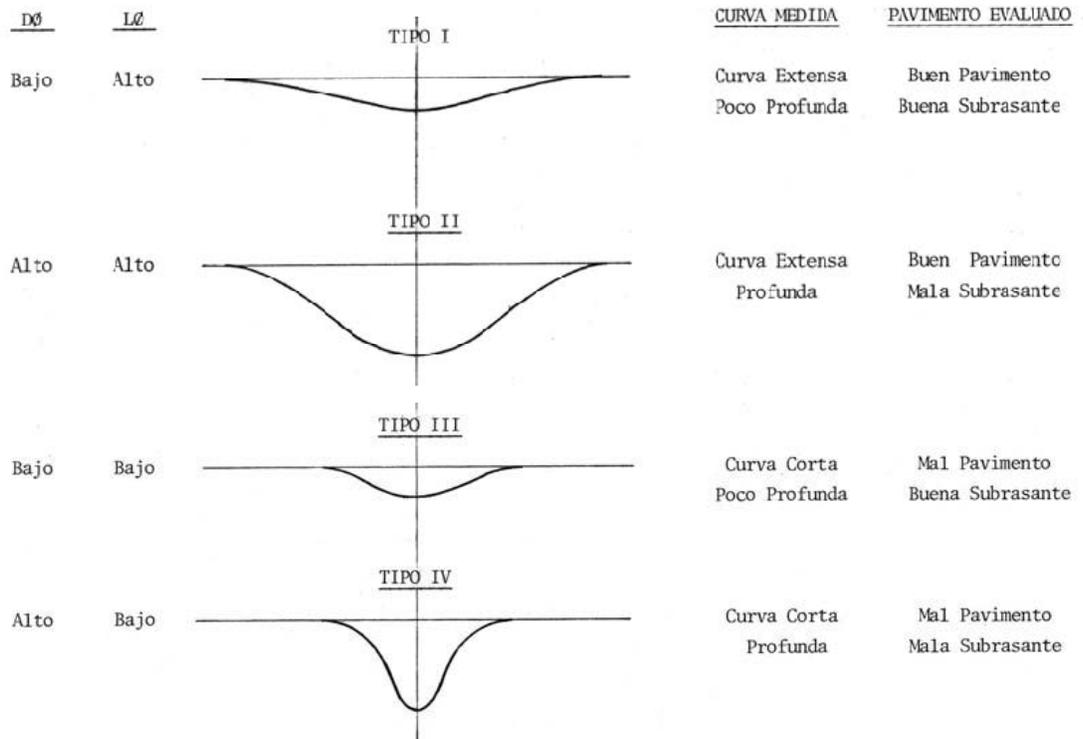
Su principio de aplicación es ampliamente conocido y consiste en medir el desplazamiento vertical del pavimento ante la aplicación de una carga estática o de lenta aplicación.

El ensayo entrega como resultados la medida de las deflexiones bajo el centro de rueda doble de un eje sencillo de 8,2 toneladas y a 25,0 cm de ese punto sobre la línea de avance del vehículo (D_0 y D_{25} respectivamente), además permite determinar la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas asfálticas al flexionar bajo la acción de las cargas de tránsito (Varela, 2002).

Si la deflexión es alta implica que 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 (Higuera, 2007).

Se hace indispensable relacionar las deflexiones con las curvas medidas para una mejor comprensión del comportamiento del pavimento, es por esto que dicha relación se resume en cuatro tipos de curvas de deflexiones con su significado cualitativo, como se muestra en la figura 4.3.

Figura 4.3 Significado cualitativo de los tipos de curvas de deflexiones



Fuente: Hoffman Mario & Del Águila Pablo. Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos), 1985.

Se advierte que el conocimiento de las deflexiones constituye un elemento de juicio necesario pero no suficiente para evaluar los pavimentos flexibles de servicio, por lo que dichas medidas deben asociarse con determinaciones de radio de curvatura, observación directa de las fallas, espesores de las capas del pavimento existentes y características de los materiales y la capa subrasante, con el fin de tomar las medidas de corrección más adecuadas en cada caso particular. (Mendoza, Rios, & Torres, 1993).

Las medidas de las deflexiones con la viga Benkelman presentan diferentes ventajas entre las cuales podemos destacar su indispensabilidad para obtener la

correlación entre cualquier deflectómetro y la viga Benkelman por ser el patrón universal de medida de las deflexiones, la rapidez y eficacia al ser utilizado en tramos cortos o en zonas muy localizadas en las que se produzcan anomalías con respecto a otros equipos de mayor rendimiento que para efectuar las medidas tenga que realizar grandes desplazamientos, su uso único para la auscultación generalizada en una red secundaria de carreteras en las que las incidencias de tráfico son menores, etc.

4.2.1 Radio de curvatura. La determinación del radio de curvatura en el ensayo de viga Benkelman constituye un importante complemento a la evaluación realizada mediante deflexiones, por cuanto determina la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas asfálticas al flexionar bajo cargas. (Mendoza, Rios, & Torres, 1993).

El método más razonable para determinar el radio de curvatura es el de los franceses el cual se basa en la hipótesis de que la línea de deflexiones en función de la distancia superior a 25 cm sufriendo luego una inflexión para tender asintóticamente hacia la horizontal. La curvatura de la parábola queda entonces definida por su parámetro, el cual en la zona de máxima curvatura se confunde con el radio del arco osculador en dicho punto, o sea exactamente bajo el centro del eje de la rueda cargada (Montejo, 2002).

El radio de curvatura se obtiene mediante la ecuación 4.3, la cual omite algunos términos relativos a las propiedades de la capa asfáltica pero ofrece un nivel de precisión adecuado (Jung, 1989):

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad \text{Ecuación 4.3.}$$

La experiencia disponible en la actualidad permite concluir que valores del radio de curvatura inferiores a 80m indican la presencia de zonas débiles bajo las capas

asfálticas, lo que es individualmente peligroso para el pavimento, aunque las deflexiones se encuentren dentro de límites admisibles (Mendoza, Rios, & Torres, 1993).

Entre el equipo requerido para desarrollar el ensayo se encuentran:

- Deflectómetro viga Benkelman
- Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0,01 mm
- Camión cargado, con eje trasero de 18000 libras igualmente distribuidas en un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi.
- Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo misceláneo (camioneta).
- Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- Accesorios de medición y otros (cinta métrica, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales de seguridad, varilla de metal o madera de 2m, etc).

Para la realización del ensayo, se deben tener presente las siguientes condiciones:

- La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones debe ser de 9000 libras (4090 kg).
- La carga aplicada al pavimento será proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión.

- Debe tenerse en cuenta la presión de las llantas requerida.
- Localizar el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril).
- Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas de las deflexiones que se producen, pero se pueden obtener más con fines de verificación.
- Para la rutina del ensayo será necesario del concurso de tres operadores: un técnico calificado que lea y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez dé aviso al técnico que realiza las lecturas, cuando la varilla adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga.
- Todo el trabajo deberá ser supervisado permanentemente por un ingeniero de campo quien verificará los valores que se vayan obteniendo así como tomará anotación de cualquier factor que a su juicio pueda explicar los resultados que se obtengan (corte, relleno, tipo de material, presencia de alcantarillas, nivel freático, estado del pavimento, etc).

El procedimiento con el que se lleva a cabo el ensayo es el siguiente:

1. Localización del lugar donde se realizará el ensayo.
2. Se coloca la llanta a usarse sobre el punto de aplicación de tal manera que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto.

3. Se coloca la viga Benkelman en posición como si estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir, empleando una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje del centro de gravedad.
4. Tomando como referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión, se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir (la marca con la varilla vertical) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.
5. Después de estacionar los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado, realizando previamente los dos pasos anteriores para mayor precisión.
6. Para realizar las marcas adicionales, por norma la primera se realiza a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima (obtenida en la marca inicial); y la segunda se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional.
7. Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la cadena vertical y la marca inicial, se verificará que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión.
8. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y segunda marca adicional, y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo de tal forma que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEFLEXIONES

Cuando se realiza un programa de auscultación de una vía, se busca evaluar la capacidad estructural del pavimento, y poder establecer programas de rehabilitación. Dos parámetros utilizados para determinar el comportamiento estructural de un pavimento son la deflexión admisible y la deflexión característica, que involucra conceptos estadísticos como promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

4.3.1 Deflexión característica. Para obtener la deflexión característica o deflexión representativa del tramo se aplica la fórmula (Cataño *et al*)

$$D_c = (D + 2\sigma)K_t.C. \quad \text{Ecuación 4.4.}$$

Donde:

D_c = Deflexión característica representativa

D = Valor medio de la deflexión

σ = Desviación estándar

K_t = Factor de ajuste de temperatura. Su valor se toma como unitario ($K_t=1$)

C = Factor de corrección por condiciones ambientales

El valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (parámetro que nos indica la homogeneidad de los datos) se calculan mediante las ecuaciones:

Valor medio de la deflexión

$$D = \frac{\sum d}{n} \quad \text{Ecuación 4.5.}$$

Desviación Estándar

$$\sigma = \left(\frac{\sum (d-D)^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 4.6.}$$

Coefficiente de variación

$$V = \frac{\sigma}{D} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.7.}$$

Donde:

D = media aritmética de los valores individuales

d = valor individual de un ensayo.

n = número de ensayos individuales.

El factor (Kt) se toma como unitario ya que no se requiere corrección por temperatura en estructuras de pavimentos compuestas por un tratamiento superficial o mezclas asfálticas delgadas, es decir, en carpetas asfálticas menores de 10cm.

El valor de C depende de la naturaleza del suelo subrasante y el periodo característico de la zona (ver tabla 4.1.)

Tabla 4.1. Corrección de la deflexión por condiciones ambientales

Naturaleza del suelo subrasante	Coefficiente de corrección		
	Periodo lluvias	Periodo intermedio	Periodo seco
Suelos arenosos y permeables	1.0	1.0 - 1.1	1.1 - 1.3
Suelos arcillosos e impermeables	1.0	1.3-1.5	1.5 - 1.8

Fuente: Ingeniería de pavimentos para carreteras. Montejo, Alfonso. Bogotá, 2002

4.3.2 Deflexión admisible. La deflexión característica debe compararse con la admisible (ver tabla 2.2), que es la máxima que resiste el pavimento antes de llegar a un estado crítico. El concepto de deflexión admisible, se encuentra íntimamente relacionado con el Número de ejes Standard Equivalentes Acumulados de 8,2 ton. (Mendoza, Rios, & Torres, 1993)

Tabla 4.2. Calificación del pavimento según relación (Dc/ Δadm)

Rango	Medida de calificación
Muy bueno (entre 5,0 y 4,0)	$Dc/\Delta_{adm} < 0,5$
Bueno (entre 4,0 y 3,0)	$0,5 < Dc/\Delta_{adm} < 1,0$
Regular (entre 3,0 y 2,0)	$1,1 < Dc/\Delta_{adm} < 1,4$
Malo (entre 2,0 y 0,0)	$Dc/\Delta_{adm} > 1,4$

Fuente: Cataño Sandra, Gómez Alexander & Sánchez Marcos. Propuesta de un procedimiento para determinar el índice de estado de un pavimento de la red vial colombiana. Trabajo de grado Universidad de Medellín, 2002.

Existen diversos criterios para obtener la deflexión admisible como el del Instituto de Asfalto, el Checoslovaco, el de la RTAC de Canadá, el Ivanov, Ruiz, la AASHTO Road Test, la CGRA de Canadá y el Belga (Higuera C. , 2007), pero se ha demostrado y por tal razón será el utilizado en este proyecto, que el más conveniente para calcular la deflexión admisible de un modelo estructural de pavimento flexible debido a que presenta valores medios es el criterio de Yang H. Huang, y su expresión de cálculo es la siguiente:

$$\Delta_{adm} = 26,32202N^{-0,2438} \quad \text{Ecuación 4.8.}$$

Donde:

Δ_{adm} : Deflexión vertical admisible, mm.

N : Número acumulado de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

5. MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO APROXIMADO

Estos son métodos utilizados para el diseño de pavimentos flexibles, a través de los cuales se pueden determinar de manera aproximada módulos resilientes por medio de retrocálculos de ensayos in situ y se caracterizan por tener en cuenta la influencia del estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura de pavimento en el comportamiento del mismo.

Se utilizan entonces diversos programas de computador a los cuales se le introducen la carga, la presión de contacto, el módulo elástico, la relación de Poisson y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación, para luego compararlos con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada, y en un procedimiento de ensayo y error, determinar los parámetros que se buscan, entre los cuales se encuentran el dimensionamiento de las capas de la estructura del pavimento y la obtención de módulos resilientes.

El hecho de que estos programas sean de análisis “aproximado” nos da la idea de que presentan muchas desventajas, entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- Suponen que el pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal (compuesto por tres capas: la subrasante, la capa granular no tratada y la capa asfáltica).
- No tienen en cuenta las diferentes geometrías que puedan presentar las estructuras de pavimento y la carga es estática.
- No tienen en cuenta el efecto del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.

- Suponen materiales isotrópicos y homogéneos.
- El empleo de ecuaciones elásticas genera valores no reales de esfuerzos de tensión en las capas granulares.

Algunos de estos programas son: ALIZE (LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), ELSYM5 (Chevron Oil), BISAR (SHELL), KENLAYER (University of Kentucky) y DEPAV (Universidad del Cauca). (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

De los programas de computador mencionados, se describe a continuación el programa DEPAV y su versión para Windows WinDepav20.rar, ya que serán utilizados en el proceso de calibración de módulos resilientes como métodos de análisis aproximado; éstos programas pueden ser bajados gratuitamente de internet, ingresando a la página <http://ingepav.googlepages.com/softwareingepav>, creada por el ingeniero civil y especialista en vías y transporte Luis Ricardo Vásquez Varela.

5.1 PROGRAMA DEPAV

Este programa fue escrito en el Instituto de Vías de la Universidad del Cauca por los ingenieros Alfonso Murgueitio Valencia y Efraín de Jesús Solano Fajardo, dentro de la Investigación Nacional de Pavimentos de 1994.

Fue desarrollado como una adaptación del programa francés ALIZÉ III del Laboratoire Central de Ponts et Chaussées. El programa DEPAV calcula los esfuerzos y las deformaciones máximas producidas en las interfaces de un sistema elástico multicapa por una rueda doble colocada en la superficie. El sistema elástico multicapa puede estar constituido entre dos y seis capas caracterizadas por el espesor, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Además calcula la Deflexión y el Radio de Curvatura al centro de Rueda Doble.

Los parámetros y sus respectivas unidades usados durante el programa son los siguientes:

Radio de carga [cm]

Presión de contacto [kg/cm^2]

Distancia entre llantas [cm]

Módulo de Elasticidad (E) [kg/cm^2]

Relación de Poisson (μ) [A dimensional]

Espesor de la capa (H) [cm]

Adicionalmente consta de un menú principal donde se observan varias secciones, a saber:

Código y título del trabajo: En esta sección se realiza la administración de los diferentes trabajos que se desea realizar.

Información de Alternativas. Para cada trabajo se pueden formular hasta diez estructuras multicapa elástica.

Cálculos. En esta sección las estructuras creadas son analizadas por el motor de cálculo del programa (DEPAVF.EXE). Para iniciar el proceso, el programa solicita confirmación.

Resultados. Al ingresar a esta sección se le solicita al usuario que elija la alternativa que quiere consultar. Los datos se presentan en forma tabular y es posible imprimirlos.

5.2 WINDEPAV 2.0 (Vásquez, 2007)

El programa DEPAV fue elaborado en BASIC y su presentación corresponde a excelentes estándares de texto y gráficos bajo el sistema operativo MS-DOS.

La aparición de los sistemas operativos Windows 9X y posteriores han hecho que las aplicaciones en MS-DOS presenten algunos problemas para su ejecución, los cuales varían entre la restricción total por problemas de administración de memoria hasta simples problemas de presentación de algunos elementos gráficos. Por lo anterior, fue necesario crear la interfase en Windows del programa DEPAVF para el análisis de sistemas multicapas elásticos (Vásquez, 2007).

Características de WINDEPAV 2.0

Básicamente el programa presenta las siguientes características:

- **Formulario principal.** Es donde se encuentra la información de la estructura, la carga y las leyes de fatiga.
- **Asistente para propiedades de las capas.** Aquí podemos observar que solo se consideran cuatro tipos de materiales: concreto asfáltico, base tratada con cemento, bases granulares y suelo de grano fino.
- **Asistente para leyes de fatiga.** Se consideran funciones de tensión inferior y compresión superior en función de las deformaciones unitarias. Para el caso especial de las granulares se emplea el esfuerzo vertical superior.

- **Asistente de la carga.** Se consideran varias configuraciones estandarizadas para el eje de 8.2 toneladas y la configuración del eje de 13.0 toneladas empleada en Francia y otros países.
- **Formulario de resultados.** Esfuerzos y deformaciones de la estructura. Análisis del comportamiento de la estructura.
- **Formulario de gráficos de las respuestas estructurales.** El contenido del gráfico se puede copiar en el portapapeles de Windows.

6. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Actualmente se ha venido desarrollando una nueva tecnología para el estudio y análisis de pavimentos la cual emplea programas de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones.

El método de los elementos finitos parte de la construcción de un modelo matemático aproximado con los parámetros discretos para representar el problema físico que se trata de resolver. La esencia de su buena aplicación está en la selección apropiada del elemento básico (elemento finito) y de su correcta interconexión para construir el modelo, de modo que resulte un sistema convergente, esto es, que represente cada vez más exactamente el problema a medida que aumente el número de elementos. (Rivera, 1987).

Su historia comenzó en los años 50 al plantear la solución de estructuras de barras aplicando sistemas matriciales, en otras palabras, fue propuesto inicialmente para resolver problemas de análisis estructural; no obstante, con la evolución de los computadores su uso se ha extendido a otros campos de manera que se ha convertido en una herramienta imprescindible para la solución numérica de muchos problemas de análisis en ingeniería.

Es conveniente anotar que este método computacional es una poderosa herramienta ingenieril que se fundamenta en la resolución de problemas mediante su modelamiento numérico con ecuaciones diferenciales y su solución mediante sistemas de matrices (Rios, 2003).

La ecuación general que se resuelve es de la forma:

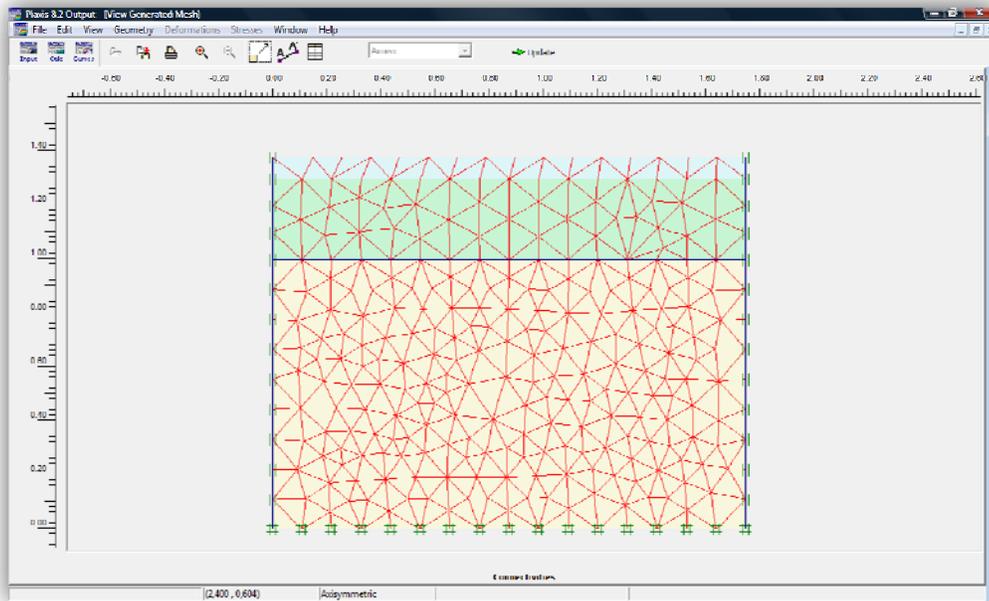
$$[R] = [k] * [u] - [F] \quad \text{Ecuación 6.1.}$$

Donde:

- = Matriz de reacciones
- = Matriz de rigidez
- = Matriz de deformaciones
- = Matriz de cargas

La idea principal de este método es dividir un dominio determinado en partes más pequeñas (Discretización) generalmente triangulares llamadas “Elementos”, los cuales están unidos en puntos específicos llamados “nodos”, esta discretización se muestra en la imagen 6.1.

Imagen 6.1 Discretización



En los “nodos” se plantean ecuaciones de equilibrio que se resuelven simultáneamente para obtener la solución del sistema bajo estudio. Los elementos llenan toda la región excepto una pequeña región en la frontera. Esta región no cubierta existe en fronteras curvas y puede reducirse escogiendo elementos más pequeños o elementos con fronteras curvas, pues esta región no cubierta contribuye en alguna medida a la aproximación que intenta resolver el método del

elemento finito; la división en “elementos” se conoce como enmallado y dado que la división es en partes finitas, el método recibe el nombre de **elementos finitos**. De manera gráfica, este método se puede resumir como lo muestra la figura 6.1, de la cual podemos anotar:

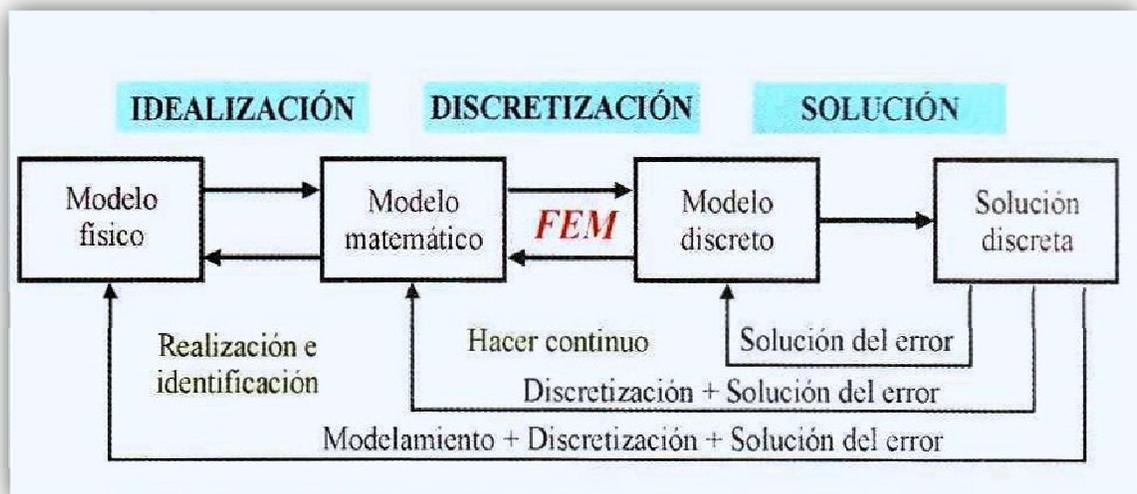
Modelo físico. Objeto de estudio, el cual es el punto de partida para el análisis.

Modelo matemático. Aproximación del comportamiento del sistema mediante ecuaciones diferenciales.

Modelo discreto. Modelo elaborado en el programa de simulación, el cual es una representación que incluye la geometría, cargas aplicadas, restricciones, elementos para el enmallado y las características del material.

Solución discreta. Conjunto de resultados que arroja el programa de una variable en particular, con base en el cual se calculan los demás parámetros a estudiar.

Figura 6.1 Modelo de los elementos finitos



Fuente: Herramientas computacionales en ingeniería. Artículo de revista INGENIUM. Rios Ricardo Augusto, 2003.

Todo programa de elementos finitos está compuesto principalmente de tres partes:

Preprocesador (Idealización y discretización). Es la parte del programa que permite el modelamiento y definición de la geometría del problema, ya sea en 2D o en 3D. Además, aquí se definen las características relevantes del análisis, de la misma manera que fue enunciado para el modelo discreto.

Procesador (Solución discreta). Aquí se realizan las operaciones matriciales para obtener la solución de la variable principal, la cual depende del tipo de análisis.

Posprocesador. Esta última parte permite la visualización de resultados, mediante una ventana gráfica, y cuya representación se hace mediante escalas de colores que indican el valor de la variable analizada dentro de la geometría.

Para pavimentos, algunas de las ventajas del empleo de programas de elementos finitos radica en que se puede llegar a tener en cuenta que los materiales granulares no tratados que los conforman exhiben un comportamiento no lineal, dependiente de la condición de esfuerzos, y comportamiento viscoso en las capas asfálticas y en la subrasante. Son capaces de modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera, criterios de falla y carga cíclica. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Los programas elásticos multicapas han sido preferidos con respecto a los de elementos finitos debido a su simplicidad en el manejo y en el entendimiento de las ecuaciones con las que se obtienen los estados de esfuerzo y deformación. Pero en general, los programas de elementos finitos son mejores para intentar reproducir el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman un pavimento. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que

predigan lo más cercano posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

En el mercado existen diversos programas de elementos finitos como el Abaqus, Plaxis y Ansys, pero algunos que se especializan en pavimentos son el SENOL (University of Nottingham), FENLAP (University of Nottingham), ILLI-PAVE (University of Illinois), GT-PAVE (Georgia Institute of Technology) y el NOEL (Université de Nantes); de estos programas se utilizará para la calibración de los módulos resilientes el programa PLAXIS (Delft University of Technology), del cual la Universidad de Medellín tiene la licencia y por tal razón no presenta ningún inconveniente utilizarlo, a continuación se hace una breve descripción del programa:

6.2 PROGRAMA PLAXIS (Brinkgreve, 2004)

PLAXIS es un programa de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. El programa utiliza una interface gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate. Es necesario que los usuarios estén familiarizados con el entorno Windows.

La interface de usuario está constituida por cuatro subprogramas (Input (Entrada), Calculations (Cálculos), Output (Resultados) y Curves (Curvas)).

El programa de introducción de datos (input): Este programa contiene todos los dispositivos necesarios para crear y modificar un modelo geométrico, así como

para generar la correspondiente malla de elementos finitos y las condiciones de contorno.

La parte final de la introducción de datos comprende la generación de las presiones de agua y de las tensiones efectivas que definen el estado inicial.

El programa de cálculos: Este programa contiene todos los dispositivos para definir e iniciar cálculos a realizar mediante el método de los elementos finitos. Al principio del programa de Cálculos, el usuario ha de seleccionar el proyecto para el cual se han de definir los cálculos.

El programa de Cálculo se centra exclusivamente en los análisis de deformación y distingue entre un cálculo plástico (*Plastic*), un análisis de Consolidación (*Consolidation*), un análisis de Seguridad (*Phi-c reduction*) y un cálculo Dinámico (*Dynamic*).

El programa de resultados (output): Dicho programa contiene todos los dispositivos para ver y elaborar listas de resultados correspondientes a la situación inicial y a cada fase de cálculo. El usuario debe empezar seleccionando el modelo y la fase de cálculo o el número de paso apropiados cuyos resultados se desea ver. Después de esta selección, se abre una primera ventana de resultados en la que se representa la malla deformada.

Los principales resultados que proporciona un cálculo mediante elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y las tensiones en los puntos de tensión.

Además, cuando un modelo de elementos finitos incluye elementos estructurales, se calculan los esfuerzos estructurales en dichos elementos. En Plaxis existe una amplia gama de dispositivos para la presentación de los resultados de un análisis mediante elementos finitos.

El programa de curvas: El programa de Curvas contiene todos los dispositivos para generar curvas de carga-desplazamiento, trayectorias de tensión y diagramas tensión-deformación.

En estas curvas se visualiza la evolución de ciertas variables de interés a lo largo del proceso de cálculo, lo que proporciona una mejor comprensión del comportamiento global y local del suelo. Los puntos para los que se desee generar las curvas deberán ser seleccionados haciendo uso de la opción seleccionar puntos para curvas (*Select points for curves*) en el programa de Cálculos (*Calculations*) antes de dar inicio al proceso del cálculo.

No es posible generar curvas para puntos que no hayan sido previamente seleccionados, dado que la información requerida para ello no se encontrará en ningún fichero de datos para la generación de curvas.

7. METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES

Para cumplir a cabalidad con los objetivos propuestos en este proyecto, se seguirán los siguientes pasos:

- 1) Recopilar y revisar los resultados de los ensayos de campo (viga benkelman y placa) realizados en la pista de prueba de la vía Caldas-Angelópolis.
- 2) Analizar los resultados obtenidas en los ensayos de viga Benkelman y prueba de placa respectivamente.
- 3) Calibrar módulos resilientes de las bases estabilizadas en el programa Windepav a partir de los resultados de Do y radio de curvatura obtenidos en el ensayo de viga Benkelman.
- 4) Calibrar módulos resilientes de las bases estabilizadas en el programa Plaxis a partir de los resultados de deformación máxima obtenidos en el ensayo de placa.
- 5) Analizar los resultados de los módulos de las bases estabilizadas obtenidos en cada uno de los programas.
- 6) Elaborar las conclusiones.

Para calibrar los módulos resilientes de la base estabilizada del pavimento se hizo necesario partir de datos obtenidos en la investigación titulada “Mejoramiento de Suelos con Cal” realizada por los profesores investigadores de la Universidad de Medellín César Augusto Hidalgo Montoya y Mario Alberto Rodríguez Moreno. En el desarrollo de la investigación, en una primera fase se realizaron pruebas de laboratorio a través de ensayos destructivos sobre probetas de suelos con diferentes porcentajes de cal. En una segunda fase se desarrolló un trabajo de

campo consistente en la construcción de una pista de prueba en el sector de la carretera que comunica los municipios de Caldas y Angelópolis, a la cual se le realizó la auscultación a través de ensayos no destructivos como lo son el de placa y la viga Benkelman, buscando verificar el comportamiento de los materiales de la estructura de pavimento frente a cargas dinámicas reales y su evolución durante un tiempo de seguimiento definido por 6 meses (Hidalgo & Rodriguez, 2004).

7.1 PISTA DE PRUEBA

La pista de prueba, que comunica los municipios de Caldas y Angelópolis, es un tramo de 70 m de longitud, que pertenece a una vía cuyas condiciones de carga y características de sub-rasante son desfavorables para cualquier tipo de estructura de pavimento.

Desde el inicio de la investigación se planteó como una estructura compuesta por una retícula de 20 celdas con diferentes espesores, tipos de material y porcentajes de cal, donde cada celda tendría en promedio 7 metros de longitud y cuyo ancho sería la mitad de la calzada de la vía a intervenir.

Después de la visita de reconocimiento y de haber adquirido los datos de las características físicas del mismo, se diseñó una retícula conformada por 10 celdas en cada carril de la vía, como se muestra en la Figura 7.1.

Figura 7.1 Distribución reticular de la pista de prueba

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Las celdas están compuestas por bases de tres materiales diferentes (tabla 7.1) los cuales se nombran de acuerdo a consideraciones de la investigación, con adiciones de cal de 3%, 6%, 9% y 12% y espesores entre 20 cm y 30 cm.

Tabla 7.1 Materiales que componen las celdas de la pista de prueba

No Celda	Tipo de material	Adición de cal en %	Espesor de la estructura
1	Base granular MS-022	0	30
2	Base granular MS-022	3	30
3	Base granular MS-022	6	30
4	Base granular MS-022	9	30
5	Base granular MS-022	12	30
6	Base granular MS-022	3	30
7	Base granular MS-022	6	30
8	Base granular MS-022	9	30
9	Base granular MS-022	6	25
10	Base granular MS-022	9	25
11	Material granular MS-49	3	30
12	Material granular MS-49	6	30
13	Material granular MS-49	6	30
14	Material granular MS-49	9	30
15	Material granular MS-49	12	30
16	Suelo MS-049	3	30
17	Suelo MS-049	6	30
18	Suelo MS-049	9	30
19	Base granular MS-022	6	20
20	Base granular MS-022	9	20

Los materiales utilizados como bases de la estructura del pavimento y a los cuales se les adicionaron diferentes porcentajes de cal en cada celda presentan las características mostradas en la tabla 7.2. Los cuales se clasifican como limo elástico, base granular tipo BG-1 (Invias) y material granular contaminado con el suelo de fundación.

Tabla 7.2 Características físicas de los materiales de la base del pavimento

Características	Material granular MS-49: Procedente del municipio de Caldas utilizado en las celdas 1 a la 5.	Suelo MS-49: Material insitu utilizado en las celdas 6, 7 y 8.	Base granular MS-022: Material proveniente de la cantera Santa Rita utilizado en las celdas 9 a la 20.
Clasificación	MH (limo elástico)	-	BG-1
Límite líquido (%)	75,2	28	21
Límite plástico (%)	52,6	25,12	-
Índice plástico	22,6	2,88	-
Límite de contracción (%)	33	-	-
Gravedad específica:	2,78	2,77	2,91
% finos	87,2	-	9,7
% de desgaste	-	16,48	-
Humedad óptima (%)	-	6,5	-
Densidad máxima	-	2,28	-

7.2 DATOS DE ENSAYO DE VIGA BENKELMAN

Los resultados obtenidos en el ensayo de viga Benkelman (tabla 7.3) realizado en cada una de las celdas de la pista de prueba muestran que las celdas con bases de suelos adicionados con cal presentan menores deflexiones y mayores radios de curvatura que la base sin adición de cal. Sin embargo no se observa una tendencia clara de la variación de las deflexiones y radios de curvatura en función del contenido de cal, estos resultados son aleatorios.

Tabla 7.3 Deflexiones con viga Benkelman

N°	TIPO DE MATERIAL	%	DEFLEXIONES		RADIO DE CURVATURA	ESPESOR DE ESTRUCTURA
			D0	D25		
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 3	34	27	205	30
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	31	19	135	30
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	50	42	203	30
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 9	31	19	134	30
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 12	35	15	81	30
6	SUELO MS-49	L.M. 3	58	46	135	30
7	SUELO MS-49	L.M. 6	92	54	41	30
8	SUELO MS-49	L.M. 9	50	38	135	30
9	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	27	410	20
10	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	57	46	137	20
11	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 0	117	42	21	30
12	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	79	53	59	30
13	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	38	36	828	30
14	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	30	15	104	30
15	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 12	38	34	414	30
16	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	23	11	138	30
17	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	23	207	30
18	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	34	30	414	30
19	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	49	42	207	25
20	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	91	60	52	25
DEFLEXIONES mm/100						

A partir de estos datos se obtienen valores como la media, desviación estándar y coeficiente de variación de la deflexión debajo del centro de rueda doble (D0), que nos servirán de referencia para analizar los resultados por métodos estadísticos (ver tabla 7.4):

Tabla 7.4 Valores estadísticos de deflexiones en mm/100

DEFLEXIONES	
Valor medio de deflexión (D)	49,85
Desviación estándar (σ)	25,72
Coeficiente de variación (V)	51,59
Máxima deflexión (D _{max})	117
Mínima deflexión (D _{min})	23

La deflexión característica, tomando $C=1$ para la condición más desfavorable (ver ecuación 4.4) de las obtenidas a través del ensayo de viga Benkelman para el tramo en consideración es $D_c = 101,282 \text{ mm}/100$.

De la proyección de tránsito a un periodo de diseño de 12 años se tiene que $N = 7.34 \times 10^5$. Luego, de la ecuación $\Delta_{adm} = 26,32202(7.34 \times 10^5)^{-0,2438} = 0.977 \text{ mm}$

El cociente $\frac{D_c}{\Delta_{adm}} = 1.04$ lo cual califica el pavimento en el rango de bueno (tabla 4.2). Es de anotar que los ensayos se realizaron seis meses después de la construcción del pavimento.

7.3 DATOS DE ENSAYO DE PLACA

El ensayo de placa se realizó sobre cada una de las celdas de la pista de prueba. Los resultados se indican en las tablas 7.5 y 7.6, donde el número del ensayo coincide con el número de celda.

Tabla 7.5 Ensayos de placa en carril en dirección Angelópolis-Caldas

ENSAYOS DE PLACA							
ENSAYO DE PLACA #1		ENSAYO DE PLACA #2		ENSAYO DE PLACA #3		ENSAYO DE PLACA #4	
DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO
(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)
0,006	1,36	0,006	1,36	0,003	1,36	0,001	1,36
0	0	0	0	0	0	0	0
0,018	2,039	0,008	2,039	0,006	2,039	0,003	2,039
0,028	4,079	0,018	4,079	0,033	4,079	0,017	4,079
0,048	6,118	0,032	6,118	0,057	6,118	0,034	6,118
0,058	8,157	0,053	8,157	0,079	8,157	0,051	8,157
0,07	10,197	0,089	10,197	0,107	10,197	0,062	10,197
0,083	12,236	0,112	12,236	0,141	12,236	0,086	12,236
0,105	14,275	0,144	14,275	0,163	14,275	0,105	14,275
0,119	16,314	0,184	16,314	0,187	16,314	0,138	16,314
0,157	18,354	0,224	18,354	0,225	18,354	0,182	18,354
0,029	0	0,058	0	0,062	0	0,028	0
ENSAYO DE PLACA #5		ENSAYO DE PLACA #6		ENSAYO DE PLACA #7		ENSAYO DE PLACA #8	
DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO
(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)
0	1,36	0,006	1,36	0,011	1,36	0,008	1,36
0	0	0	0	0	0	0	0
0,018	2,039	0,019	2,039	0,047	2,039	0,014	2,039
0,042	4,079	0,043	4,079	0,08	4,079	0,036	4,079
0,062	6,118	0,069	6,118	0,113	6,118	0,053	6,118
0,088	8,157	0,091	8,157	0,146	8,157	0,086	8,157
0,112	10,197	0,112	10,197	0,184	10,197	0,112	10,197
0,155	12,236	0,138	12,236	0,21	12,236	0,152	12,236
0,187	14,275	0,173	14,275	0,255	14,275	0,187	14,275
0,224	16,314	0,199	16,314	0,288	16,314	0,22	16,314
0,25	18,354	0,237	18,354	0,328	18,354	0,251	18,354
0,056	0	0,051	0	0,093	0	0,039	0
ENSAYO DE PLACA #9		ENSAYO DE PLACA #10					
DEF. PROM.	ESFUERZO	DEF. PROM.	ESFUERZO				
(cm)	(kg/cm²)	(cm)	(kg/cm²)				
0,005	1,36	0,001	1,36				
0	0	0	0				
0,01	2,039	0,015	2,039				
0,019	4,079	0,041	4,079				
0,032	6,118	0,069	6,118				
0,042	8,157	0,089	8,157				
0,051	10,197	0,117	10,197				
0,064	12,236	0,151	12,236				
0,076	14,275	0,188	14,275				
0,093	16,314	0,215	16,314				
0,105	18,354	0,249	18,354				
0,011	0	0,084	0				

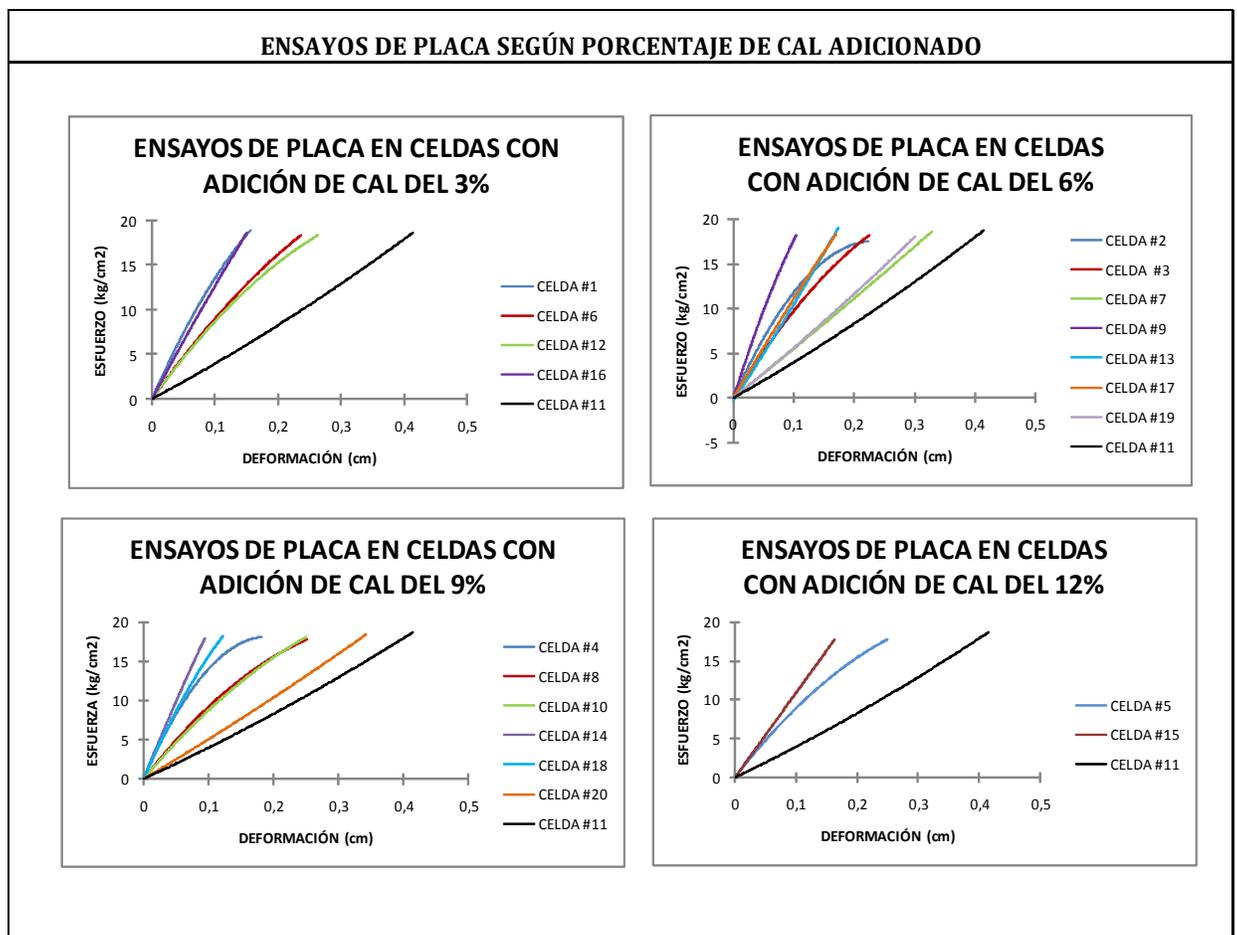
Tabla 7.6 Ensayos de placa en carril con dirección Caldas-Angelópolis

ENSAYOS DE PLACA							
ENSAYO DE PLACA #11		ENSAYO DE PLACA #12		ENSAYO DE PLACA #13		ENSAYO DE PLACA #14	
DEF. PROM. (cm)	ESFUERZO (kg/cm ²)						
0,010	1,36	0,003	1,36	0,005	1,36	0,004	1,36
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,000	0
0,053	2,039	0,022	2,039	0,022	2,039	0,009	2,039
0,100	4,079	0,046	4,079	0,046	4,079	0,017	4,079
0,159	6,118	0,076	6,118	0,064	6,118	0,025	6,118
0,198	8,157	0,083	8,157	0,079	8,157	0,041	8,157
0,240	10,197	0,119	10,197	0,099	10,197	0,055	10,197
0,287	12,236	0,155	12,236	0,114	12,236	0,066	12,236
0,324	14,275	0,182	14,275	0,130	14,275	0,075	14,275
0,359	16,314	0,218	16,314	0,145	16,314	0,084	16,314
0,414	18,354	0,264	18,354	0,173	18,354	0,094	18,354
0,132	0	0,053	0	0,041	0	0,005	0
ENSAYO DE PLACA #15		ENSAYO DE PLACA #16		ENSAYO DE PLACA #17		ENSAYO DE PLACA #18	
DEF. PROM. (cm)	ESFUERZO (kg/cm ²)						
0,004	1,36	0,004	1,36	0,006	1,36	0,003	1,36
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,000	0
0,017	2,039	0,015	2,039	0,018	2,039	0,008	2,039
0,034	4,079	0,029	4,079	0,036	4,079	0,018	4,079
0,053	6,118	0,048	6,118	0,053	6,118	0,034	6,118
0,074	8,157	0,069	8,157	0,071	8,157	0,05	8,157
0,093	10,197	0,081	10,197	0,091	10,197	0,062	10,197
0,117	12,236	0,095	12,236	0,113	12,236	0,076	12,236
0,135	14,275	0,113	14,275	0,130	14,275	0,089	14,275
0,150	16,314	0,128	16,314	0,147	16,314	0,107	16,314
0,163	18,354	0,152	18,354	0,169	18,354	0,123	18,354
0,025	0	0,023	0	0,03	0	0,018	0
ENSAYO DE PLACA #19		ENSAYO DE PLACA #20					
DEF. PROM. (cm)	ESFUERZO (kg/cm ²)	DEF. PROM. (cm)	ESFUERZO (kg/cm ²)				
0,013	1,36	0,011	1,36				
0,000	0,000	0,000	0,000				
0,042	2,039	0,047	2,039				
0,079	4,079	0,086	4,079				
0,112	6,118	0,132	6,118				
0,136	8,157	0,156	8,157				
0,164	10,197	0,188	10,197				
0,213	12,236	0,226	12,236				
0,248	14,275	0,269	14,275				
0,274	16,314	0,309	16,314				
0,300	18,354	0,342	18,354				
0,076	0,000	0,052	0,000				

Las gráficas de la figura 7.2 nos muestran las curvas esfuerzo-deformación agrupadas por porcentaje de cal adicionado en cada ensayo de placa realizado, adicionalmente, en cada gráfica se introduce la curva esfuerzo-deformación de la celda sin adición de cal, con el fin de observar la variabilidad:

Los resultados de ensayos de placa muestran (figura 7.2.) que las estructuras de pavimentos cuyas bases contienen adiciones de cal presentan menores deformaciones que la celda sin adición de cal, aun con espesores menores. También se observa que la forma de la gráfica de esfuerzo-deformación no es similar en ensayos con un mismo porcentaje de cal.

Figura 7.2 Curvas Esfuerzo-Deformación de los ensayos de placa



Los módulos de elasticidad (tabla 7.7) se determinan utilizando la ecuación 4.1 y la ecuación 4.2. Al utilizar la ecuación 4.1, en los ensayos en que los datos recolectados no alcanzan la deflexión de 0.050 pulg, se calcula el módulo elástico utilizando la ecuación 4.2 para el último valor de deflexión medido. Mientras que, el cálculo del módulo elástico de placa usando la ecuación 4.2 se realizó tomando la deflexión al esfuerzo de 18.354 kg/cm^2 . Las diferencias entre los resultados de calculo de las dos ecuaciones , en algunos casos son apreciables.

Tabla 7.7 Módulos de elasticidad de la estructura de pavimento

Ensayo N°	TIPO DE MATERIAL	%	ESPESESOR ESTRUCTURA	E (kg/cm ²) Ec. 2.7	E (kg/cm ²) Ec. 2.8	ERROR RELATIVO
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 3	30	693.8	797.3	13%
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	30	2378.9	2102.3	13%
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	30	1614.2	1392.7	16%
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 9	30	1515.1	1250.2	21%
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 12	30	2251.4	2171.5	4%
6	SUELO MS-49	L.M. 3	30	1855.0	1473.5	26%
7	SUELO MS-49	L.M. 6	30	1614.2	1466.9	10%
8	SUELO MS-49	L.M. 9	30	991.2	1006.3	1%
9	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	20	3143.5	3143.5	0%
10	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	20	1968.2	1907.9	3%
11	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 0	30	1968.2	1953.0	1%
12	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	30	1033.7	1100.2	6%
13	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	2209.0	1813.5	22%
14	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	30	1557.6	1315.0	18%
15	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 12	30	1529.3	1325.6	15%
16	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	30	3511.3	3511.3	0%
17	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	2683.4	2683.4	0%
18	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	30	892.1	965.1	8%
19	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	25	1529.3	1320.3	16%
20	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	25	1897.4	2024.9	6%

El módulo elástico de placa, de la estructura del pavimento, es menor en la base sin adición de cal, independientemente del tipo de material que conforma la base. También, el orden en la variación del módulo elástico de placa no coincide entre los dos procedimientos de cálculo. Independiente de lo anterior existe aleatoriedad de los valores de módulo elástico en función del contenido de cal.

7.4 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES ESTABILIZADOS CON CAL A PARTIR DE ENSAYOS DE PLACA Y VIGA BENKELMAN

Los métodos para calibrar los módulos resilientes de las bases estabilizadas con cal fueron el de análisis aproximado y elementos finitos:

7.4.1 Método de Análisis Numérico Aproximado. La calibración de módulos por medio de este método se llevo a cabo con el programa Windepav 2.0. Se realizó considerando los resultados de deflexiones (D_o) obtenidos en el ensayo de viga Benkelman que se realizaron en la pista de prueba descrita anteriormente. El procedimiento que se siguió fue un retrocálculo, el cual en detalle se describe de la siguiente manera:

1. Establecer qué tipo de materiales conforman las capas de la estructura de pavimento en estudio.
2. Determinar las propiedades físicas típicas de las capas de la estructura del pavimento (subrasante, base y carpeta asfáltica).
3. Para comenzar a utilizar el programa hay que tener en cuenta colocar la descripción del proyecto.

4. Para la calibración, el programa sólo tiene en cuenta para cada capa tres parámetros para su correcta ejecución, el módulo elástico, la relación de Poisson y el espesor, los valores de éstos parámetros se colocan teniendo en cuenta el número de capas y el orden en que se encuentran en campo. El espesor de la subrasante el programa lo considera infinito.
5. Los valores de los parámetros radio del área de carga, distancia entre ruedas y presión de contacto son fijos y vienen incorporados en el programa.
6. Por último, se realiza un proceso de iteración, consistente en variar el módulo de elasticidad de la base estabilizada con cal, manteniendo constantes los otros parámetros de ésta, de la carpeta asfáltica y subrasante hasta reproducir de manera exacta el valor de la deflexión obtenido en el ensayo de viga Benkelman (Do).

Las imágenes 7.1 y 7.2 nos muestran como el programa Windepav 2.0 ejecuta el proceso.

Imagen 7.1 Modelo programa Windepav 2.0. Datos

The screenshot shows the WinDepav 2.0 software interface. The window title is "WinDepav por Luis Ricardo Vásquez Varela". The interface includes a menu bar with "Archivo", "DEPAV", and "Acerca de". Below the menu bar, there is a "Descripción del proyecto" section with a text field containing "celda1" and a file path "C:\Users\pondal\Documents\tesis\calculo_depav\celda1-18.pav". To the right, there is a "Número de capas" section with radio buttons for 2, 3, 4, 5, and 6, where 3 is selected.

The main data entry area is divided into several sections:

Capa	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Rel. de Poisson	Espesor (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión		
					K1	K2	NESE	K3	K4	NESE
1	13000	0.35	8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
2	11420	0.3	30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
3	720	0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

Below the table, there is a "Cargas" section with a "Modelos de carga" button and three input fields: "Radio del área de contacto (cm)" with value 10.80, "Distancia entre ruedas (cm)" with value 32.40, and "Presión de contacto (kg/cm²)" with value 5.59.

An important note is displayed: "¡IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de este programa es necesario que el sistema reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas." The logo for "ingepav ingeniería de pavimentos" is located in the bottom right corner.

Imagen 7.2 Modelo programa Windepav 2.0. Resultados

WinDepav - Resultados

Archivo: C:\Users\ponda\Documents\tesis\calculo_depav\celda1-18.pav
 Descripción del proyecto: celda1

Eje de carga:
 Radio de las ruedas (cm):
 Distancia entre los centros de las ruedas (cm):
 Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²):

Posición del valor máximo para una carga:
 A: Bajo una rueda simple
 B: Bajo una de las ruedas de la carga
 C: Al centro de la carga

Número de capas: Estructura, respuestas estructurales y comportamiento

No.	E (kg/cm ²)	v	Z (cm)	st (kg/cm ²)	sz (kg/cm ²)	et (10 ⁻⁶)	Tensión: NF / FDF	ez (10 ⁻⁶)	Compresión: NR / FDR
1	13000	0.35	0.00	6.54e+00	5.59e+00	187.00	B	-89.80	C
	Ligada		8.00	1.51e+00	4.26e+00	-57.90	A	-14.30	C
2	11420	0.30	8.00	1.18e+00	4.26e+00	-57.90	A	326.00	A
	Ligada		38.00	-1.95e+00	2.76e-01	-136.00	C	117.00	C
3	720	0.20	38.00	-4.71e-02	2.76e-01	-136.00	C	403.00	C

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm):
 Radio de curvatura (m):
 Radio x Deflexión (m x mm/100):

Debido a la ausencia de algunos datos se utilizaron referencias bibliográficas para colocar valores típicos de parámetros que el programa requiere para la realización de los cálculos, tales como, la relación de Poisson para las tres capas y el módulo de elasticidad para la carpeta asfáltica y la subrasante. Los valores de los parámetros que se escogieron para ser utilizados en todas las celdas fueron los siguientes:

Tabla 7.8 Parámetros de las capas del pavimento (Windepav 2.0)

Capas	Parámetros de la estructura de pavimento		
	Módulo de elasticidad E (kg/cm ²)	Relación de Poisson μ	Espesor de la carpeta (cm)
Carpeta asfáltica	13000	0,35	8
Base	(*)	0,3	30, 25 o 20
Subrasante	720	0,2	-

Fuente: Estudio del radio de curvatura en la modelación de estructuras de pavimento flexible utilizando las aplicaciones DEPAV- ALIZÉ III y KENLAYER. Vásquez, Luis. Octubre de 2002

Cabe anotar que algunos de los valores de la tabla 7.8 se tomaron teniendo en cuenta las propiedades físicas de los suelos; el espesor de la base es el que presenta para cada celda la tabla 3.1; por último se aclara que el símbolo (*) es para indicar que éste es el parámetro a calibrar.

Los resultados (tabla 7.9) muestran que los módulos resilientes obtenidos para las bases con adición de cal son mayores que el módulo resilientes de la base sin adición de cal. Además, existe aleatoriedad de los módulos elásticos en relación con el porcentaje de cal.

Tabla 7.9 Módulos resilientes obtenidos en Windepav 2.0

N° ensayo viga Benkelman	TIPO DE MATERIAL	%	DEFLEXIONES		RADIO DE CURVATURA	ESPESOR DE ESTRUCTURA	Módulos WINDEPAV (kg/cm ²)
			D0	D25			
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 3	34	27	205	30	11420
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	31	19	135	30	4300
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	50	42	203	30	3153
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 9	31	19	134	30	4300
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 12	35	15	81	30	2150
6	SUELO MS-49	L.M. 3	58	46	135	30	3500
7	SUELO MS-49	L.M. 6	92	54	41	30	724
8	SUELO MS-49	L.M. 9	50	38	135	30	3153
9	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	27	410	20	25700
10	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	57	46	137	20	4400
11	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 0	117	42	21	30	440
12	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	79	53	59	30	1009
13	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	38	36	828	30	7540
14	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	30	15	104	30	18830
15	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 12	38	34	414	30	7540
16	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	23	11	138	30	4400
17	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	23	207	30	6800
18	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	34	30	414	30	18400
19	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	49	42	207	25	4168
20	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	91	60	52	25	741

7.4.2 Método de Elementos Finitos. La calibración de módulos por elementos finitos se realizó en el programa Plaxis, ésta se efectuó a partir de las deformaciones obtenidas en el ensayo de placa realizado a la pista de prueba. La metodología utilizada fue la siguiente:

1. Establecer qué tipo de materiales conforman las capas de la estructura de pavimento en estudio.
2. Determinar las propiedades físicas típicas de las capas de la estructura del pavimento (subrasante, base y carpeta asfáltica).
3. El primer paso para desarrollar el proyecto en el programa Plaxis es la configuración general (General Settings), donde se encuentran los ítem proyecto y dimensiones. En el primero, se coloca el título del proyecto, el modelo asimétrico y en el submenú elementos, 15 nodos; en el segundo, se colocan las unidades de longitud, fuerza y tiempo en m, KN y día respectivamente; en este segundo ítem (dimensiones) también se colocan las dimensiones geométricas, que en otras palabras, son las dimensiones del área en que se desea trabajar.
4. El siguiente paso es realizar la geometría del proyecto, en la cual, el ancho de la estructura es de 1.75m, que es la mitad del carril de 3.50m, los espesores de las capas son los mismos que se utilizaron en el programa Windepav 2.0 (ver tabla 7.8) a diferencia del espesor de la subrasante que se colocó de 1m; además se colocan las restricciones (standard fixities) y los desplazamientos previstos, que son las deformaciones obtenidas en el ensayo de placa.
5. Luego, en el menú “material sets” se colocan en cada capa, las propiedades de los materiales, de acuerdo a la tabla 7.10 y se llevan a la geometría realizada.

6. Una vez terminado el paso anterior, se procede a realizar los pasos necesarios para el correcto funcionamiento del programa: generar malla (Generate mesh), generar esfuerzos iniciales (Generate initial stresses), para luego pasar a calcular.

7. La idea es variar el módulo de elasticidad para la base estabilizada y manteniendo los otros parámetros constantes, aproximando con un error menor de 1.5% el valor de la carga del ensayo de placa de 133.92 KN, manteniendo fijo el valor de deflexión del ensayo. En el programa, el valor de la carga que resulta debe ser multiplicado por “ π ” para que éste quede en las mismas unidades del que se requiere obtener (133.92 KN).

Los valores de los parámetros necesarios en la ejecución del programa se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7.10 Parámetros de las capas del pavimento (Plaxis)

Parámetros	Símbolo	Carpeta asfáltica	Base estabilizada	Subrasante	Unidad
Modelo del material	Modelo	Elástico lineal	Elástico lineal	Elástico lineal	-
Tipo de comportamiento del material	Tipo	Drenado	Drenado	Drenado	-
Peso específico del suelo no saturado	γ_{unsat}	20,000	20,000	16,500	KN/m ³
Peso específico del suelo saturado	γ_{sat}	23,000	24,000	20,000	KN/m ³
Permeabilidad en dirección horizontal	Kx	1,000	0,500	1,000	m/día
Permeabilidad en dirección vertical	Ky	1,000	0,500	1,000	m/día
Módulo de Young's	E _{ref}	1300000	(*)	72000	KN/m ²
Relación de Poisson	N	0,350	0,300	0,200	-

Nótese que los valores de los parámetros en común entre los programas Plaxis y Windepav son iguales; con estos valores y teniendo en cuenta la geometría de la

estructura del pavimento analizado, se procede a obtener los módulos que mejor reproduzcan los resultados del ensayo de placa.

El modelo del programa se muestra en las siguientes imágenes:

Imagen 7.3 Modelo programa Plaxis. Geometría

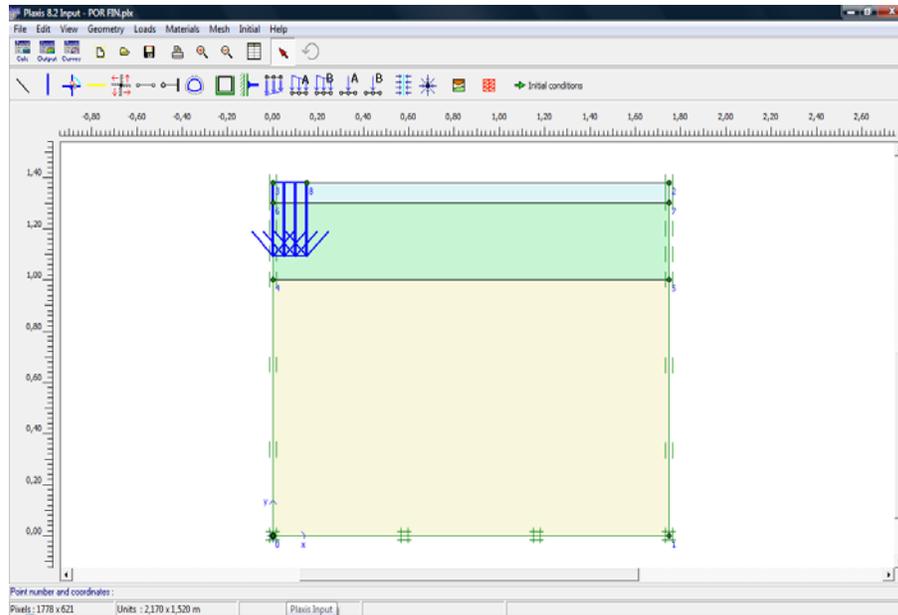


Imagen 7.4 Modelo programa Plaxis. Datos Base granular (1)

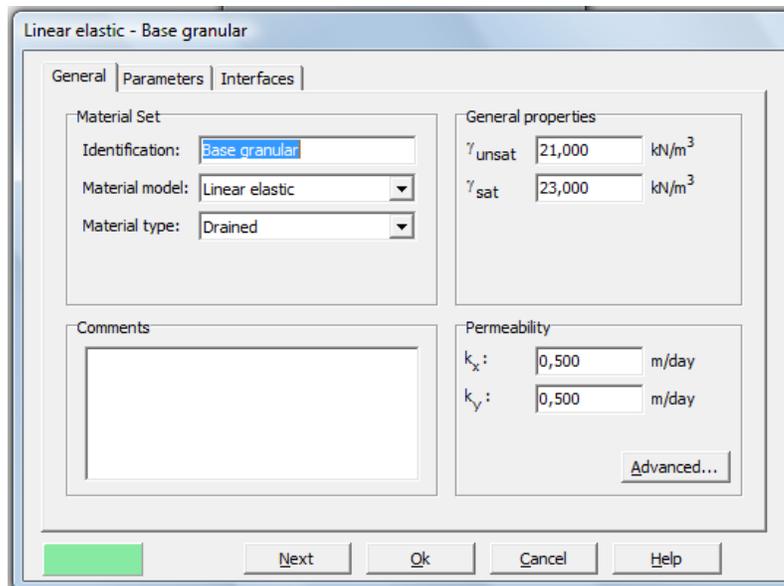


Imagen 7.5 Modelo programa Plaxis. Datos base granular (2)

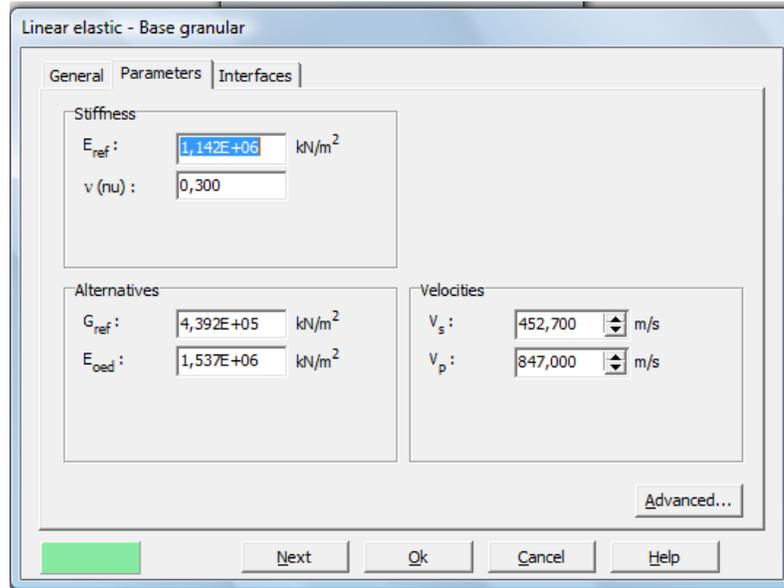
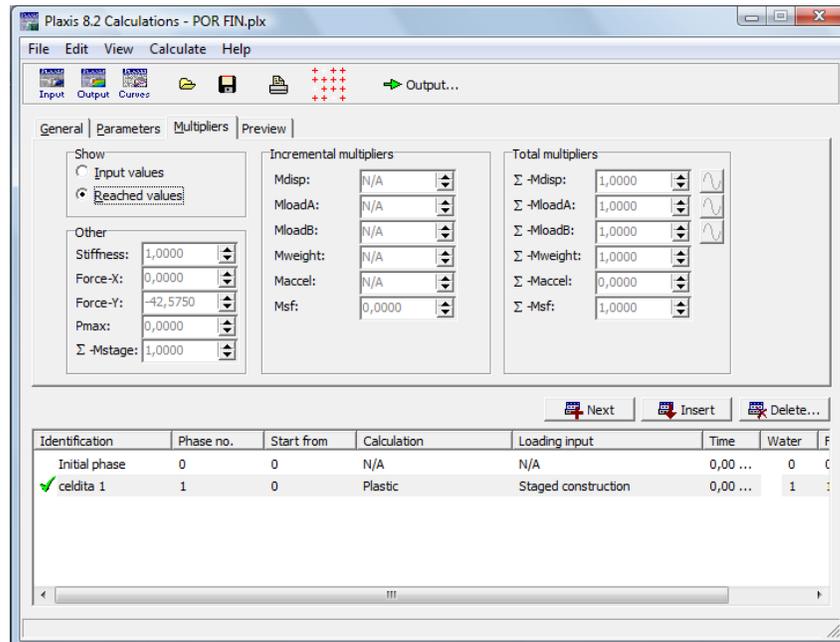


Imagen 7.6 Modelo programa Plaxis. Resultados



Los resultados de la modelación en Plaxis (tabla 7.11) indican que los valores de los módulos resilientes de las bases con adición de cal son mayores que la de la base sin adición de cal.

Tabla 7.11 Módulos resilientes de bases estabilizadas con cal obtenidos en Plaxis

N° ensayo	TIPO DE MATERIAL	%	ESPESOR DE ESTRUCTURA	Módulos PLAXIS (kg/cm ²)	Carga (KN)
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 3	30	11420	135
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	30	4311,14	133,98
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 6	30	4311,14	133,98
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 9	30	7415,97	134
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	A.F. 12	30	3300	134,24
6	SUELO MS-49	L.M. 3	30	3800	134,78
7	SUELO MS-49	L.M. 6	30	1742	134,32
8	SUELO MS-49	L.M. 9	30	3300	134,24
9	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	20	38500	133,72
10	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	20	5300	134,24
11	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 0	30	1020	133,43
12	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	30	2850	133,42
13	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	8450	133,61
14	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	30	51000	133,6
15	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 12	30	10000	133,74
16	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 3	30	12200	133,76
17	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	30	9000	133,53
18	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	30	22500	133,33
19	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 6	25	2400	134,58
20	BASE GRANULAR MS-022	B.G. 9	25	1750	133,87

Comparando los valores entre los módulos resilientes de las bases estabilizadas con cal obtenidos por métodos de análisis aproximado y elementos finitos (tabla 7.12) se observa gran disparidad entre ellos. Solamente 4 parejas de datos tienden a converger a un mismo valor.

Tabla 7.12 Diferencia relativa entre los módulos obtenidos en Windepav 2.0 y Plaxis

# ENSAYO	% CAL	MÓDULOS EN kg/cm2		DIFERENCIA (%)
		Windepav	Plaxis	
1	A.F. 3	11420	11420	0
2	A.F. 6	4300	4311,14	0
3	A.F. 6	3153	4311,14	27
4	A.F. 9	4300	7415,97	42
5	A.F. 12	2150	3300	35
6	L.M. 3	3500	3800	8
7	L.M. 6	724	1742	58
8	L.M. 9	3153	3300	4
9	B.G. 6	25700	38500	33
10	B.G. 9	4400	5300	17
11	B.G. 0	440	1020	57
12	B.G. 3	1009	2850	65
13	B.G. 6	7540	8450	11
14	B.G. 9	18830	51000	63
15	B.G. 12	7540	10000	25
16	B.G. 3	4400	12200	64
17	B.G. 6	6800	9000	24
18	B.G. 9	18400	22500	18
19	B.G. 6	4168	2400	42
20	B.G. 9	741	1750	58

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE VIGA BENKELMAN

El promedio de deflexiones es poco representativo, ya que, existe un coeficiente de variación mayor del 50%. Por tanto existe gran variabilidad entre las deflexiones.

Tomando como unidad de medida para la calificación del sector la relación deflexión característica sobre la deflexión admisible (D_c / Δ_{adm}), puesto que proporciona una rápida visualización del funcionamiento de las calzadas en servicio en función de su degradación, se observa que la pista de prueba construida presenta un buen funcionamiento, pues $D_c / \Delta_{adm} = 0,82$ y este valor se encuentra en el rango en el que los pavimentos efectivamente se consideran como buenos ($0,5 < D_c / \Delta_{adm} < 1,0$).

La estructura de pavimento en estudio, con los distintos tipos de materiales y porcentajes de cal utilizados, no son recomendables para tramos de vía con un tránsito ($N \times 10^6$) igual o superior a 2,53 porque a partir de este valor teniendo en cuenta la unidad de medida de calificación D_c / Δ_{adm} y su rango de calificación la estructura tendría un mal comportamiento.

Con base en los radios de curvatura y la condición de que valores inferiores a 80m indican la presencia de zonas débiles bajo las capas asfálticas, de los tres suelos utilizados como base de la estructura de pavimento, el material granular MS-49 es el de mejor comportamiento, pues con sólo una adición de cal del 3%, los radios de curvatura obtenidos a partir del ensayo de viga Benkelman son superiores a 80 m, para los otros dos materiales el comportamiento es aleatorio.

No existe tendencia clara acerca de la influencia del contenido de cal sobre las deflexiones que se darán en el pavimento. Se puede deducir la disminución de las deflexiones en el pavimento al contener cualquier porcentaje entre 3% y 12% de porcentaje de cal.

El material granular MS-49 es el de menores deflexiones y de menor variabilidad de las mediciones en las celdas, lo cual implica un mejor comportamiento a la estabilización con cal.

El material granular MS-49 y el suelo MS-49 presentan resultados homogéneos en las celdas con adición de cal del 3% y 9%. En el material granular se puede establecer similar homogeneidad si se tiene en cuenta la adición de cal en 12%. Los resultados de la base granular MS-022, son muy heterogéneos presentándose altos y bajos valores de deflexión para celdas con las mismas adiciones de cal.

La influencia del espesor de la base es aleatoria, se esperaría que a menor espesor se diera una mayor deflexión, pero los resultados no permiten establecer alguna tendencia clara.

8.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PLACA

Las gráficas esfuerzo – deformación realizadas con los datos obtenidos en el ensayo de placa nos muestran la mejora del comportamiento de los suelos al adicionarles los distintos porcentajes de cal.

Aunque algunos valores del módulo elástico de la estructura del pavimento obtenidos con las dos correlaciones no convergen, el menor valor de módulo elástico se presenta en la celda sin adición de cal. Independiente del porcentaje de adición de cal y del espesor de la base el módulo elástico aumenta al agregarse cal.

El material granular MS-49, presenta mayores valores del módulo elástico de la estructura del pavimento que los del suelo MS-49 para un mismo porcentaje de cal.

Al comparar los tipos de suelo con el porcentaje de cal del 6% y 9% y el mismo espesor de la base, se observa que la base granular MS-022, presenta valores de módulo elástico mayores que los de los otros suelos.

En los pavimentos cuya base está compuesta con material granular MS-49 y suelo MS-49, se observa la tendencia que a mayor porcentaje de cal los valores de los módulos elásticos de la estructura del pavimento disminuyen.

En los pavimentos con base granular MS-022, se observa que la variación del espesor de la base de cal no muestra una relación clara con la variación del módulo elástico de la estructura del pavimento y el porcentaje de cal.

8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROGRAMA WINDEPAV 2.0

Los módulos resilientes de las bases estabilizadas con cal son mayores que el módulo de la base sin estabilización de cal.

Las bases con material granular MS-49, presentan mayores valores del módulo resiliente que las bases del suelo MS-49 para un mismo porcentaje de cal.

Manteniendo constante el porcentaje de cal, al comparar los valores de los módulos resilientes de la base granular MS-022 con la de las otras bases conformadas con los materiales restantes, se observa una variación aleatoria.

No existe tendencia, en ninguno de los materiales que conforman las bases, entre la variación del porcentaje de cal y el cambio en los valores de módulos resilientes.

Los mayores valores de módulos resilientes se obtienen para cada material en diferentes porcentajes de adición de cal. Para la base granular MS-022 y el material granular MS-49 los mayores módulos se presentan con una adición de cal del 6%, mientras que para el suelo MS-49 se da al 9%.

En los pavimentos con base granular MS-022, se observa que la variación del espesor de la base de cal no muestra una relación clara con la variación del módulo elástico de la estructura del pavimento y el porcentaje de cal.

El rango de variabilidad de los valores de módulos resilientes de las bases adicionadas con cal es alto.

8.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROGRAMA PLAXIS

Los módulos resilientes de las bases estabilizadas con cal son mayores que el módulo resiliente de la base sin estabilización con cal.

Las bases con material granular MS-49, presentan mayores valores del módulo resiliente que las bases del suelo MS-49 para un mismo porcentaje de cal.

Para porcentaje de cal del 6% y el 9% con el mismo espesor de la base, los valores de los módulos resilientes de la base granular MS-022 son mayores que los de las bases de material granular MS-49 y suelo MS-49.

En los pavimentos cuya base está compuesta con material granular MS-49, se observa la tendencia que a mayor porcentaje de cal los valores de los módulos resilientes de la estructura del pavimento disminuyen.

Los mayores valores de módulos resilientes se obtienen para cada material en diferentes porcentajes de adición de cal. Para el material granular MS-49 y el suelo MS-49 los mayores módulos se presentan con una adición de cal del 3%, mientras que, para la base granular MS-022 se da al 9%.

En los pavimentos con base granular MS-022, se observa que la variación del espesor de la base de cal no muestra una relación clara con la variación del módulo resiliente de la estructura del pavimento y el porcentaje de cal.

El rango de variabilidad de los valores de módulos resilientes de las bases adicionadas con cal es alto.

8.5 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MÓDULOS RESILIENTES OBTENIDOS POR MÉTODOS DE ANÁLISIS NUMÉRICO APROXIMADO Y ELEMENTOS FINITOS (PROGRAMA WINDEPAV 2.0 Y PROGRAMA PLAXIS RESPECTIVAMENTE)

Las diferencias relativas entre los módulos resilientes obtenidos en los métodos de análisis numérico aproximado y elementos finitos son grandes en la mayoría de las celdas en estudio, presentando diferencias pequeñas sólo en 5 de las 20 celdas analizadas.

En ambos métodos el peor módulo se presenta en la celda sin adición de cal, con una diferencia relativa entre ellos del 57%.

Entre las celdas con espesor igual a 30cm, ambos métodos presentan el mayor módulo resiliente en la celda con base granular MS-022 y porcentaje de cal adicionado del 9% (celda #14), con una diferencia relativa del 63%.

Con respecto al material granular MS-049, se observa que el mejor módulo resiliente lo presenta la celda con adición de cal del 3%, siendo éste de igual valor en ambos modelos, presentando, con respecto a la celda sin adición de cal, un incremento del 96% en el programa Windepav y del 91% en el programa Plaxis.

En bases con suelo MS-049, el mejor módulo resiliente en ambos modelos lo presenta la celda con adición de cal del 3%, con una diferencia relativa entre ellos del 8%, presentando, con respecto a la celda sin adición de cal, un incremento del 87% en el programa Windepav y del 73% en el programa Plaxis.

Para las celdas con base granular MS-022, y cuyo espesor es de 30cm, el mejor módulo resiliente lo presenta la celda con adición de cal del 9% en ambos modelos, con una diferencia relativa entre ellos del 51%, presentando en ambos programas (Windepav y Plaxis) un incremento del 98% con respecto a la celda sin adición de cal.

8.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAMPO COMPARADOS CON LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS

El hecho relevante es que, tanto los módulos elásticos de la estructura del pavimento, calculados a través de las correlaciones, y los de las bases, determinados a través de los software, cuando tienen adición de cal son mayores que la base que no tiene adición de cal.

Al ordenar los módulos de la estructura del pavimento, obtenidos a través de las correlaciones, y los módulos de las bases, determinados con los software, no

existe coincidencia. La mayor coincidencia se da entre los valores obtenidos con Plaxis y la ecuación 2.8, con un 70%. Lo anterior, indica que existe una dependencia de los resultados con las propiedades mecánicas de la subrasante.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La cal utilizada como estabilizante mejora significativamente el comportamiento de los suelos, convirtiéndose en una alternativa económica para la construcción de pavimentos en el país.

La estabilización de suelos granulares con cal aumenta el valor del módulo resiliente de una estructura de pavimento flexible. Tanto así, que suelos que no cumplen las especificaciones para ser usados como capas estructurales de pavimentos flexibles al ser estabilizados con cal mejoran sus propiedades mecánicas por encima de bases granulares que cumplen dichas especificaciones.

Una estructura de pavimento conformada por una base estabilizada con cal, posee mayor módulo resiliente que una estructura de pavimento de mayor espesor y sin estabilización de la base.

No se encontró una tendencia clara sobre el porcentaje de cal óptimo para mejorar el comportamiento mecánico de un suelo.

No existe convergencia entre los valores de los módulos resilientes obtenidos de los ensayos de campo y los obtenidos a través de los programas. Existe un comportamiento aleatorio entre la variación de los módulos resilientes de la estructura del pavimento y los módulos resilientes de sus bases.

En futuras investigaciones se deben realizar mayor número de ensayos para poder realizar un análisis estadístico profundo acerca del porcentaje óptimo de cal para el mejoramiento de los suelos; además de un control de las características y propiedades de la subrasante para determinar su influencia en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, M. y. (s.f.). Relación entre módulo resiliente determinado mediante deflectómetro de impacto y el de laboratorio.

ALVAREZ, P. J. (s.f.). Estabilización de subrasantes. Instituto Colombiano de Productores de Cemento ICPC.

BRINKGREVE, R. (2004). Manual de referencia de Plaxis. PLAXIS b.v. P.O. Box 572, 2600 AN DELFT, Países Bajos.

CATAÑO Sandra, GÓMEZ Alexander & SÁNCHEZ Marcos. (2002). Propuesta de un procedimiento para determinar el índice de estado de un pavimento de la red vial colombiana. Medellín.

CRESPO DEL RIO & BARDASANO. (2004). Características de los equipos de medida habituales. Viga Benkelman. Valores de la deflexión según el equipo de medida. Planteamiento teórico.

FIGUEROA, S. & REYES, F. 2003. Estabilización con cal y cemento. IV Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial. Bogotá, En CD Rom.

GÓMEZ, C., OSORIO, J., HIDALGO, C. y RODRÍGUEZ, M. 2004. Análisis del comportamiento estático de un suelo tipo granular adicionado con cal. Revista Ingenierías No 5. Universidad de Medellín. Medellín.

Guía AASHTO, 1993. Diseño de Estructuras de Pavimentos.

HIDALGO, C., & Rodríguez, M. (2004). Proyecto mejoramiento de suelos con cal. Universidad de Medellín. Sin publicar.

HIDALGO, C.A y RODRÍGUEZ, M.A, 2008. "Comportamiento mecánico de suelos residuales estabilizados" Nuevas Tendencias En El Diseño De Materiales Y Estructuras . En: Colombia ISBN: 978-958-8348-30-8 ed: Sello Editorial Universidad De Medellín , v.null , p.271 - 312 null

HIDALGO, C.A y RODRÍGUEZ, M.A. 2006. Comportamiento de algunos suelos residuales de área de Medellín estabilizados con cal. En Avances de la Investigación en Ingeniería. ISBN 958-97766-5-5, Sello Editorial Universidad de Medellín – Medellín.

HIGUERA, C. H. (2007). Leyes de comportamiento de la deflexión admisible en pavimentos flexibles. Revista Facultad de Ingeniería, p. 7-14.

HUANG, Y.H. 2004. Pavement Analysis and Design. Pearson-Prentice Hall. Second Edition. USA. 775 p.

IMT. 2001. Deformaciones Permanentes en Materiales Granulares para la Sección Estructural de Carreteras. Instituto mexicano del Transporte, Publicación Técnica 176.

LITTLE, DALLAS N. 2000. Evaluation of structural properities of lime stabilized soils and aggregates. Volume 3: Mixture desing and texting protocol for lime stabilized soils.

MENDOZA, L. D., Rios, R., & Torres, D. (1993). Medidas de deflexión y curvatura. En Evaluación de las características superficiales de los pavimentos en la ciudad de Medellín. Medellín.

MONTEJO, A. (2002). En Ingeniería de pavimentos. Bogotá.

NAZZAL, M. D. (2003). Field evaluation of in-situ test technology for qc/qa during construction of pavement layers and embankments. Google. NLT-357. (1998).

RÍOS, R. A. (2003). El método de elementos finitos. Herramientas computacionales en ingeniería.

RIVERA, A. R. (1987). Ingeniería e Investigación. Formulación generalizada del proceso de elementos finitos . Bogotá, Colombia.

RODRÍGUEZ, M.A. & HIDALGO, C.A. 2005. Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Medellín: , v.4, n.6, p.111 - 122, ISSN 1692-3324

RONDON, H. A., & Reyes, F. (2007). Comportamiento Resiliente de Materiales Granulares en Pavimentos Flexibles: Estado del conocimiento. Revista Ingenierías Universidad de Medellín , 65-90.

SAMPEDRO, A. (2003). Tratamiento de suelos con cal. III Congreso Andaluz de Carreteras. Sevilla.

TADEO, C. F. (2006). Ensayo de placa de carga dinámica de 300 mm de diámetro. Boletín de la Asociación de Laboratorios Acreditados de la Comunidad de Madrid (ALACAM) .

UTHUS, L. (2007). Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates. Thesis for the degree of philosophiae doctor . Trondheim, Norwegian.

VARELA, L. R. (2002). Estudio del radio de curvatura en la modelación de estructuras de pavimento flexible utilizando aplicaciones depav-alizé iii y kenlayer. boletín de vías, p. 75-91.

VÁSQUEZ, L. R. (2007). WINDEPAV 2.0. XVI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de pavimentos. Manizales.